

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ, PROJEKTOVÁNÍ

A METROLOGIE



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Materiály pro technologii FDM

AUTOR:	Vojtěch Fiala
VEDOUCÍ PRÁCE:	Ing. Lukáš Pelikán
STUDIJNÍ PROGRAM:	B2343 Výroba a ekonomika ve strojírenství

PRAHA 2023

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Fiala** Jméno: **Vojtěch** Osobní číslo: **491492**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávající katedra/ústav: **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**  
Studijní program: **Výroba a ekonomika ve strojírenství**  
Studijní obor: **Technologie, materiály a ekonomika strojírenství**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Materiály pro technologii FDM**

Název bakalářské práce anglicky:

**FDM technology materials**

Pokyny pro vypracování:

1. Úvod do technologie FDM.
2. Dostupné materiály pro technologii FDM.
3. Porovnání mechanických vlastností různých materiálů.
4. Možnosti postprocessingu různých materiálů.

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

**Ing. Lukáš Pelikán ústav technologie obrábění, projektování a metrologie FS**

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **11.04.2023**

Termín odevzdání bakalářské práce: **31.07.2023**

Platnost zadání bakalářské práce: \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_  
Ing. Lukáš Pelikán  
podpis vedoucí(ho) práce

\_\_\_\_\_  
Ing. Libor Beránek, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

\_\_\_\_\_  
doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

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

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně. Dále prohlašuji, že jsem všechny použité zdroje správně a úplně citoval a uvádím je v příloženém seznamu použité literatury.

Nemám závažný důvod proti zpřístupnění této závěrečné práce v souladu se zákonem č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) v platném znění.

V Praze dne:

Podpis:

# Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá problematikou materiálů pro technologii Fused Deposition Modeling (FDM) v rámci 3D tisku plastových materiálů. FDM je stále více rozšířenou aditivní technologií, která nachází široké využití v průmyslu pro výrobu prototypů a v běžných domácích podmínkách pro rychlou a cenově dostupnou tvorbu prototypů, funkčních dílů a komplexních tiskových projektů.

Cílem této práce bylo poskytnout čtenářům rešerši dostupných a běžně využívaných materiálů pro technologii FDM. Práce se zaměřila na základní materiály, které jsou nejčastěji používány v této technologii, a na kompozitní a speciální materiály, které nabízejí specifické vlastnosti.

V teoretické části byl popsán princip technologie FDM a její použité zařízení. Dále byly uvedeny základní materiály pro FDM s podrobným popisem jejich vlastností a požadavků pro úspěšné použití. Věnovaná byla také pozornost speciálním materiálům s jedinečnými vlastnostmi.

V praktické části byly zkoumány mechanické vlastnosti vybraných materiálů. Ukázalo se, že materiály obohacené kovovými částicemi mají omezenou mechanickou odolnost, což je předurčuje pro estetické aplikace a výrobu lehkých břemen. Materiály s plnivem dřeva a korku nabízejí autentický vzhled a jsou vhodné pro dekorativní aplikace a ergonomické úchopy. Speciální materiály prokázaly své využití v průmyslových aplikacích vyžadujících pružnost, chemickou odolnost nebo vyhlazení povrchu.

Výsledky této práce poskytují užitečné informace o materiálech pro technologii FDM a jejich vhodných aplikacích. Tímto přispívá k lepšímu porozumění a využití této aditivní technologie ve světě 3D tisku.

## Klíčová slova

3D tisk, FDM, Filament, mechanické zkoušky, přehled materiálů, využití materiálů

# Abstract

This bachelor's thesis addresses the issue of materials for Fused Deposition Modeling (FDM) technology in the context of 3D printing of plastic materials. FDM is a widely used additive technology, commonly employed in industries for prototype production, and embraced by everyday users for rapid and cost-effective prototyping, functional part creation, and complex printing projects.

The aim of this work was to provide readers with a survey of available and commonly used materials for FDM technology. The study focused on fundamental materials most frequently utilized in this technology and explored composite and special materials offering distinct properties.

The theoretical part described the principle of FDM technology and the devices used in the process. Basic materials for FDM were introduced, accompanied by a detailed description of their properties and requirements for successful application. Special materials with unique features were also discussed.

In the practical part, mechanical properties of selected materials were examined. It was revealed that materials enriched with metal particles had limited mechanical resilience, making them suitable for aesthetic applications and the production of lightweight loads. Materials containing wood and cork fillers provided an authentic appearance and were deemed fitting for decorative purposes and ergonomic grips. Special materials demonstrated their utility in industrial applications requiring flexibility, chemical resistance, or surface smoothing.

The results of this thesis offer valuable information about materials for FDM technology and their appropriate applications, thereby contributing to a better understanding and utilization of this additive technology in the world of 3D printing.

## Keywords

3D printing, FDM, Filament, mechanical testing, materials overview, material applications

## Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat panu Ing. Lukáši Pelikánovi, vedoucímu bakalářské práce, za jeho ochotu, čas a odborné rady, které byly poskytnuté při psaní bakalářské práce.

Dále bych chtěl poděkovat panu Ing. Šimonu Petráškovi za pomoc a praktické rady při realizaci mechanických zkoušek pro praktickou část.

# Obsah

<b>Úvod</b> .....	<b>9</b>
<b>1 Fused Deposition Modeling (FDM/FFF)</b> .....	<b>10</b>
<b>1.1 Princip technologie FDM</b> .....	<b>11</b>
<b>1.2 Materiály pro FDM</b> .....	<b>13</b>
1.2.1 PLA .....	13
1.2.2 PET-G.....	15
1.2.3 ABS.....	17
1.2.4 ASA.....	19
1.2.5 SILK.....	21
1.2.6 Nylon (PA) .....	23
<b>1.3 Materiály pro FDM obohacené plnivem</b> .....	<b>25</b>
1.3.1 Bronzefill .....	25
1.3.2 Copperfill .....	27
1.3.3 Steelfill .....	28
1.3.4 XT-CF20.....	29
1.3.5 WoodJet.....	30
1.3.6 Nylon AF80 Aramid .....	31
1.3.7 Corkfill.....	33
1.3.8 Woodfill .....	35
<b>1.4 Speciální materiály pro FDM</b> .....	<b>37</b>
1.4.1 NonOilen .....	37
1.4.2 PMMA .....	38
1.4.3 FLEXfill 98A.....	40
1.4.4 MoldLay .....	41
1.4.5 EP .....	42
<b>2 Praktická část</b> .....	<b>43</b>
<b>2.1 Test mechanických vlastností</b> .....	<b>44</b>
2.1.1 Princip zkoušky .....	44
2.1.2 Volba zkušebních těles.....	46
2.1.3 Naměřené hodnoty.....	47
<b>2.2 Test povrchových vlastností</b> .....	<b>48</b>
2.2.1 Princip zkoušky .....	48

2.2.2	Volba zkušebních těles.....	48
<b>2.3</b>	<b>Zhodnocení výsledků a analýza .....</b>	<b>48</b>
<b>2.4</b>	<b>Diskuze .....</b>	<b>Chyba! Záložka není definována.</b>
<b>Závěr</b>	<b>.....</b>	<b>61</b>
<b>Seznam obrázků</b>	<b>.....</b>	<b>Chyba! Záložka není definována.</b>
<b>Seznam tabulek</b>	<b>.....</b>	<b>65</b>
<b>3</b>	<b>Bibliografie.....</b>	<b>66</b>



# Úvod

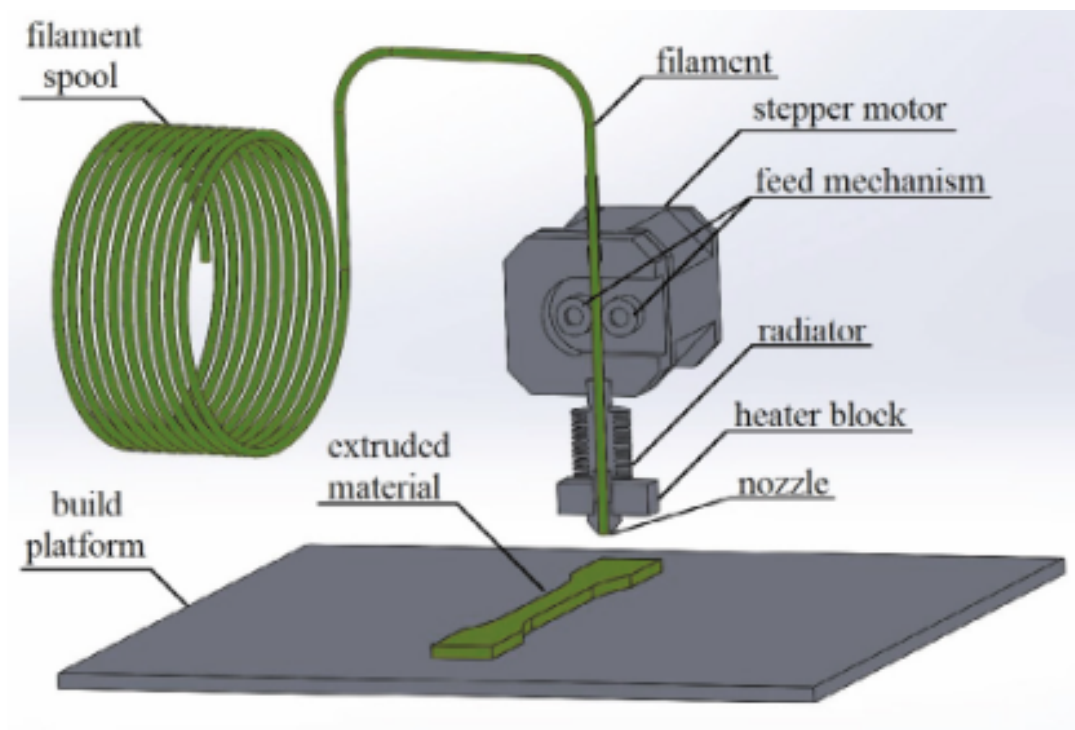
Technologie 3D tisku plastových materiálů je stále více rozšířenou aditivní technologií. Má hojně zastoupení v průmyslu, kde nachází nejčastější využití pro výrobu prototypů. Náklady na výrobu tištěných dílů jsou totiž výrazně nižší než při výrobě dílů na konvenčních strojích. Technologie také umožňuje výrobu dílů velmi složitých tvarů, které následně vyžadují pouze nízké množství dokončovacích operací. Díky dobré dostupnosti a jednoduchosti se tato technologie stala velmi oblíbenou a rozšířenou pro běžné uživatele v domácích podmínkách, kterým umožňuje rychlou a cenově dostupnou výrobu prototypů, funkčních dílů a různých komplexních tiskových projektů pro průmyslové, návrhářské a spotřebitelské aplikace.

Se stále rostoucím trendem využívání 3D tisku pro všemožné účely, roste i poptávka a nabídka nejrůznějších druhů materiálů, které se touto technologií dají zpracovávat. Různé materiály nabízejí různé využití a snahou výrobců je nabídnout co nejširší možný výběr tak, aby mohl každý uživatel uspokojit své konkrétní potřeby a účely pro které chce technologii aditivní výroby využívat.

Cílem této práce je seznámit čtenáře s problematikou 3Dtisku plastových materiálů technologií FDM/FFF. Nabídnout čtenáři rešerši dostupných a běžně využívaných materiálů pro tuto technologii. Představit několik vybraných kompozitních a speciálních materiálů. U těchto materiálů provést mechanické zkoušky a následně provést vyhodnocení získaných výsledků

# 1 Fused Deposition Modeling (FDM/FFF)

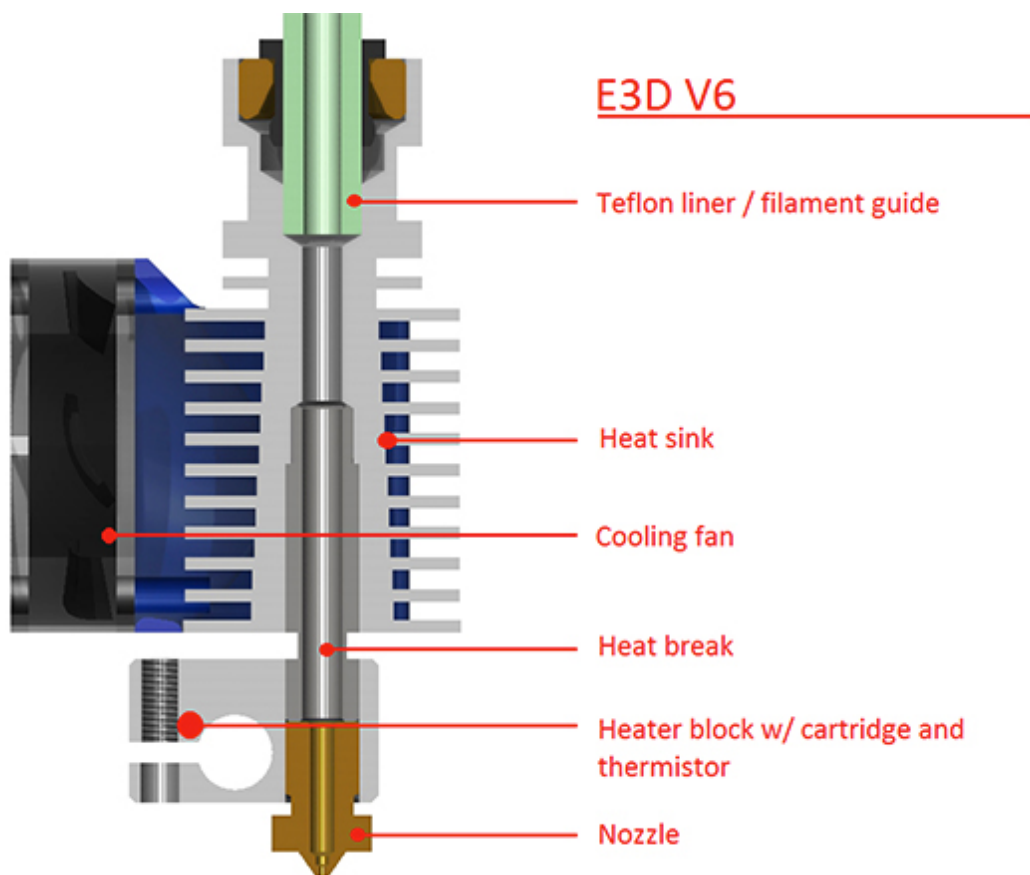
Nejběžnější metodou 3D tisku je právě tisk FDM (Fused Deposition Modeling). Jedná se o aditivní technologii fungující na principu vytlačování termoplastického materiálu, který je taven a přes trysku vytlačován vrstvou po vrstvě (layer-by-layer) na pevnou tiskovou podložku. Ve většině případů je tiskový materiál ve formě struny, běžně o průměru 1,75mm, navinuté na cívce o výrobcem určené hmotnosti. Tato struna je přiváděna a dávkována do tiskové hlavy za pomoci krokového motoru [1] [2].



Obrázek 1 Schéma metody FDM [3]

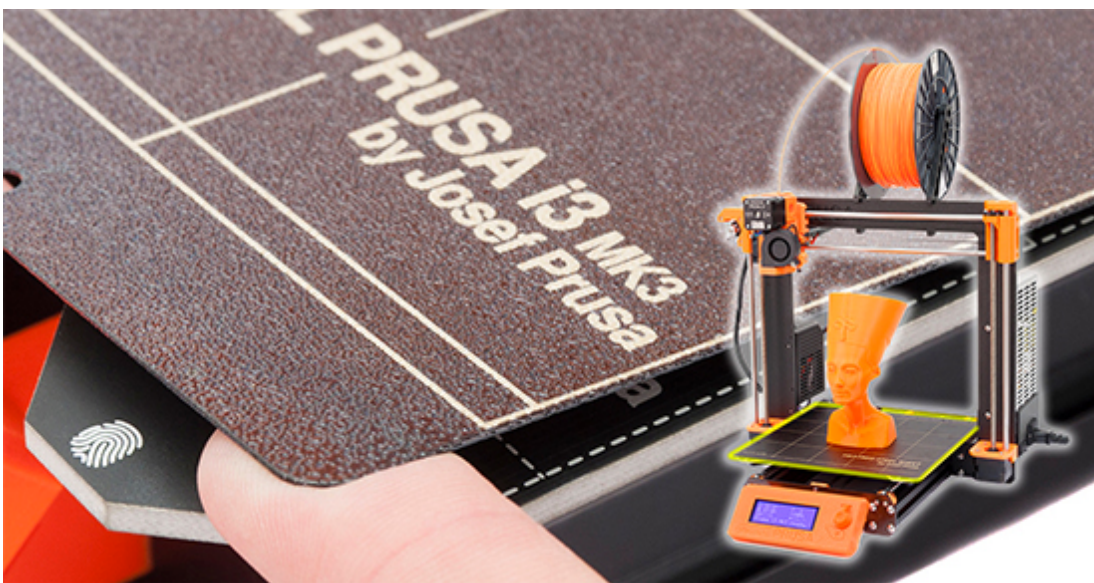
## 1.1 Princip technologie FDM

Nejdůležitější částí tiskárny principu FDM je tisková hlava. Pro správnou funkci tiskárny je zapotřebí materiál nejen tavit, ale také chladit, jelikož materiál není tiskovou hlavou protlačován pouze jedním směrem, ale při tzv. retrakcích se pohybuje i směrem opačným. Funkci chlazení povětšinou zabezpečuje žebrovaný chladič společně s ventilátorem, který napomáhá proudění chladnějšího vzduchu okolo jednotlivých žebrování. Proces tavení i chlazení probíhá v tiskové hlavě, ne však na stejném místě, zahřátí materiálu se uskutečňuje ve spodní části, chlazení probíhá o kus výše, o přerušení vedení tepla mezi těmito bloky se stará jejich spojovací část. Nejspodnější částí tiskové hlavy je tryska, ze které je materiál vytlačován po natavení v teplé části. Trysky se používají v různých průměrech, vyrobeny z různých materiálů. Konečná volba trysky závisí na tisknutém materiálu a má zásadní vliv na její životnost [1] [2].



Obrázek 2 Schéma konstrukce tiskové hlavy FDM [2]

Natavený materiál je z trysky vytlačován na pevnou tiskovou podložku. Pro bezproblémový průběh tisku v celém objemu je zásadní správné spojení této podložky a první tištěné vrstvy. První vrstva musí být správně přilepena k podkladu, zároveň však musíme být schopni hotový výtisk z podložky bez poškození odlomit. Tuto podmínku pomáhají zabezpečit vyhřívané tiskové podložky např. z materiálu PEI (polyetherimid), nahřívání podložky totiž zlepšuje její adhezní vlastnosti s tištěným materiálem, ale při snížení teploty na pokojovou adheze klesne pro bezpečně odejmutí výrobku [1] [2].



Obrázek 3 Pružinový plech s PEI povrchem (Prusa Printers) [1]

## 1.2 Materiály pro FDM

Tisk polymerních materiálů je stále světově nejrozšířenější, i proto celá řada e-shopů a prodejců nabízí na trh 3D tisku plné haly materiálů různých druhů, barev, návinů. Volba materiálu se odvíjí od požadavků na výsledné vlastnosti výtisku, jeho použití. Některé materiály zajišťují dobrou tepelnou odolnost, jiné zase mechanickou pevnost, či dobrou plasticitu. Nejširší zastoupení materiálů ovšem stále tvoří základní pětice: PLA, ABS, resin, NYLON a PET-G [4].



Obrázek 4 Návin filamentu PLA/ABS různých barev [4]

### 1.2.1 PLA

Jedná se o polymer, kyselinu polymléčnou, nebo také pokylaktid, běžně známy pod zkratkou PLA. Je biologicky odbouratelný a plně rozložitelný. Výchozí surovinou pro výrobu je kukuřičný škrob, případně cukrová třtina. Přesto je za nejlepší nakládání se zbytky materiálu považována recyklace, vzhledem k době jeho degradace. Skutečnost, že používat recyklovaný PLA materiál pro výtisk dalších výrobků je možný dokazuje následující tabulka (viz Obr. 13), kde můžeme sledovat, že výraznější pokles hodnot pevnosti nastává až u 3x recyklovaného materiálu [5] [6].

Tabulka 1 Pevnostní tabulka recyklovaného PLA [5]

PLA filament	Short-beam strength (MPa)
Virgin	119.1 ± 6.6
One time-recycled	106.8 ± 9.0
Twice recycled	108.5 ± 9.9
Three times recycled	75.0 ± 16.2

Vedle hojného využití PLA v moderním průmyslu, například při výrobě textilií a obalů, jej lze díky jeho bioaktivitě využít i lékařských aplikacích od regenerativní medicíny, tkáňového inženýrství, ortopedie, až po dentální péči, či výrobu zdravotnických pomůcek [6].

S jistotou můžeme tvrdit, že se jedná o nejčastěji používaný filament v oblasti tisku FDM/FFF a především pak v domácích podmínkách. O tuto pozici se zasloužil především díky své velmi snadné tisknutelnosti. Jinými slovy je velmi pevný a snadno se z něj tiskne, má nízkou teplotu tání, cca 175°C a může být opakovaně nahříván. Při tisku nemá tendenci se smršťovat, proto se hodí na tisk velkých výrobků. Při použití menší trysky je ovšem skvělou volbou pro tisk detailních či drobných výtisků, díky čemuž se používá pro tisk prototypů, hraček, a podobně.

Vzhledem k vysoké pevnosti je také poměrně křehký a při destrukci se štěpí na malé kousky, nízká teplota tisku je vykoupena nízkou teplotní odolností, která se projevuje již od 60°C a v kombinaci se špatnou odolností vůči UV-záření není vhodným materiálem pro použití v exteriéru. Je špatně obrobitelný a lze jej rozpustit pouze v chemikáliích jako je chloroform, nebo horký benzen [7] [8] [9]

Tabulka 2 Technický list prusament PLA od firmy PRUSA[8]

Vlastnosti / směr tisku	Horizontální	Vertikální X, osa Y	Vertikální osa Z	Metoda
Modul pružnosti v tahu [GPa]	2,2 ± 0,1	2,4 ± 0,1	2,3 ± 0,1	ISO 527-1
Napětí na mezi kluzu [MPa]	50,8 ± 2,4	59,3 ± 1,9	37,6 ± 4,0	ISO 527-1
Prodloužení na mezi kluzu [%]	2,9 ± 0,3	3,2 ± 0,1	1,9 ± 0,3	ISO 527-1
Rázová houževnatost Charpy (4) [kJ / m <sup>2</sup> ]	12,7 ± 0,7	13,7 ± 0,7	5,0 ± 1,4	ISO 179-1

Fyzikální vlastnosti	Typická hodnota	Metoda
Teplota tání [°C]	145-160	ISO 11357
Teplota skelného přechodu [°C]	55-60	ISO 11357
MFR [g / 10 min] (1)	10,4	ISO 1133
MVR [cm <sup>3</sup> /10 min] (1)	9,4	ISO 1133
Hustota [g / cm <sup>3</sup> ]	1,24	ISO 1183
Absorpce vlhkosti 24 hodin [%] (2)	0,3	Prusa Polymers
Absorpce vlhkosti 7 dní [%] (2)	0,3	Prusa Polymers
Absorpce vlhkosti 4 týdny [%] (2)	0,3	Prusa Polymers
Teplota tvarové stálosti (0,45 MPa) [°C]	55	ISO 75
Napětí na mezi kluzu pro filament [MPa]	57,4 ± 0,4	ISO 527-1

Pro tisk z PLA se doporučuje tisková podložka z PEI, či skleněná, vyhřívána na 40-60°C (není podmínkou), teplota extrudéru nastavena na 210±10°C, rychlost ventilátoru pro chlazení na 100%. Rychlost tisku se může přibližovat k hodnotám až 200 mm/s [8].

### 1.2.2 PET-G

PET-G, nebo také PETG, celým názvem polyethyltereftalátglykol, je polyester a, stejně jako většina materiálů pro FDM tisk, termoplast. Polyethyltereftalát (PET) je nejzastoupenější termoplastická polymerní pryskyřice, kterou nalezneme např. ve vláknech pro oděvy, či nádobách na kapaliny a potraviny. Pro účely 3D tisku se PET modifikuje tzv. kopolymerací, kdy je cyklický dimethanol přidán k hlavnímu řetězci polymeru namísto ethylenglykolu, což snižuje teplotu tání a brání jeho krystalizaci. Materiál je tak méně křehký, snadnější pro tisk a více průhledný [7].

PET-G se také řadí mezi nejpoužívanější filamenty pro tisk FDM. Lze jej velmi snadno tvarovat a ohýbat za tepla, je bez zápachu a má velmi nízké smršťovací vlastnosti díky čemuž je snadno tisknutelný a vhodný pro tisk velkých výrobků. Disponuje dobrou chemickou odolností, což z něj společně s dobrým spojováním vrstev dělá velice vhodný materiál tam, kde je očekávaná vodotěsnost. Je možné jej použít v interiérech i exteriérech a pro svou houževnatost a ořezuvzdornost je vhodný zejména pro tisk mechanických částí [10] [11] [12].



*Obrázek 5 Příklad použití PET-G pro výrobu dílenského svěráku [12]*

Při tisku PETG na rozdíl např. od PLA tendenci tvořit při přejezdech tenká vlákna táhnoucí se za tryskou (tzv. stringing). Tvorbě těchto strun je možné zamezit zvýšením retrakce a snížením teploty extrudéru. Požadavkem pro tisk z PETG je vyhřívaná podložka ( $80\pm 10^{\circ}\text{C}$ ) z PEI či skla, teplota extrudéru  $250\pm 10^{\circ}\text{C}$ , rychlost otáčení ventilátoru na 50% [12].



Tabulka 3 Technický list Prusament PET-G od firmy prusa [12]

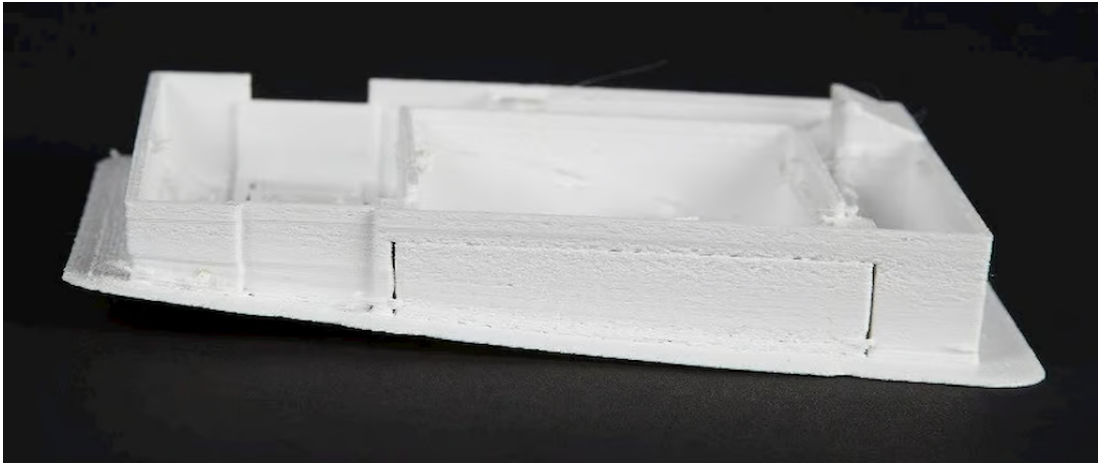
<b>Hustota [g / cm<sup>3</sup>]</b>	1,27		ISO 1183	
<b>Absorpce vlhkosti 24 hodin [%] (1)</b>	0,2		Prusa Polymers	
<b>Absorpce vlhkosti 7 dní [%] (1)</b>	0,3		Prusa Polymers	
<b>Absorpce vlhkosti 4 týdny [%] (1)</b>	0,3		Prusa Polymers	
<b>Teplota tvarové stálosti (0,45 MPa) [° C]</b>	68		ISO 75	
<b>Napětí na mezi kluzu pro filament [MPa]</b>	46 ± 1		ISO 527	
<b>Vlastnosti / směr tisku</b>	<b>Horizontální</b>	<b>Vertikální X, osa Y</b>	<b>Vertikální osa Z</b>	<b>Metoda</b>
<b>Napětí na mezi kluzu [MPa]</b>	47 ± 2	50 ± 1	30 ± 5	ISO 527-1
<b>Modul pružnosti v tahu [GPa]</b>	1,5 ± 0,1	1,5 ± 0,1	1,4 ± 0,1	ISO 527-1
<b>Prodloužení na mezi kluzu [%]</b>	5,1 ± 0,1	5,1 ± 0,1	2,5 ± 0,5	ISO 527-1
<b>Rázová houževnatost Charpy (3) [kJ / m<sup>2</sup>]</b>	NB. (C) (4)	NB. (4)	5 ± 1	ISO 179-1

### 1.2.3 ABS

Akrylonitril-butadien-styren, běžně známy jako ABS je velmi běžný materiál pro FDM tisk. Jedná se o jeden z prvních termoplastických materiálů použitých pro technologii 3D tisku. Jak už název vypovídá, skládá se ze tří monomerů a vyrábí se emulzní, nebo kontinuální polymerizací. Styren propůjčuje platu lesklý a celistvý povrch, polybutadien zase houževnatost při nízkých teplotách [13].

ABS disponuje dobrou chemickou odolností, má nízkou teplotu tání a relativně snadno se obrábí. Je snadno barvitelné, tudíž jej výrobci mohou nabízet v celé řadě barev. Mezi další výhody patří možnost ABS efektivně recyklovat, nízká tepelná a nízká elektrická vodivost [7] [14].

Tyto atributy dělají z ABS zdánlivě bezproblémový a užitný materiál, k výhodám se ovšem řadí také řada nevýhod a špatných vlastností, které nelze zanedbat. Pokud ABS není správně ošetřen, podléhá degradaci UV zářením. Výraznou nevýhodou tisknutí dílů z ABS je velká tendence materiálu se smršťovat při chladnutí, což způsobuje deformaci tiskové základny a následně celého výrobku v průběhu tisku [15].



*Obrázek 6 Nevítané smrštění ABS v průběhu tisku [15]*

#### 1.2.4 ASA

ASA (Acrylonitrile Styrene Acrylate) je termoplastický materiál, který se často používá pro 3D tisk. Jedná se o speciální typ copolymeru, který kombinuje několik výhod z různých materiálů, jako je ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene) a ASA (Acrylonitrile Styrene Acrylate). Tento materiál nabízí širokou škálu vlastností, což ho činí ideálním pro mnoho aplikací v oblasti 3D tisku [16] [17] [7].

Jednou z klíčových výhod materiálu ASA je jeho odolnost vůči UV záření. To znamená, že tištěné díly vyrobené z ASA jsou schopny odolávat degradaci a změnám barev způsobeným dlouhodobým působením slunečního záření. Tato vlastnost ho činí vhodným pro venkovní aplikace, kde jsou díly vystaveny nepříznivým povětrnostním podmínkám. ASA se často používá pro výrobu venkovních prvků, jako jsou nárazníky a zrcátka v automobilovém průmyslu, střešní tašky a fasády ve stavebnictví, zahradní náčiní a další exteriérové aplikace [16] [17].



Obrázek 7 Venkovní (UV resistantní) díly z materiálu ASA [17]

Další významnou vlastností materiálu ASA je jeho vysoká mechanická pevnost a odolnost proti nárazům. Díky těmto vlastnostem jsou tištěné díly z ASA trvanlivější a odolnější než některé jiné běžné materiály pro 3D tisk. Materiál ASA se tak často využívá v průmyslových aplikacích, kde jsou požadovány funkční a odolné součásti. V elektrotechnice a elektronice je používán pro tisk ochranných pouzder a krytů elektronických zařízení, kde je důležité zajistit ochranu proti mechanickým poškozením [16] [17].

Přesto, že materiál ASA nabízí v mnoha ohledech lepší vlastnosti než jeho samozvaný předchůdce ABS, podléhá taktéž kroucení vlivem teplotních rozdílů mezi modelem a okolím. Pro potenciálně nebezpečné výpary vznikající při tisku je rovněž důležité tisknout v dobře větrané místnosti [7] [17].

ASA nabízí široké možnosti postprocesingu. Pro dosažení požadovaného povrchu jej lze brousit za mokra i za sucha, nebo je možné vyhladit povrch výtisků acetonem, či jeho výpary. Vyhlazené výtisky mají výsledný lesklý povrch, který připomíná povrch ošetřený autolakem. Po vyhlazení je ovšem nutné počítat se ztrátou detailu a ostrých hran [17].

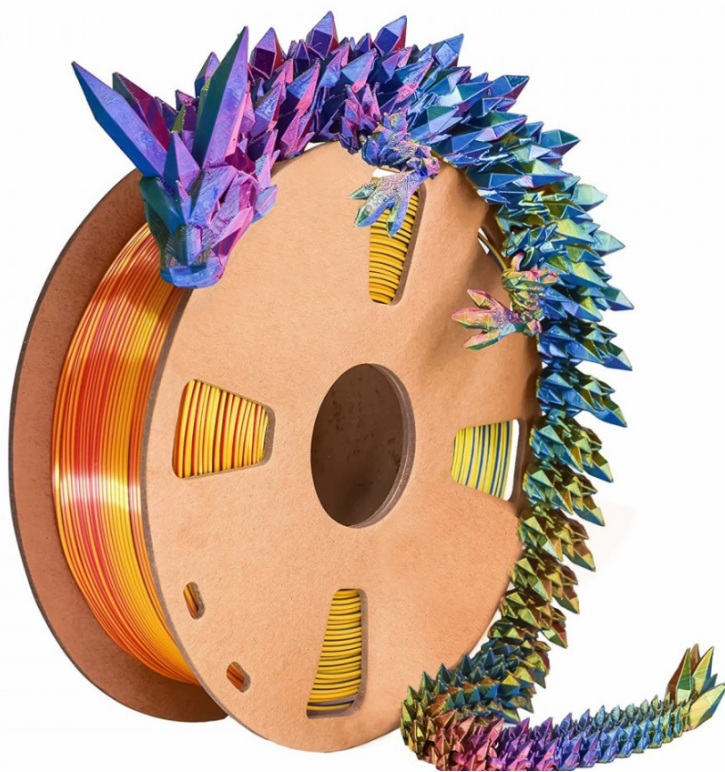


Obrázek 8- Acetonem vyhlazené výtisky ASA

### 1.2.5 SILK

Materiál SILK, je speciální typ filamentu, který je obvykle vyroben z PLA (Polylactic Acid) s přidavkem speciálních aditiv, která mu dodávají jeho charakteristický lesklý a hedvábný vzhled. Tyto atributy dávají tištěným objektům elegantní a luxusní vzhled. Tento efekt se dosahuje díky speciálnímu zpracování filamentu, které mu umožňuje reflektovat světlo a poskytovat zářivý povrch [18] [19].

Silk je dostupný v celé škále barevných variant. Díky jeho složení je po vytisknutí sytost těchto barev velmi intenzivní. Vzhledem k těmto vlastnostem se materiál SILK hodí tedy především k tisku modelů s různými barevnými odstíny a efekty. Nabízí se tedy jeho využití především pro tvorbu šperků, estetických doplňků, dekorativních předmětů či uměleckých děl [18].



Obrázek 9 Výtisk z vícebarevného materiálu SILK [20]

Další výhodou materiálu SILK je jeho relativně snadná tisknutelnost na běžných FFF/FDM 3D tiskárnách. Jeho tiskové parametry jsou podobné jako u běžných PLA filamentů, což znamená, že uživatelé nemusí provádět složité úpravy tiskových nastavení, aby dosáhli dobrých výsledků tisku. To umožňuje i méně zkušeným uživatelům 3D tiskáren snadno pracovat s materiálem SILK a vytvářet působivé tištěné díly. Je však důležité mít na paměti, že materiál SILK nemá stejnou mechanickou pevnost jako některé jiné 3D tiskové materiály, jako je například PLA nebo ABS. Jeho použití je proto vhodné spíše tam, kde je klíčová estetika a vizuální dojem, nežli v případech, kdy je vyžadována funkčnost nebo odolnost [19] [18].

### 1.2.6 Nylon (PA)

Nylon (Polyamid, PA) je syntetický polymer, který patří do skupiny polyamidů. Jeho složení se liší v závislosti na konkrétním typu Nylonu a výrobci, ale základní struktura polyamidu zahrnuje opakující se monomerní jednotky, které obsahují amidovou funkční skupinu (CONH) v řetězci. Je známý svou vysokou pevností a odolností, což ho činí ideálním pro výrobu funkčních a mechanicky náročných dílů. Díky své flexibilitě a odolnosti proti nárazům je Nylon oblíbeným materiálem pro tisk pružných dílů, jako jsou těsnění, ovládací prvky a závěsy [21] [22] [23] [7].

Nylon se vyznačuje také nízkým třením, což znamená, že tištěné díly mají sníženou tendenci se zasekávat nebo třít, což je výhodné pro pohyblivé mechanismy, ložiska apod.. Díky své vyšší teplotní odolnosti než například PLA nebo ABS je Nylon také vhodný pro aplikace, které vyžadují vyšší odolnost proti teplu, jako jsou součástky motorů nebo prostředí s vysokými teplotami [23] [22].



Obrázek 10 - ozubené kolo (Nylon PA)

Materiál Nylon má schopnost absorbovat vlhkost z okolního prostředí, což může ovlivnit kvalitu tisku a adhezi mezi vrstvami. Proto je důležité uchovávat filament Nylon v suchém a uzavřeném prostředí, aby se minimalizovalo jeho vlhkostní nasávání. Při tisku s Nylonem je vhodné použít tiskárnu s vyhřívanou podložkou, aby se minimalizovalo zkroucení a zlepšila adheze na tiskovou plochu. Tiskové teploty pro Nylon se obvykle pohybují kolem 240-260 °C a mohou se lišit v závislosti na konkrétním filamentu a tiskárně [7] [22] [23].



Obrázek 11 - Tisk ohebných dílů z materiálu Nylon PA

Nylon je všestranný materiál s vynikajícími mechanickými vlastnostmi, který nabízí široké spektrum aplikací v průmyslu, inženýrských projektech, prototypování a výrobě funkčních dílů. S ohledem na jeho specifické vlastnosti a náročnější tiskové podmínky je vhodné provádět testování a upravit tiskové parametry, aby se dosáhlo nejlepších výsledků [22] [23].



## 1.3 Materiály pro FDM obohacené plnivem

### 1.3.1 Bronzefill

Bronzefill je speciální typ filamentu pro 3D tisk, který kombinuje běžný PLA (Polylactic Acid) s malými částicemi bronzu. Díky této kombinaci získává tištěný materiál vzhled a vlastnosti bronzového kovu [24].

Složení Bronzefillu je zpravidla asi 80-85% PLA a 15-20% malých bronzových částic. Tyto částice jsou běžně vyrobeny z bronzu nebo jiných slitin s vysokým obsahem mědi a dodávají materiálu bronzový vzhled a charakteristickou patinu, kterou získává tištěný díl až po určitém čase [24].



*Obrázek 12 - Detail struktury materiálu [24]*

Bronzefill má podobné tiskové vlastnosti jako PLA a je snadno tisknutelný na většině běžných FFF/FDM 3D tiskáren. Díky obsahu kovových částic je ovšem materiál více abrazivní, je tedy vhodné použít tvrzené trysky o průměru minimálně 0,5mm. Tiskové teploty a rychlosti jsou podobné jako u standardního PLA. Při tisku je vhodné použít běžnou tiskovou podložku a dodržovat tiskové parametry doporučené výrobcem filamentu [24].

### 1.3.2 Copperfill

Copperfill je speciální filament pro 3D tisk, který je vytvořen kombinací běžného PLA (Polylactic Acid) s malými částicemi mědi. Díky tomuto složení získává tištěný materiál vzhled a charakteristické vlastnosti mědi, což mu dodává jedinečný a autentický kovový vzhled [25].

Složení Copperfillu zahrnuje přibližně 80-85% PLA a 15-20% malých částic mědi. Tyto částice jsou vyrobeny z čisté mědi nebo měděného prachu, který se smíchá s PLA při výrobě filamentu. Měď přispívá k estetice materiálu tím, že dodává tištěným objektům výraznou měděnou barvu a lesk [25].



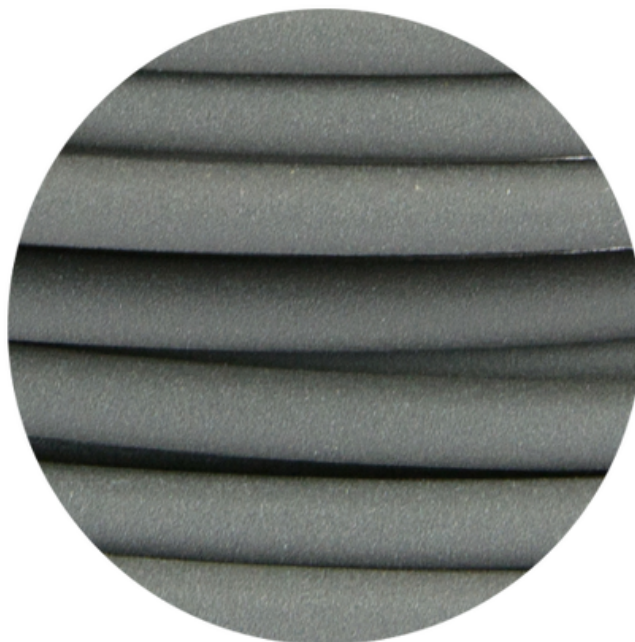
*Obrázek 13 -Detail struktury materiálu Copperfill [25]*

Copperfill má podobné tiskové vlastnosti jako PLA a je snadno tisknutelný na většině běžných FFF/FDM 3D tiskáren. Díky obsahu kovových částic je ovšem materiál více abrazivní, je tedy vhodné použít tvrzené trysky o průměru minimálně 0,5mm. Teploty tisku a rychlosti jsou obdobné jako u standardního PLA. [25].

### 1.3.3 Steelfill

Materiál STEELFILL je další z řady vyztužených kompozitních materiálů. Jak už název naznačuje, tento filament má za cíl napodobit vzhled a vlastnosti oceli, a to díky obsahu mikrovláken z nerezové oceli [26].

Složení STEELFILLu zahrnuje běžné PLA (Polylactic Acid) s přidavkem mikrovláken z nerezové oceli v poměru přibližně 80-85% PLA a 15-20% kovových částic. Ta jsou jemně rozemleta a smíchána s PLA při výrobě filamentu. Díky těmto mikrovláknům získává tištěný materiál vzhled a povrchovou strukturu, která připomíná ocel. Tato kombinace poskytuje tištěným dílům z STEELFILLu autentický a rustikální vzhled kovu [26].



*Obrázek 14- Detail struktury materiálu Steelfill [26]*

Při tisku s STEELFILlem je důležité používat trysky s větším průměrem a vyšší teploty tisku, než je běžné u standardního PLA, aby se zajišťovala dobrá adheze mezi vrstvami a přilnutí k tiskové podložce. Taktéž se nabízí použití tvrzené trysky vzhledem k vyšší abrazivnosti materiálu [26].

#### 1.3.4 XT-CF20

XT-CF20 je další z řady speciálních filamentů pro 3D tisk, který patří do kategorie vyztužených kompozitních materiálů. Je vyroben kombinací běžného PLA (Polylactic Acid) s přídavkem 20% mikrovláken uhlíkových vláken (CF) [27].

Složení XT-CF20 tedy zahrnuje přibližně 80% PLA a 20% mikrovláken uhlíkových vláken. Uhlíková vlákna jsou známá svou vysokou pevností a tuhostí, jejich přidání do PLA tedy slibuje vyšší mechanickou odolnost a pevnost materiálu. Od materiálu XT-CF20 lze tedy očekávat dobrou mechanickou stabilitu a odolnost proti tření [27].



*Obrázek 15 - Detail struktury materiálu XT-CF20 [27]*

Při tisku s XT-CF20 je důležité mít na paměti, že uhlíková vlákna mohou způsobit větší opotřebení trysky tiskárny, proto je doporučeno použití tvrzených trysek a pravidelně provádět údržbu a kontrolu tiskového zařízení. Teploty tisku a rychlosti jsou obdobné jako u běžného PLA, ale je vhodné provést testování a upravit tiskové parametry pro dosažení optimálních výsledků [27].

### 1.3.5 WoodJet

WOODJet zahrnuje běžné PLA (Polylactic Acid) s přidavkem jemně rozemletých dřevěných vláken. Tato dřevěná vlákna mohou pocházet ze skutečného dřeva nebo z recyklovaného dřevěného prachu, cukrovarských řízků, či natí z rajčat které jsou smíchány s PLA během výroby filamentu [28] [29].

Díky těmto dřevěným vláknům získává tištěný materiál autentický vzhled a texturu dřeva, která připomíná povrch dřevěných součástek. Lze tedy předpokládat vhodnost WOODJetu pro tvorbu dekorativních prvků. Zajímavostí je velmi autentická vůně dřeva, kterou materiál při tisku produkuje [28] [29].



*Obrázek 16 - Viditelné částice plniva v materiálu WOODJet [29]*

Při tisku s WOODJetem je doporučeno používat trysky s větším průměrem a upravit tiskové parametry pro dosažení nejlepších výsledků. Teploty tisku jsou obvykle lehce nižší než u běžného PLA, ale pro lepší adhezi mezi vrstvami a přilnutí k tiskové podložce mohou být použity teploty shodné, či vyšší [29].

### 1.3.6 Nylon AF80 Aramid

Nylon AF80 Aramid je speciální materiál pro 3D tisk, který kombinuje nylon (Polyamid) s vlákny aramidu. Název "Aramid" pochází z aramidových vláken, která se často používají v ochranných materiálech, jako jsou balistické vesty a oděvy pro hasiče nebo vojáky. To dává napovědět, že tento materiál zachová dobrou mechanickou stabilitu, vysokou pevnost a odolnost proti nárazům a opotřebení třením [30].

Složení Nylonu AF80 Aramid zahrnuje zhruba 80% nylonu (Polyamid) a 20% vláken aramidu. Nylon, známý svou vysokou pevností a flexibilitou, tvoří většinu složení. Vlákna aramidu, jako například Kevlar nebo Nomex, jsou pečlivě přidávána do nylonového materiálu. Tato vlákna jsou vyrobená z chemických prekurzorů, které procházejí speciálním procesem polymerace [30] [31].



Obrázek 17 - Příklad výtisku materiálu Nylon AF80 Aramid [30]

Výroba Nylonu AF80 Aramid je náročná, neboť je nutné dosáhnout rovnoměrné distribuce aramidových vláken v nylonovém základu. Směs obou materiálů musí být pečlivě promíchána a extrudována do vláken s přesným průměrem. Tento proces je klíčový pro dosažení homogenní struktury a kvality filamentu [30] [31].

Při tisku Nylonu AF80 Aramid je důležité dodržovat specifické tiskové parametry. Doporučená tisková teplota se obvykle pohybuje v rozmezí 250-270 °C. Je vhodné používat vyhřívanou tiskovou podložku s doporučenou teplotou 80-100 °C pro lepší adhezi mezi dílem a podložkou. Dále je doporučeno snížit intenzitu chladicích větráků, aby se minimalizovalo chlazení tisknutého materiálu a zabránilo praskání a deformacím. Také je vhodné tiskovou rychlost snížit, aby se minimalizovalo riziko tiskových problémů [30] [31].



### 1.3.7 Corkfill

Corkfill je další netipický materiál pro 3D tisk, který byl vyvinut s cílem napodobit vzhled a texturu přírodního korku. Díky přidaným korkovým částicím má filament sníženou hmotnost, což umožňuje tisk lehčích a ekologičtějších objektů. Korková struktura také přispívá k absorpci zvuku [32].

Složení Corkfillu zahrnuje přibližně 70-80% PLA a 20-30% jemných částic korku. Korkové částice jsou získávány z kůry dubovníku korkového, která se následně jemně rozemelou a smíchají s PLA při výrobě filamentu. Výrobní proces Corkfillu je náročný na dosažení rovnoměrné distribuce korkových částic v PLA. Směs obou materiálů musí být pečlivě promíchána a extrudována do vláken s přesným průměrem. Tento proces je klíčový pro dosažení homogenní struktury a kvality filamentu. [32] [33].



*Obrázek 18 Detail struktury materiálu Corkfill [32]*

Doporučená tisková teplota pro extruzi Corkfillu se obvykle pohybuje v rozmezí 200-220 °C. Avšak různé 3D tiskárny mohou vyžadovat jiné nastavení teplot, a proto je doporučeno provést testování a naladění pro konkrétní model tiskárny. Doporučená teplota podložky pro tisk Corkfillu se obvykle pohybuje v rozmezí 50-70 °C. V neposlední řadě je doporučeno snížit rychlost tisku a snížit otáčky vetráku na nižší hodnotu než u běžných materiálů, jako je PLA. Pomalá rychlost tisku a ochlazování pomůže minimalizovat riziko tiskových problémů, jako jsou přetrhnutí vláken nebo delaminace [32] [33].

### 1.3.8 Woodfill

Woodfill je speciální filament, který byl vyvinut s cílem imitovat vzhled a strukturu dřeva. Tento materiál patří mezi vyztužené kompozitní filamenty a kombinuje běžné PLA (Polylactic Acid) s jemně rozemletými dřevěnými vlákny, která pocházejí ze skutečného dřeva [34].

Složení Woodfillu zahrnuje zhruba 70-80% PLA a 20-30% dřevěných vláken. Dřevěná vlákna se získávají z různých druhů dřeva, jako je jedle, borovice nebo buk, a jsou jemně rozemletá do malých částic. Výrobní proces vyžaduje pečlivé promíchání dřevěných vláken s PLA, aby byla zajištěna rovnoměrná distribuce dřevěných částic v plastové hmotě [34] [35].



*Obrázek 19 Detail struktury materiálu Woodfill [34]*

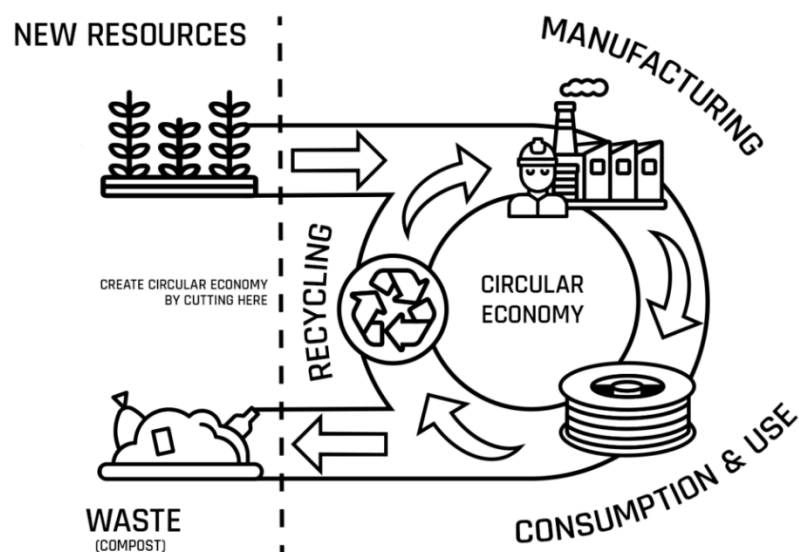
Díky jednoduché tisknutelnosti PLA s dřevěnými vlákny disponuje Woodfill výbornou kompatibilitou s většinou 3D tiskáren. Doporučená tisková teplota pro extruzi Woodfillu se obvykle pohybuje v rozmezí 190-220 °C. Teplota podložky pro tisk se obvykle pohybuje v rozmezí 50-70 °C. Dále je vhodné snížit rychlost tisku a intenzitu chladicích větráků nebo je dokonce vypnout. Doporučením je také použití většího průměru trysky, ideálně 0,5mm nebo většími. Dřevěná vlákna ve Woodfillu mohou být trochu větší než u běžných filamentů, a použití větší trysky pomůže zajistit, že tyto vlákna nepřekážejí v trysce a nezpůsobují ucpání nebo jiné problémy během tisku [34] [35].

## 1.4 Speciální materiály pro FDM

### 1.4.1 NonOilen

NonOilen je biodegradabilní materiál pro 3D tisk, který je vyroben z obnovitelných zdrojů, což ho činí ekologicky šetrnou alternativou k tradičním olejovým plastům. Jeho složení zahrnuje polymer založený na rostlinných zdrojích, jako je kukuřičný škrob, bramborový škrob, nebo jiné biologicky rozložitelné polymery. Tyto suroviny jsou chemicky zpracovány a polymerizovány, aby vytvořily biodegradabilní polymer, který je následně použit pro výrobu [36] [37].

Fakt, že pro výrobu nejsou používány tradiční ropné suroviny jako je tomu u plastových polymerů, přispívá ke snížení závislosti na neobnovitelných zdrojích a minimalizuje jeho negativní dopady na životní prostředí. NonOilen je také možné recyklovat se zachováním téměř 100% vlastností původního materiálu [36].



Obrázek 20 - Životní cyklus materiálu NonOilen [36]

Při tisku je možné použít podobné nastavení jako u běžně tisknutých polymerů. Tiskovou teplotu je vhodné zvolit v rozmezí 180-220 °C, vyhřívanou tiskovou podložku s teplotou 40-60 °C a snížit intenzitu chladicích větráků [36].

### 1.4.2 PMMA

PMMA (Polymethylmethakrylát), známý také pod názvem akrylát nebo plexisklo, je populární termoplastický materiál používaný nejen pro 3D tisk. Jedná se o transparentní, tvrdý a pevný materiál s vynikajícími optickými vlastnostmi [38].

Složení PMMA zahrnuje polymer, který je vyroben z methylnmethakrylátu, monomeru, který prochází polymerizační reakcí. Polymerizační proces začíná, když se monomery spojí v dlouhé řetězce a tvoří plastický materiál, který je následně zpracován do formy vláken nebo granulí, které se používají jako surovina pro 3D tisk. PMMA je známý pro svou vysokou odolnost vůči UV záření, což z něj činí ideální volbu pro venkovní aplikace. Je také odolný proti řadě chemikálií a má vynikající elektrické izolační vlastnosti [38] [39].

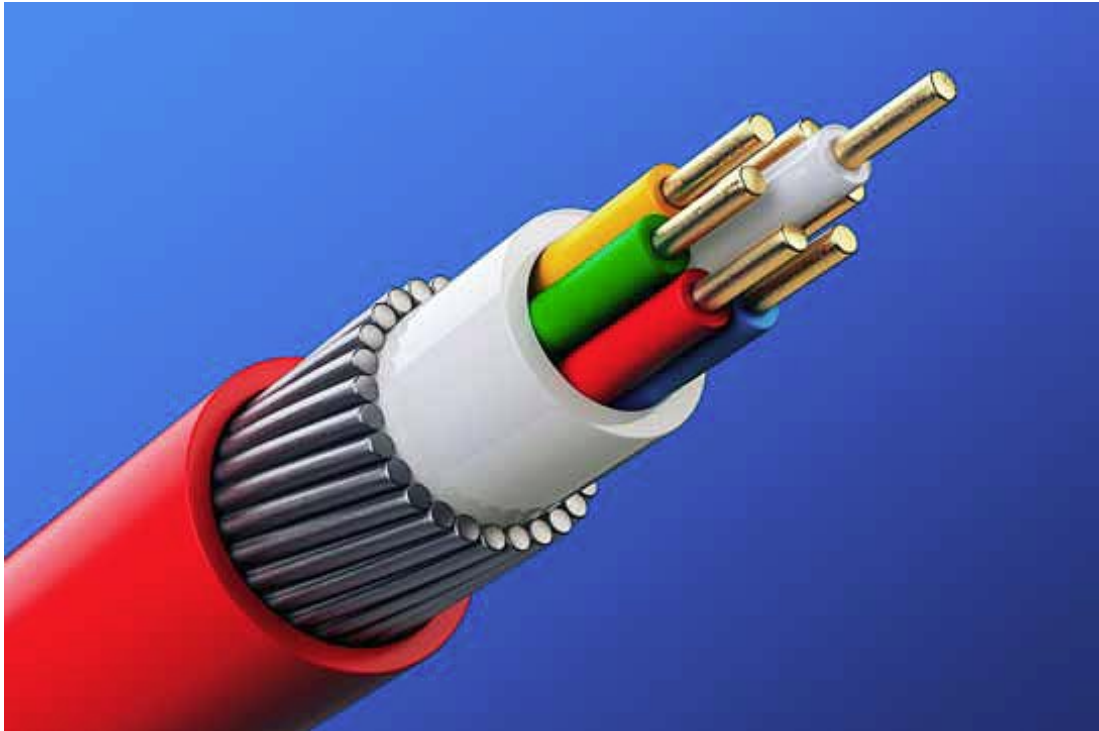


Obrázek 21 - Příklad tisku z materiálu PMMA [40]

Pro tisk materiálu PMMA (Polymethylmethakrylát) je doporučeno použít tiskovou teplotu v rozmezí 230-260 °C a vyhřívanou tiskovou podložku s teplotou 70-100 °C. Je důležité kontrolovat kapku chladu a snížit intenzitu chladicích větráků, aby se minimalizovalo rychlé ochlazování tisknutého materiálu. Pomalá rychlost tisku pomůže dosáhnout hladších a přesnějších tiskových výsledků. Faktem ovšem zůstává, že PMMA patří mezi obtížněji tisknutelné materiály. S tiskovými parametry je tedy potřeba experimentovat pro dosažení optimálních a kvalitních výsledků [39].

### 1.4.3 FLEXfill 98A

Tento materiál patří do skupiny termoplastických polyuretanů (TPU), což je polymerní materiál, který kombinuje vlastnosti plastů a elastomerů. TPU je vyroben z reakce diisocyanátu s polyolovým prekurzorem. Tato chemická reakce vytváří polymerní řetězce, které dodávají TPU jeho pružnost a elastické vlastnosti [41].



Obrázek 22 Příklad běžného použití TPU jako izolace elektrických kabelů [41]

Výrobní proces Flexfill TPU 98A zahrnuje smíchání a extruzi termoplastického polyuretanu do podoby vláken nebo granulí. Výroba tohoto materiálu vyžaduje přesnou kontrolu teplot a tlaku, aby bylo dosaženo správné konzistence a vlastností. Výsledný produkt je flexibilní filament nebo granule, které jsou následně používány v 3D tiskárnách [42] [43] [41].

Pro tisk materiálu FLEXfill 98A je doporučeno používat tiskovou teplotu v rozmezí 220-240 °C, vyhřívanou tiskovou podložku s teplotou 50-60 °C a snížit intenzitu chladicích větráků. A zpomalit rychlost tisku. Je také vhodné použití trysky s průměrem 0,4 mm nebo větším [43] [42].



#### 1.4.4 MoldLay

Materiál MoldLay je speciální termoplastický polymer vyrobený z kombinace polymerů s termoplastickými vlastnostmi a materiálů, které jsou citlivé na teplotu. Při pokojové teplotě je velmi tuhý, ale při zahřátí na 170-180 °C se stává extrudovatelným. Má téměř nulovou deformaci a nepotřebuje vyhřívanou podložku [44].

Teplota tavení tohoto materiálu je 270 °C. po dosažení této teploty materiál zkapalní podobně jako horký parafínový vosk. Za pokojové teploty je materiál relativně tuhý a pevný. Jeho povrch je mastného voskového charakteru [44] [45].

Pro tisk je ideální rozsah teplot 170 – 180 °C. Lze tisknout bez vyhřívané podložky, ovšem vzhledem k problémům s adhezí první vrstvy je doporučeno podložku předeheat na cca 30 – 40 °C. Další tiskové parametry jsou velmi podobné jako parametry např. běžného PLA [45].

#### 1.4.5 EP

E.P. je speciální filament určený pro 3D tisk, který se vyznačuje vysokou odolností a pevností. Tento materiál patří do skupiny technických filamentů, které jsou navrženy pro náročné aplikace a využití v průmyslu [46] [47].

Složení E.P. kombinuje polymery s vlastnostmi odolnými proti otěru, nárazům a těžkým zátěžím. Jedná se o směs kvalitního technického plastu, který má dobré mechanické vlastnosti a schopnost odolávat extrémním podmínkám. Tyto atributy materiálu E.P. slibují vysoce pevné a stabilní tisky s minimální deformací [46] [47].



*Obrázek 23 - Příklad výtisku z materiálu E.P. [46]*

Genetika materiálu je velice podobná běžnému PLA, liší se především větší tvrdostí. Jeho tisk je tedy velmi jednoduchý a tiskové parametry téměř totožné s PLA [47].

## 2 Praktická část

Tato kapitola práce navazuje na Kapitoly 1.4 a 1.5, kde jsou popsány nové materiály pro tisk technologií FDM/FFF, které jsou využívány ve velmi malé míře v porovnání s konvenčními materiály, jejichž příklady jsou uvedeny v kapitole 1.2.

Pro analýzu mechanických vlastností vybraných materiálů bude provedena zkouška nosnosti dle vlastního návrhu. Možnosti postprocesingu vybraných materiálů budou ověřeny postupným broušením jednotlivých vzorků a následnou analýzou průběhu a výsledku tohoto broušení.

Zkoumané vzorky z kapitoly 1.4 a 1.5 byly vytištěny na tiskárně Original Prusa i3 MK3S výrobce PRUSA RESEARCH. U všech vzorků byl použit filament o průměru 1.75mm, tištěný na vyhřívanou podložku z materiálu PEI (polyetherimid). Pro dosažení co nejvíce vypovídajících výsledků byla pro každý vzorek použita tisková tryska o průměru 0.6mm a nastaveny tiskové parametry předem definované jednotlivými výrobci filamentů. Jako tvar výplně byl zvolen gyroid o hustotě 10%.

## 2.1 Test mechanických vlastností

### 2.1.1 Princip zkoušky

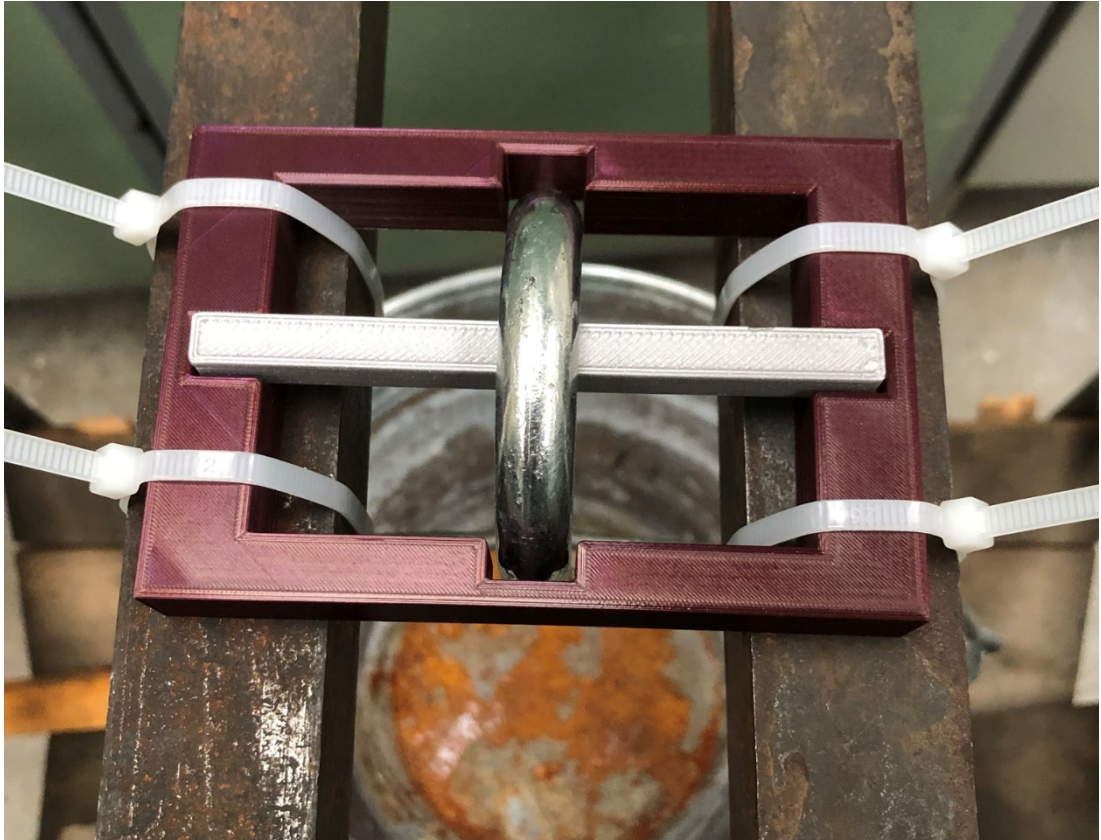
Pro účely této práce byla navržena zkouška nosnosti. Zkouška je založena na postupném zatížení zkušební tělesa až do jeho selhání. Zkušební těleso je ustavené v rámečku, který usměrňuje zatížení do jeho středu. Ustavovací rámeček je připevněn ke kovové konstrukci, která slouží jako nosný prvek pro celou zkoušku. Na zkušební těleso ustavené v rámečku je nejprve zavěšeno základní závaží o hmotnosti 9.065 kg včetně závěsné karabiny a lana. Další závaží je postupně přidáváno ve formě pytlů s pískem o hmotnosti 1 kg. Po selhání zkušební tělesa je zaznamenána hmotnost závaží, při které došlo k destrukci a průběh selhání samotného.

Jako etalon, pro porovnání naměřených hodnot, byl zvolen vzorek z běžného materiálu PLA

Zkouška byla prováděna v Ústavu strojírenské technologie na fakultě strojní ČVUT



Obrázek 24 Fotografie nosné konstrukce pro zkoušku nosnosti



*Obrázek 25 Fotografie ustavovacího rámečku pro testovací tělíska*

### 2.1.2 Volba zkušebních těles

Jako zkušební tělíčko byl navržen hranol o rozměru 8x8x100 mm. Tělíska ze všech zkoumaných materiálů byla vytisknuta s totožnou orientací tisknutých vrstev. Pro zachování totožných podmínek pro každý materiál byly tělíska do ustavovacího rámečku vždy ukládána stejnou orientací, jako při samotném tisku. Tedy plocha tělíska, která byla při tisku v kontaktu s tiskovou podložkou, byla při zkoušce orientována ve směru působení zatěžující síly.

Pro zkoušku bylo vyhotoveno třináct vzorků, po jednom kusu z každého testovaného materiálu



Obrázek 26 Fotografie zkušebních vzorků některých z testovaných materiálů

### 2.1.3 Naměřené hodnoty

Tabulka 4 Výsledky zkoušky nosnosti materiálů

MATERIÁL	Přidaná zátěž [kg]	NOSNOST [kg]	Poznámky
Etalon PLA	15	24,065	Křehký lom, téměř bez pružení
	-	-	
WOODFILL	7	16,065	Houževnatý lom
STEEFILL	3	12,065	Houževnatý pomalý lom
CORKFILL	8	17,065	Houževnatý lom
WOODJet	6	15,065	Houževnatý lom
Nylon AF80 Aramid	7	16,065	Lom velmi pomalý, vzorek zůstal spojen
BRONZFILL	5	14,065	Houževnatý lom
COPPERFILL	3	12,065	Houževnatý pomalý lom
XT-CF20	12	21,065	Lom postupný, táhlý
	-	-	
MODLAY	3	12,065	Velmi pomalý lom, materiál se tzv. táhne
E.P	10	19,065	Křehký lom, téměř bez pružení
NonOilten	5	14,065	Práskl pomalu
FELXfill 98A	2	11,065	Nelze zlomit, extrémní pružnost
PMMA	6	15,065	Křehký lom

## 2.2 Test povrchových vlastností

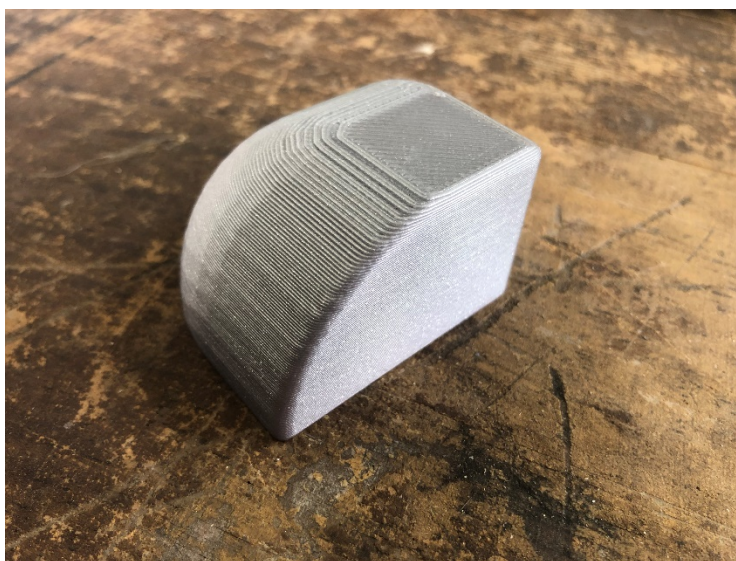
### 2.2.1 Princip zkoušky

Broušení jednotlivých vzorků bude prováděno ručně, za použití měkčené brusné kostky a brusného papíru. Postupně budou použity brusné papíry o hrubosti 100, 280, 400, 600 a 1000. Postupové broušení začne od papíru s největší hrubostí, tedy 100 a poté 280. Tyto dva stupně budou prováděny na suchém povrchu, bez přidání vody či jiného činidla. Další tři stupně broušení, za použití brusných papírů o hrubosti 400, 600 a 1000 budou prováděny s přidáním vody, která napomáhá rovnoměrnému vyhlazení povrchu vzorku pro následnou vizuální analýzu.

Zkouška byla prováděna v Ústavu strojírenské technologie na fakultě strojní ČVUT

### 2.2.2 Volba zkušebních těles

Pro tuto zkoušku jsem navrhl testovací tělísko ve tvaru kvádrů se zaoblenou hranou o rozměrech 50x50x30 mm. Tento tvar poskytne možnost vyhodnotit broušení jak rovinných ploch, tak ploch zaoblených. Zároveň je tento tvar možné pohodlně uchopit, či připevnit do svěraku pro dosažení optimálních výsledků.



Obrázek 27 Zkušební tělísko pro test povrchových vlastností z materiálu PLA

## 2.3 Zhodnocení výsledků a analýza

Na základě strukturní podobnosti, a podobnosti výsledků zkoušek byly otestované materiály rozděleny do několika následujících skupin.



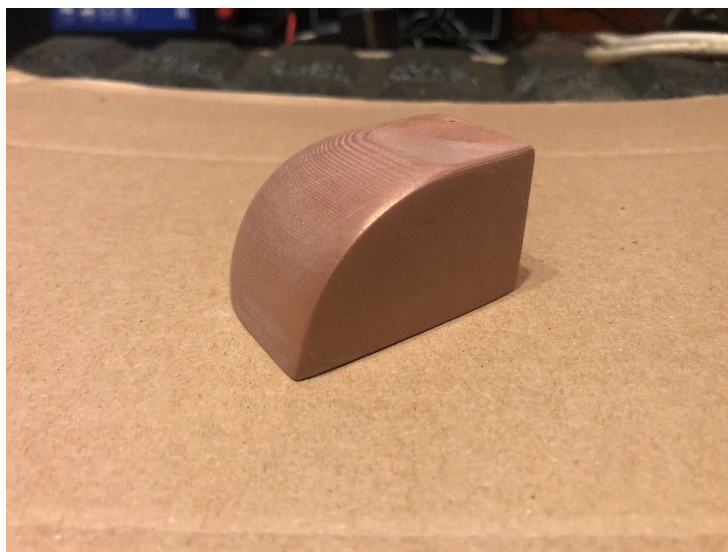
### 2.3.1.1 BRONZEFILL, COPPERFILL, STEELFILL

Skupina vzorků tvořená materiály obohacenými plnivem z kovových částic, vykázala při zkoušce mechanických vlastností ve všech případech nosnost téměř o polovinu nižší než samotné PLA, které tvoří základní matrici těchto materiálů. Toto zjištění přisuzují obsahu samotných částic kovu v materiálu PLA. Ty patrně narušují zcela homogenní strukturu základního plastu, který je pak náchylný k porušení. Lom materiálu byl ovšem vždy velmi pozvolný, což poukazuje na fakt, že kovové plnivo v základní matrici PLA tvoří výsledný materiál se znatelně nižší tvrdostí a vyšší houževnatostí.

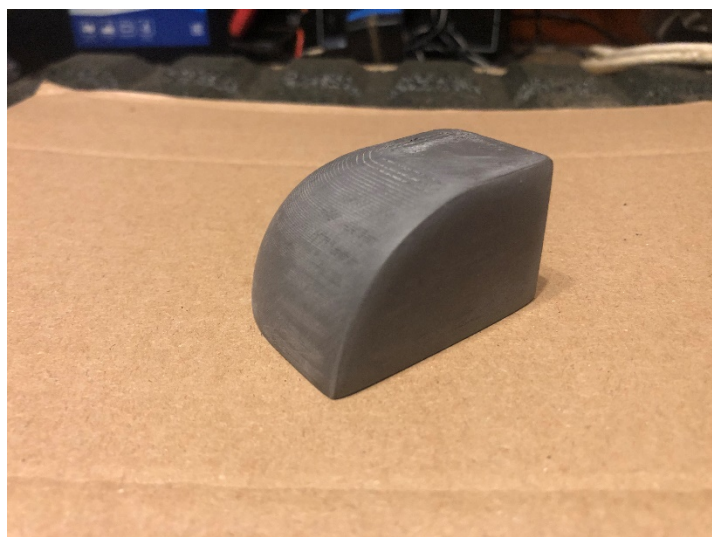
Povrchové vlastnosti materiálů jsou velmi dobré. Přes nutnost tisknout s tryskou velkého průměru je i surový výtisk pohledově velmi atraktivní. Následným broušením je možné dosáhnout struktury povrchu, která zcela zakrývá stopy jednotlivých vrstev vytvořených při tisku. Na zbroušeném povrchu vyniknou svým lesklým odrazem ve světle i samotné kovové částice.



Obrázek 28 Výsledek broušení BRONZEFILL



*Obrázek 29 Výsledek broušení COPPERFILL*



*Obrázek 30 Výsledek broušení STEELFILL*

Hmotnost vytištěných modelů je téměř trojnásobná v porovnání s PLA. V případě materiálu STEELFILL bylo zjištěno, že výtisk je feromagnetický.

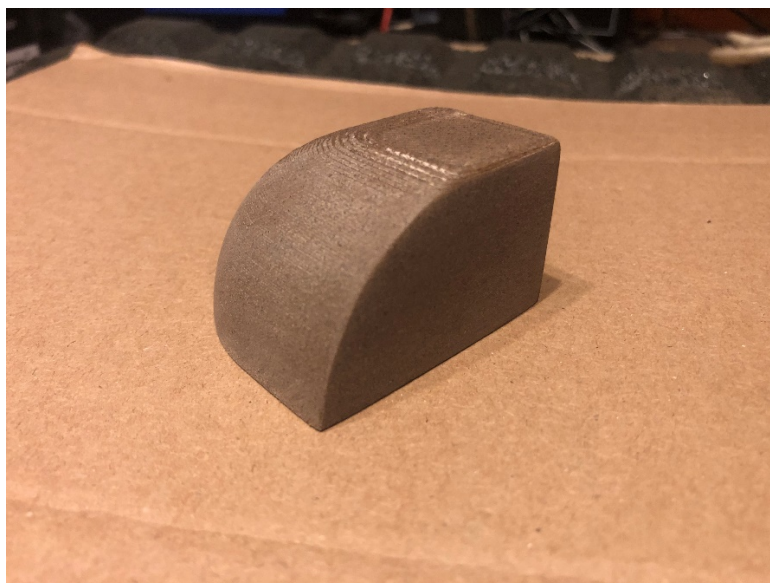
### 2.3.1.2 CROKFILL, WOODFILL, WOODJET

Skupina materiálů obohacená plnivem dřeva a korku vykázala sice nižší nosnost než etalon PLA, ovšem ve všech případech materiál unesl překvapivě větší zátěž než u předchozí skupiny kovem obohacených materiálů. Průběh selhání testovacích tělísek byl u všech tří materiálů téměř totožný, vykazující taktéž větší pružnost a houževnatost než PLA samotné

Povrchové vlastnosti materiálů jsou opět na velmi dobré úrovni. Jejich broušení je možné a je poměrně snadno proveditelné. Lepších výsledků bylo možné dosáhnout u materiálů WOODJet a WOODFILL, kde díky broušení více vynikla již tak výrazná dřevěná struktura. Ve všech případech se broušením dosáhlo matného povrchu a zahlazení stop po 3D tisku.



Obrázek 31 Výsledek broušení materiálu WOODFILL



*Obrázek 33 Výsledek broušení materiálu WOODJet*



*Obrázek 32 Výsledek broušení materiálu CORKFILL*

### 2.3.1.3 XT-CF20, Nylon AF80 Aramid

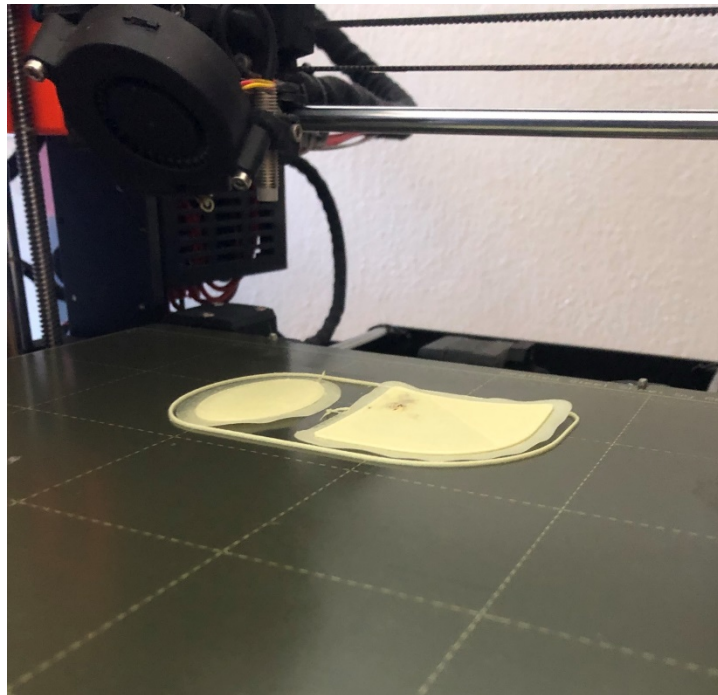
Další vybraná skupina materiálů jsou kompozity s přidanými vlákny, a to konkrétně vlákna aramidu v materiálu Nylon a kevlaru v matrici PLA. Nosnost materiálů byla překvapivě malá, kdy ani jeden z vybraných nezvládl větší zátěž než etalon PLA, byť konkrétně u materiálu XT-CF20 jsem vyšší nosnost očekával. Společný jim byl ovšem průběh selhání, kdy oba materiály praskly v postupném, táhlém lomu. Testované tělíčko, na rozdíl od zbytku testovaných materiálů, zůstalo díky obsaženým vláknům v jednom kuse.

Společně problematické bylo těmto materiálům zkoumání povrchových vlastností. V případě XT-CF20 šlo broušení povrchu jen velmi obtížně. Povrch materiálu se pod účinky brusiva neustále třepí, a vyhladit tak strukturu je téměř nemožné.



Obrázek 34 Výsledek broušení materiálu XT-CF20

Pro materiál Nylon AF80 -Aramid se díky komplikacím při samotném tisku nepodařilo ve vytvořených podmínkách testovací tělísko vytisknout. Ani při pokusech o změnu tiskového nastavení se nepodařilo zabránit výraznému smrštění Nylonové matrice v průběhu tisku již prvních vrstev. Na základě smrštění došlo při každém pokusu o tisk ke ztrátě adheze první vrstvy materiálu s tiskovou podložkou.



*Obrázek 35 Smrštění materiálu Nylon AF80 Aramid při pokusu o tisk*

#### 2.3.1.4 NonOilen, PMMA

Nosnost těchto materiálů se nevyjímala očekávání. Rozdíl bylo možné pozorovat ve způsobu selhání, kdy lom materiálu NonOilen probíhal velmi pozvolna, naproti tomu PMMA prasklo velmi náhle křehkým lomem doplněným o nepatrné úlomky střeptů.

Struktura povrchu po tisku byla velmi čistá a bez rozměrových nepřesností. Jejich broušení ovšem nenabídlo zlepšení výsledku. Materiál NonOilen je pro broušení velmi měkký. Snaha o vyhlazení struktury tedy nepřináší tížený výsledek, jelikož kvalita povrchu po zásahu byť i jemnozrnným brusným papírem není nikterak vysoká. U tvrdého materiálu PMMA je sice broušení o poznání jednodušší, ovšem vzhledem ke skutečnosti, že se jedná o materiál transparentní, se po zásahu brusným papírem vytratí průhlednost a skleněný vzhled.



Obrázek 36 Výsledek broušení materiálu NonOilen



*Obrázek 37 Výsledek broušení materiálu PMMA*

Pro oba tyto materiály platí, že strukturu zanechanou 3D tiskem nelze zcela zamaskovat jejím vybroušením, jelikož tenká vrstva materiálu je vždy lehce průsvitná, a tím pádem odhalí vytištěnou vrstvu pod ní.



### 2.3.1.5 FLEXfill 98A, MoldLay

Pro tuto skupinu materiálů bylo při zkoušce mechanických vlastností zjištěno, že jejich nosnost téměř nelze přesně změřit ve stanovených podmínkách. Jsou totiž natolik pružné, že po zatížení zkušebního tělesa, byť jen základním zatížením, se pouze výrazně prohnu, případně vyklouznou z ustavené pozice. V případě materiálu MoldLay sice došlo k porušení testovacího tělíska, lom probíhal ovšem velice pomalu. U materiálu FLEXfill 98A se nepodařilo strukturu zkušebního tělesa porušit.

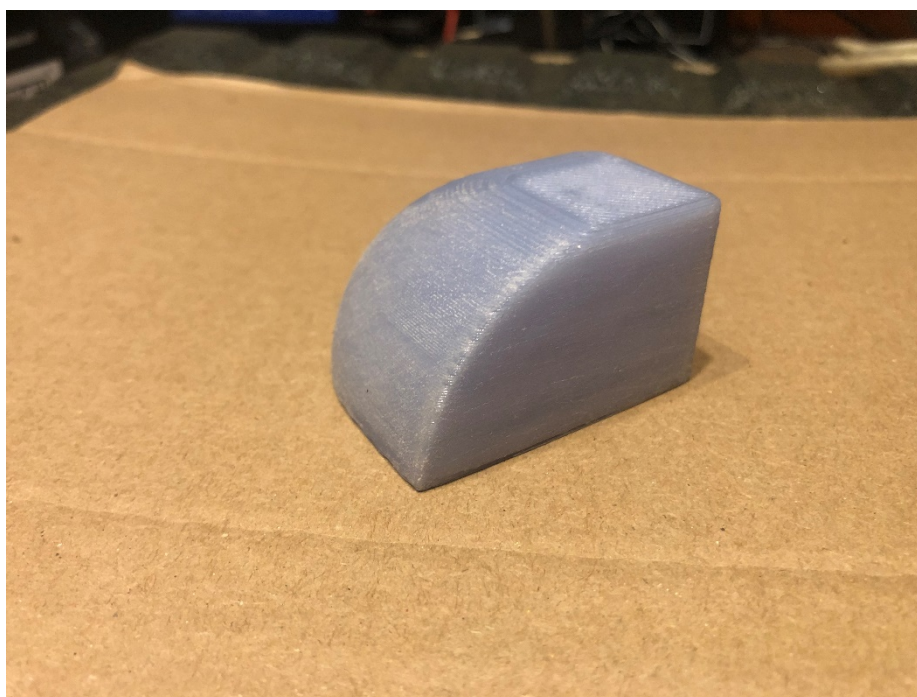


Obrázek 38 materiál FLEXFill 98A při zatížení

Pokus o zbrúsení materiálu FLEXFill 98A byl neúspěšný, povrch je příliš měkký na to, aby bylo možné materiál při broušení ubírat. V případě materiálu MoldLay je tomu podobně. Brusný papír povrch výtisku zahřeje, a vzhledem k vlastnostem toho voskového filamentu je poté povrch příliš měkký a tažný na to, abych bylo možné docílit výsledku.



*Obrázek 40 Výsledek broušení materiálu FLEXFil 98A*



*Obrázek 39 Výsledek broušení materiálu MoldLay*

Pro vyhlazení povrchu materiálu MoldLay je vhodnější použít například fén, či nahřívací pistolí. Vzniklé teplo při jeho dostatečně opatrném usměrnění nataví povrch vytištěného modelu, ten se poté zacelí do hladké vrstvy podobně, jako při naleptávání povrchu acetonem v případě materiálu ASA.



*Obrázek 41 Příklad vyhlazení povrchu nahřívací pistolí materiálu MoldLay*

### 2.3.1.6 E.P

Nosnost materiálu E.P. byla naměřena, stejně jako u všech ostatních vzorků, nižší než porovnávaný etalon PLA. Ze všech ostatních vzorků ho ale překonal pouze materiál XT-CF20. Téměř totožný byl ale způsob selhání zkušebního tělíska. Materiál téměř nepružil a o překročení meze nosnosti praskl velmi náhle. Tento průběh bylo možné očekávat vzhledem k vyšší tvrdosti materiálu E.P. v porovnání právě s PLA.

Vysoká tvrdost se odrazila i na testování povrchových vlastností broušením. Už po samotném tisku byl povrch materiálu velice kvalitní. Broušení všemi stupni hrubosti šlo až nad očekávání dobře a výsledně dosažený povrch byl, z hlediska zahlazení stop po tisku, ze všech zkoumaných materiálů dalece nejkvalitnější. Při použití jemnějšího korku při broušení a následném doleštění leštící pastou by bylo možné dosáhnout téměř zrcadlového povrchu.



Obrázek 42 Výsledek broušení materiálu E.P.

## Závěr

V teoretické části práce byla popsána technologie 3D tisku plastových materiálů ve formě filamentu, známá jako technologie FDM/FFF. Konkrétně byl popsán princip technologie, použité zařízení a jejich jednotlivé části, jako nejrozšířenější způsob aditivní výroby z plastových materiálů. Byly uvedeny a podrobně popsány základní materiály, které se pro tuto technologii nejběžněji používají. Byly popsány jejich vlastnosti, a požadavky nutné k jejich úspěšnému použití.

Poslední kapitoly teoretické části byly zaměřeny na základní popis speciálních materiálů pro 3Dtisk technologií FDM/FFF, zkoumaných v předmětu této práce. Bylo uvedeno jejich základní složení, struktura a doporučené podmínky pro úspěšné použití uvedené jednotlivými výrobci těchto materiálů. Byly popsány materiály, jejichž základní matrice je obohacena plnivem, které má za cíl zlepšit jejich vlastnosti v určitých směrech. Dále byly popsány speciální materiály se specifickými vlastnostmi a složením.

Praktická část této práce se ve své první části zabývá zkoumáním mechanických vlastností těchto materiálů. Druhá část je zaměřena na zkoumání možností postprocesingu těchto materiálů.

U materiálů plněných kovovými částicemi byla zjištěna příliš malá mechanická odolnost pro jejich využití pro funkční a průmyslové aplikace. Dobré výsledky kvality povrchu a možnosti postprocesingu tedy předurčují materiály pro tvorbu esteticky přitažlivých dílů, uměleckých prvků, či jiných dekorativních aplikací. Vzhledem k jejich vysoké hustotě a hmotnosti bude možné využít materiály plněné kovovými částicemi pro tvorbu specifických těžítek, závaží a jiných druhů břemen. Materiály obohacené plnivem dřeva a korku prokázali dobré výsledky kvality povrchu před i po aplikaci postprocesingu. Pro jejich autentický a přírodní vzhled se nabízí jejich využití pro výrobu unikátních dílů s přírodním dojmem. Díky nízké hustotě a obsahu dřeva či korku je možné využít tyto materiály pro výrobu dílů sloužících k izolaci hluku, rukojetí či jiných ergonomických úchytů. Materiál NonOilen neprokázal v žádném směru

výzkumu této práce výhody pro jeho využití. Díky svému složení je užitečný především v ekologickém směru a pro aplikace s důrazem na obnovitelnost a možnost recyklace. Materiál PMMA je vhodný především pro potřeby transparentních dílů, či dílů s důrazem na chemickou odolnost a odolnost vůči UV záření. FLEXFill 98a najde největší využití v průmyslových aplikacích, které vyžadují pružnost a tlumení nárazů, dále může být vhodný pro tvorbu ochranných schránek a obalů. Voskový filament MoldLay je vhodný pro tvorbu forem jako negativu, při použití odlévaného materiálu o nízké teplotě tání. Dalším využitím může být výroba vytavitelných modelů pro výrobu forem na odlitky atypických tvarů, kterých je možné díky 3D tisku dosáhnout. Materiál E.P. je nejlépe využitelný pro aplikace vyžadující vyhlazení struktury po tisku. Díky své tvrdosti je také možné jeho využití k výrobě lisovacích nástrojů. Díky dobrým výsledkům postprocesingu je možné jej použít pro výrobu dekorativních dílů. Všechny cíle bakalářské práce byly splněny.

## Seznam obrázků

Obrázek 1 Schéma metody FDM [3].....	10
Obrázek 2 Schéma konstrukce tiskové hlavy FDM [2].....	11
Obrázek 3 Pružinový plech s PEI povrchem (Prusa Printers) [1].....	12
Obrázek 4 Návin filamentu PLA/ABS různých barev [4] .....	13
Obrázek 7 Příklad použití PET-G pro výrobu dílenského svěráku [12].....	16
Obrázek 9 Nevítané smrštění ABS v průběhu tisku [15].....	18
Obrázek 10 Venkovní (UV resistantní) díly z materiálu ASA [17] .....	19
Obrázek 11- Acetonem vyhlazené výtisky ASA.....	20
Obrázek 12 Výtisk z vícebarevného materiálu SILK [20].....	21
Obrázek 13 - ozubené kolo (Nylon PA).....	23
Obrázek 14 -Tisk ohebných dílů z materiálu Nylon PA.....	24
Obrázek 15 - Detail struktury materiálu [24].....	25
Obrázek 16 -Detail struktury materiálu Copperfill [25] .....	27
Obrázek 17- Detail struktury materiálu Steelfill [26].....	28
Obrázek 18 - Detail struktury materiálu XT-CF20 [27].....	29
Obrázek 19 - Viditelné částice plniva v materiálu WOODJet [29] .....	30
Obrázek 20 - Příklad výtisku materiálu Nylon AF80 Aramid [30] .....	31
Obrázek 21 Detail struktury materiálu Corkfill [32] .....	33
Obrázek 22 Detail struktury materiálu Woodfill [34] .....	35
Obrázek 23 - Životní cyklus materiálu NonOilen [36].....	37
Obrázek 24 - Příklad tisku z materiálu PMMA [40].....	38
Obrázek 25 Příklad běžného použití TPU jako izolace elektrických kabelů [41].....	40
Obrázek 26 - Příklad výtisku z materiálu E.P. [46] .....	42
Obrázek 27 Fotografie nosné konstrukce pro zkoušku nosnosti.....	44
Obrázek 28 Fotografie ustavovacího rámečku pro testovací tělíska .....	45
Obrázek 29 Fotografie zkušebních vzorků některých z testovaných materiálů .....	46
Obrázek 30 Zkušební tělíska pro test povrchových vlastností z materiálu PLA.....	48
Obrázek 31 Výsledek broušení BRONZEFILL.....	49
Obrázek 32 Výsledek broušení COPPERFILL .....	50
Obrázek 33 Výsledek broušení STEELFILL.....	50

Obrázek 34 Výsledek broušení materiálu WOODFILL .....	51
Obrázek 36 Výsledek broušení materiálu WOODJet .....	52
Obrázek 35 Výsledek broušení materiálu CORKFILL.....	52
Obrázek 37 Výsledek broušení materiálu XT-CF20.....	53
Obrázek 38 Smrštění materiálu Nylon AF80 Aramid při pokusu o tisk.....	54
Obrázek 39 Výsledek broušení materiálu NonOilen.....	55
Obrázek 40 Výsledek broušení materiálu PMMA.....	56
Obrázek 41 materiál FLEXFill 98A při zatížení.....	57
Obrázek 43 Výsledek broušení materiálu FLEXFill 98A.....	58
Obrázek 42 Výsledek broušení materiálu MoldLay .....	58
Obrázek 44 Příklad vyhlazení povrchu nahřívací pistolí materiálu MoldLay .....	59
Obrázek 45 Výsledek broušení materiálu E.P.....	60



## Seznam tabulek

Tabulka 1 Pevnostní tabulka recyklovaného PLA [5] .....	13
Tabulka 2 Technický list prusament PLA od firmy PRUSA[8] .....	14
Tabulka 3 Technický list Prusament PET-G od firmy prusa [12] .....	17
Tabulka 4 Výsledky zkoušky nosnosti materiálů.....	47

### 3 Bibliografie

- [1] 3D tisk: jak funguje FDM/FFF tiskárna?. *Svět hardware* [online]. **2019**, 2 [cit. 2023-07-21]. Dostupné z: <https://www.svethardware.cz/3d-tisk-jak-funguje-fdm-fff-tiskarna/48457-2>
- [2] PRINT, Alex. Main Parts of FDM 3D Printers Explained. *APM DESIGNS* [online]. 1-4 [cit. 2023-07-21]. Dostupné z: [https://apm-designs.com/3d-printer-main-components/#Filament\\_Diameter](https://apm-designs.com/3d-printer-main-components/#Filament_Diameter)
- [3] History of 3D Printing. *3D Printing From Scratch* [online]. [cit. 2022-05-01]. Dostupné z: <http://3dprintingfromscratch.com/common/history-of-3d-printing/>
- [4] 3D Printing Materials. *3D Printing From Scratch* [online]. [cit. 2023-07-21]. Dostupné z: <http://3dprintingfromscratch.com/common/3d-printing-materials/>
- [5] MARTORELLI, Massimo, Saverio MAIETTA, Salvatore GREBINO, Francesco PENTA a Antonio GLORIA. A comparison between mechanical properties of specimens 3D printed with virgin and recycled PLA. *Procedia CIRP*. 2019, **2019**(79), 143-146. Dostupné z: doi:10.1016/j.procir.2019.02.030
- [6] DESTEFANO, Vincent a Salaar KHAN. Applications of PLA in modern medicine. *Engineered Regeneration*. 2020, **2020**(1), 76-87. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.engreg.2020.08.002>
- [7] *3dtisk-online: Materiály pro tisk technologií FDM* [online]. [cit. 2022-01-27]. Dostupné z: <https://www.3dtisk-online.cz/3d-tisk-brno-prehled-materialu-pro-3d/>
- [8] *Prusament PLA: Prusament* [online]. 2018 [cit. 2022-01-27]. Dostupné z: <https://prusament.com/cs/materials/prusament-pla/>
- [9] HOMOLA, Jan. PLA. In: *3D-tisk.cz: PLA* [online]. Brno: Nová média, s. r. o. [cit. 2022-01-27]. Dostupné z: <https://www.3d-tisk.cz/pla/>
- [10] What is PETG. In: *AcmePlastics* [online]. AcmePlastics [cit. 2022-01-30]. Dostupné z: <https://www.acmeplastics.com/what-is-petg>
- [11] KIVELÄ, Lamin. PETG vs PLA Filament: The Differences. In: *All3DP* [online]. Mnichov: All3DP, 2014 [cit. 2022-01-30]. Dostupné z: <https://m.all3dp.com/2/petg-vs-pla-3d-printing-filaments-compared/>
- [12] *PRUSAMENT PETG: PRUSAMENT* [online]. [cit. 2022-01-30]. Dostupné z: <https://prusament.com/cs/materials/prusament-petg/>
- [13] Natural Degradation on Plastics and Corrosion of Plastics in Industrial Environment. *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*. 2021, **2021**. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820352-1.00105-X>
- [14] ABS. In: *AcmePlastics* [online]. AcmePlastics [cit. 2022-01-30]. Dostupné z: <https://www.acmeplastics.com/abs>
- [15] ABS+/PLUS FILAMENT: THE BASICS. In: *All3DP* [online]. Mnichov: All3DP, 2014 [cit. 2022-01-30]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/abs-plus-filament-what-is-it/>
- [16] SHARMA, Anmol, Deepak CHHABRA, Ravinder SAHDEV, Ashish KAUSHIK a Upender PUNIA. Investigation of wear rate of FDM printed TPU, ASA and multi-material parts using heuristic GANN tool. *Materials Today: Proceedings* [online]. **2022**(63), 559-565 [cit. 2023-07-23]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.015>

- [17] *Prusament ASA: Prusament* [online]. In: . [cit. 2023-07-23]. Dostupné z: [https://help.prusa3d.com/cs/article/asa\\_1809?\\_gl=1\\*rhgbx5\\*\\_ga\\*MTEyOTE1MzI5OC4xNjkwMTE0MDM0\\*\\_ga\\_3HK7B7RT5V\\*MTY5MDExNDAzMy4xLjAuMTY5MDExNDAzNS42MC4wLjA.#\\_ga=2.171240800.1328415988.1690114034-1129153298.1690114034](https://help.prusa3d.com/cs/article/asa_1809?_gl=1*rhgbx5*_ga*MTEyOTE1MzI5OC4xNjkwMTE0MDM0*_ga_3HK7B7RT5V*MTY5MDExNDAzMy4xLjAuMTY5MDExNDAzNS42MC4wLjA.#_ga=2.171240800.1328415988.1690114034-1129153298.1690114034)
- [18] *Elegant3D* [online]. [cit. 2023-07-23]. Dostupné z: <https://www.elegant3d.cz/PLA-filament-perletove-seda-silk-1-75-mm-1-kg-d766.htm>
- [19] A potential material for tissue engineering: Silkworm silk/PLA biocomposite. *Composites Part B: Engineering* [online]. **2008**(39), 1026-1033 [cit. 2023-07-23]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2007.11.009>
- [20] *Sharplayers: Silk* [online]. [cit. 2023-07-23]. Dostupné z: <https://eshop.sharplayers.cz/p/3-color-silk-magic-filament-pla-tribarevna-struna-pro-3d-tisk>
- [21] Strength to cost ratio analysis of FDM Nylon 12 3D Printed Parts. *Procedia Manufacturing* [online]. **2018**(26), 753-762 [cit. 2023-07-24]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.07.086>
- [22] *Prusament Polyamid (Nylon): Prusament* [online]. [cit. 2023-07-24]. Dostupné z: [https://help.prusa3d.com/cs/article/polyamid-nylon\\_167188](https://help.prusa3d.com/cs/article/polyamid-nylon_167188)
- [23] *TREATSTOCK: Nylon (FDM 3D printing)* [online]. [cit. 2023-07-24]. Dostupné z: <https://www.treatstock.com/material/nylon-fdm>
- [24] *ColorFabb: BRONZEFILL* [online]. [cit. 2023-07-25]. Dostupné z: [https://colorfabb.com/bronzefill?gclid=Cj0KCQjw5f2lBhCkARIsAHeTvljAYN5XC15pDWpr1974GcKebc8p8ftsayX66sxnJKQyxx1IUlkbhioaAlMvEALw\\_wcB](https://colorfabb.com/bronzefill?gclid=Cj0KCQjw5f2lBhCkARIsAHeTvljAYN5XC15pDWpr1974GcKebc8p8ftsayX66sxnJKQyxx1IUlkbhioaAlMvEALw_wcB)
- [25] *ColorFabb: Copperfill* [online]. [cit. 2023-07-25]. Dostupné z: <https://colorfabb.com/copperfill>
- [26] *ColorFabb: StellFill* [online]. [cit. 2023-07-26]. Dostupné z: <https://colorfabb.com/steelfill>
- [27] *ColorFabb: XT-CF20* [online]. [cit. 2023-07-27]. Dostupné z: <https://colorfabb.com/xt-cf20>
- [28] *Filament PM: WOODJet* [online]. Plasty Mladeč [cit. 2023-07-27]. Dostupné z: <https://www.filament-pm.cz/pla-woodjet-natur-1-75-mm-0-5-kg/p269>
- [29] *Materialpro 3D: WOODjet* [online]. [cit. 2023-07-27]. Dostupné z: [https://www.materialpro3d.cz/wood/woodjet-tiskova-struna-natural-1-75-mm-0-5-kg-filament-pm/?gad=1&gclid=CjwKCAjwq4imBhBQEIwA9Nx1BrGyUtwUKSSLQI1vJF\\_sO\\_E8MR4xEgYRI-wUCRoppRqo\\_kPGbqqwWxoCLcMQAvD\\_BwE](https://www.materialpro3d.cz/wood/woodjet-tiskova-struna-natural-1-75-mm-0-5-kg-filament-pm/?gad=1&gclid=CjwKCAjwq4imBhBQEIwA9Nx1BrGyUtwUKSSLQI1vJF_sO_E8MR4xEgYRI-wUCRoppRqo_kPGbqqwWxoCLcMQAvD_BwE)
- [30] *Fillamentum: Nylon AF80 Aramid* [online]. [cit. 2023-07-28]. Dostupné z: <https://fillamentum.com/collections/nylon-filament/nylon-af80-aramid-filament/>
- [31] Technical Data Sheet: Nylon AF80 Aramid. In: *Fillamentum: Nylon AF80 Aramid* [online]. [cit. 2023-07-28]. Dostupné z: [http://www.fillamentumautomotive.com/wp-content/uploads/2020/10/Technical-Data-Sheet\\_Nylon-AF80-Aramid.pdf](http://www.fillamentumautomotive.com/wp-content/uploads/2020/10/Technical-Data-Sheet_Nylon-AF80-Aramid.pdf)
- [32] *ColorFabb: CORKFILL* [online]. [cit. 2023-07-28]. Dostupné z: <https://colorfabb.com/corkfill>
- [33] Technical Data Sheet: Corkfill. In: *ColorFabb: Corkfill* [online]. [cit. 2023-07-28]. Dostupné z: [https://colorfabb.com/media/datasheets/tds/colorfabb/TDS\\_E\\_ColorFabb\\_corkFill.pdf](https://colorfabb.com/media/datasheets/tds/colorfabb/TDS_E_ColorFabb_corkFill.pdf)
- [34] *ColorFabb: Woodfill* [online]. [cit. 2023-07-28]. Dostupné z: <https://colorfabb.com/woodfill>

- [35] Technical Data Sheet: Woodfill. In: *ColorFabb: Woodfill* [online]. [cit. 2023-07-28]. Dostupné z: [https://colorfabb.com/media/datasheets/tds/colorfabb/TDS\\_E\\_ColorFabb\\_woodFill.pdf](https://colorfabb.com/media/datasheets/tds/colorfabb/TDS_E_ColorFabb_woodFill.pdf)
- [36] *Fillamentum for nature: Fillamentum NonOilen* [online]. [cit. 2023-07-30]. Dostupné z: Fillamentum NonOilen®
- [37] Technical Data Sheet: NonOilen. In: *Fillamentum for nature: Fillamentum NonOilen* [online]. [cit. 2023-07-30]. Dostupné z: [https://fillamentum.com/wp-content/uploads/2020/10/Technical-Data-Sheet\\_NonOilen\\_EN\\_03082020\\_FfN.pdf](https://fillamentum.com/wp-content/uploads/2020/10/Technical-Data-Sheet_NonOilen_EN_03082020_FfN.pdf)
- [38] Large deformation mechanical behavior and constitutive modeling of oriented PMMA. *International Journal of Mechanical Sciences* [online]. 2022, (257) [cit. 2023-07-30]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2023.108520>
- [39] Product card: PMMA. In: *Devil Design* [online]. [cit. 2023-07-30]. Dostupné z: [https://devildesign.com/download/PMMA\\_-\\_product\\_card.pdf](https://devildesign.com/download/PMMA_-_product_card.pdf)
- [40] *Sharplayers: PMMA* [online]. [cit. 2023-07-30]. Dostupné z: <https://eshop.sharplayers.cz/pmma-filament>
- [41] TPU – všestranný termoplastický elastomer pro široké použití. *Technický týdeník* [online]. Business Media CZ [cit. 2023-07-30]. Dostupné z: [https://www.technickytydenik.cz/rubriky/plasty/tpu-vsestranny-termoplasticky-elastomer-pro-siroke-pouziti\\_45236.html](https://www.technickytydenik.cz/rubriky/plasty/tpu-vsestranny-termoplasticky-elastomer-pro-siroke-pouziti_45236.html)
- [42] *Fillamentum: Flexfill TPU 98A* [online]. [cit. 2023-07-30]. Dostupné z: [https://fillamentum.com/collections/flexfill-tpu-flexible-filament/flexfill-tpu-98a/?\\_ga=2.182892579.405250277.1690708436-136205003.1690540734&\\_gl=1\\*1rwr14\\*\\_ga\\*MTM2MjA1MDAzLjE2OTA1NDA3MzQ.\\*\\_ga\\_L703XWXLV0\\*MTY5MDcxOTIxMC4zLjEuMTY5MDcxOTIyNS40NS4wLjA](https://fillamentum.com/collections/flexfill-tpu-flexible-filament/flexfill-tpu-98a/?_ga=2.182892579.405250277.1690708436-136205003.1690540734&_gl=1*1rwr14*_ga*MTM2MjA1MDAzLjE2OTA1NDA3MzQ.*_ga_L703XWXLV0*MTY5MDcxOTIxMC4zLjEuMTY5MDcxOTIyNS40NS4wLjA)
- [43] Technical Data Sheet: Flexfill TPU 98A. In: *Fillamentum: Flexfill TPU 98A* [online]. [cit. 2023-07-30]. Dostupné z: [http://www.fillamentumautomotive.com/wp-content/uploads/2020/10/Technical-Data-Sheet\\_Flexfill-TPU-98A\\_26082019.pdf](http://www.fillamentumautomotive.com/wp-content/uploads/2020/10/Technical-Data-Sheet_Flexfill-TPU-98A_26082019.pdf)
- [44] *Filament2Print: MoldLay* [online]. [cit. 2023-07-30]. Dostupné z: <https://filament2print.com/gb/lay/645-moldlay.html>
- [45] *Materialpro 3D: MoldLay voskový (Wax-Alike) filament* [online]. [cit. 2023-07-30]. Dostupné z: [https://www.materialpro3d.cz/specialni-filamenty/moldlay-voskovy-filament-1-75mm-750g/?gad=1&gclid=CjwKCAjwLjImBhAsEiWA1hrp5vr4hVwWhoDMMzTAinRMbwZqFQq2oJqYZA5oCV4H4iKjqY4IhdOKTxoCSC0QAvD\\_BwE](https://www.materialpro3d.cz/specialni-filamenty/moldlay-voskovy-filament-1-75mm-750g/?gad=1&gclid=CjwKCAjwLjImBhAsEiWA1hrp5vr4hVwWhoDMMzTAinRMbwZqFQq2oJqYZA5oCV4H4iKjqY4IhdOKTxoCSC0QAvD_BwE)
- [46] *Materialpro 3D: E.P. "Easy print" tiskový materiál značky Smartfil* [online]. [cit. 2023-07-30]. Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/blog/e-p/>
- [47] Technical Data Sheet: SMARTFIL E.P. In: *Smart materials 3D: EP* [online]. [cit. 2023-07-30]. Dostupné z: [https://www.materialpro3d.cz/user/related\\_files/tds\\_ep\\_en\\_es\\_\(2\).pdf](https://www.materialpro3d.cz/user/related_files/tds_ep_en_es_(2).pdf)
- [48] JANOVEC, Jiří, Jiří CEJP a Josef STEIDL. Perspektivní materiály. *České vysoké učení technické*. 3. 2008, (-), -. ISBN 978-80-01-04167-3.
- [49] DIN 50125. *Test pieces for tensile testing of metallic materials*. -. Německo: -, 2004.
- [50] DAVID, Stárek. *Přehled a analýza nástrojových materiálů používaných v aditivní výrobě*. Praha, 2021. Bakalářská práce. České vysoké učení technické.

- [51] TOMÁŠ, Kment. *Print process parameters development for tool steel L-40 in Laser Powder Bed Fusion*. Praha, 2020. Diplomová práce. Czech technical university in Prague.