

PRINTING 3D OBJECTS AND DETERMINATION OF THE BEST PRINTING TEMPERATURE OF CHOSEN MATERIALS

TISK 3D OBJEKTŮ A URČENÍ NEJLEPŠÍ TISKOVÉ TEPLOTY VYBRANÝCH MATERIÁLŮ

Tomáš Vajskebr, Filip Frank a Jan Bezděka

Abstract

This article is focused on chosen materials in form of printing strings, also known as filament, which are used for 3D printing by FDM/FFF method. The article describes difference between FDM and FFF method of 3D printing. The article also deals with individual selected materials, for which the author uses the described methodology to select the best printing temperature of the nozzle, which leads to quality printing results.

Key words: *Printing, 3D printing, printer, 3D printer, material, temperature, thermoplastic, PLA, PETG, ABS, ASA, TPE, PP, FDM, FFF*

Abstrakt

Tento článek se zaměřuje na vybrané materiály v podobě tiskových strun, neboli filamentů, které se využívají pro 3D tisk metodou FDM/FFF. Článek popisuje, jaký je rozdíl mezi FDM a FFF metodou 3D tisku. Článek se také zabývá jednotlivými vybranými materiály, u nichž autor pomocí popsané metodiky vybírá nejlepší tiskovou teplotu trysky, která vede ke kvalitním výsledkům tisku.

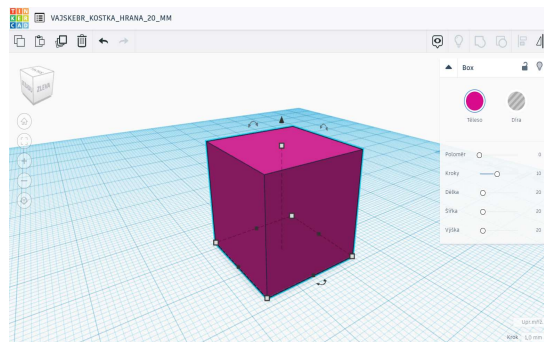
Klíčová slova: *Tisk, 3D tisk, tiskárna, materiál, teplota, termoplast, PLA, PETG, ABS, TPE, PP, FDM, FFF*

ÚVOD

Článek se zabývá zkoumáním termoplastických tiskových strun od firmy Plasty Mladeč, které využívá stroj fungující na principu natavování a nanášení plastu v tenkých vrstvách pro vytvoření 3D objektu. V první části se zabýváme tím, co je to 3D tisk, popíšeme rozdíl mezi FDM a FFF metodou 3D tisku. Nejrozsáhlejší částí tohoto článku bude samotný výzkum tiskových teplot jednotlivých materiálů. Popíšeme použitou metodiku a uvedeme její výsledky pro každý z vybraných materiálů.

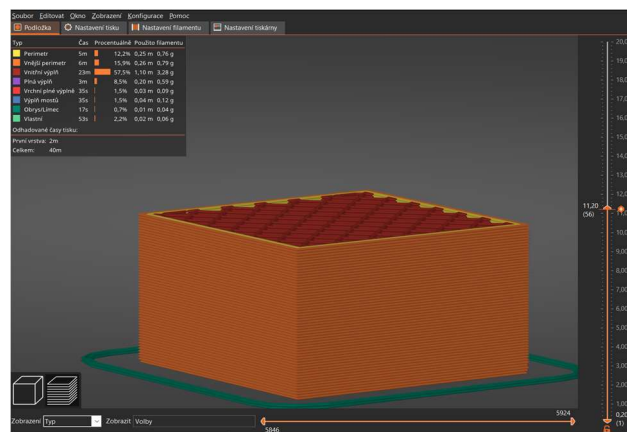
1 3D TISK A SOFTWARE

Nejprve je vhodné vysvětlit, co 3D tisk znamená. „3D tisk je tzv. aditivní proces, při kterém se z digitální předlohy (3D modelu) vytváří fyzický model“ (Krebs, Kolařík, & Bryksí Stunová, 2020, str. 54). Podle této definice můžeme říct, že 3D tisk je proces výroby, při kterém se materiál přidává, na rozdíl od klasického procesu výroby, kdy se materiál odebírá z monolitického kusu. Pro vytisknutí výrobku na 3D tiskárně potřebujeme model výrobku v elektrické podobě. Toho docílíme tak, že výrobek vymodelujeme pomocí 3D modelovacího programu, jako je například AutoCAD, SketchUp, SolidWorks nebo volně dostupný Thincercad.



Obrázek 8: Thincercad – kostka
(Zdroj: Vlastní)

Po vytvoření modelu je potřeba z něj vygenerovat G-kód, který se používá pro řízení samotné 3D tiskárny. Tento kód získáme použitím speciálního softwaru, kterému se říká slicer. Tento program elektronický 3D model v podstatě rozřeže do předem definovaných vrstev. Tyto vrstvy dostanou vektorovou mapu v podobně G-kódu. Pro vytvoření G-kódu můžeme použít programy jako je PrusaSlicer, Slic3r nebo Simplify3D.



Obrázek 9: PrusaSlicer 2.4.0 - rozřezaná kostka
(Zdroj: Vlastní)

V G-kódu jsou zapsány pozice, kterými musí 3D tiskárna projít, aby vytvořila fyzický výrobek. Mimo pozice jsou v kódu i části, jež jsou potřebné ke komunikaci s tiskárnou. Tento kód již umí 3D tiskárny přečíst a je schopna vytvořit fyzickou kopii elektronického modelu. Jako příklad uvádíme prvních několik řádek G-kódu, potřebného pro vytvoření kostky o hraně 20 milimetrů.

...

```
G1 X154.173 Y158.242 E.04262  
G1 X153.638 Y158.242 E.01679  
G1 X155.132 Y159.736 E.06636  
G1 X155.132 Y160.27 E.01679
```

...

Tento kód je složen v zásadě ze dvou částí. První (zelená) udává typ pohybu 3D tiskárny. V našem případě G1 udává lineární pohyb. Pro jiné typy pohybu, jako například obloukový slouží příkaz G2. V druhé (žluté) se udávají hodnoty pozice na osách X, Y a počet kroků extruderu E. V kódu se nachází i hodnota Z, která udává výškový rozdíl vrstev. Udává tím tedy vzdálenost o jakou se má tisková hlava posunout, při přechodu z jedné vrstvy na druhou. Závěrem tedy můžeme definovat 3D tisk jako proces vytváření fyzického objektu z digitální předlohy pomocí určitého typu kódu, který získáme za použití specializovaných programů.

2 FDM/FFF

Nejrozšířenější metodou 3D tisku je bezesporu metoda FDM/FFF. Pod těmito dvěma zkratkami se skrývají dva názvy. Pod zkratkou FDM se skrývá anglický název Fused Deposition Modeling a pod zkratkou FFF název Fused Filament Fabrication. Tyto dvě zkratky existují kvůli patentu, jehož vznik se datuje do roku 1989. Byl založen na stroji, který dokázal pomocí pohyblivé hlavy vytlačovat roztavený plastový materiál v ose X, Y a Z. Roztavený materiál postupně chladl a přecházel do pevného skupenství. O patent si zažádal americký technik Steven Scott Crump, který se svou manželkou Lisou Crump založil společnost Stratasys. Firma Stratasys se zabývá výrobou 3D tiskáren, které využívají technologii FDM. Stroje pod názvem 3D Modeler byly představeny v roce 1992 právě pod záštitou firmy Stratasys. Z důvodu definice a fungování patentu se vývoj FDM strojů zpomalil. Paralelně s touto metodou vznikaly další technologie. V roce 2009 vypršel patent firmy Stratasys. Začaly se objevovat firmy, jež se specializovaly na výrobu 3D tiskáren. Vznikla firma MakerBot, která v roce 2009 přišla na trh s tiskárnou MakerBot Cupcake. O dva roky později, tedy v roce 2011, vznikla firma Ultimaker a rok poté byla založena i česká firma na výrobu 3D tiskáren Prusa Research, která dostala jméno po svém zakladateli Josefu Průšovi. Díky vypršení patentu bylo možné i zredukování ceny těchto zařízení, ze statisíců na řádově tisíce. V roce 2009, brzy po vypršení patentu firmy Stratasys, se podařilo projektu RepRap (Replicating Rapid Prototyper) vytvořit první 3D tiskárnu, která se dokázala klonovat. To znamená, že je jedna tiskárna schopna vytvořit svou kopii. Projekt RepRap založil v roce 2004 britský inženýr a matematik Adrian Bowyer. S projektem RepRap se začala používat zkratka FFF. Tato zkratka vznikla kvůli tomu, aby bylo možné vyrábět tiskárny, jež využívaly technologii FDM, bez obav o porušení patentu výroba struny.

2.1 PRINCIP FUNKCE TISKÁREN VYUŽÍVAJÍCÍCH METODOU FDM

Metoda FDM využívá principu natavování termoplastického materiálu, který je navinutý ve formě struny. Právě ta je navinuta na cívce, která je vytvořena z plastu (Zeman, 2018, str. 138). Z pohledu ekologie se však mnoho výrobců klaní spíše k využití recyklovaného kartonu pro výrobu celých cívek či jejich částí. Příkladem mohou být cívky od výrobce Polymaker nebo českého výrobce Prusa, který využívá kartonové středy cívek. Struna je přiváděná do tiskové hlavy za pomoci krokového motoru. Tomuto motoru se říká extrudér. V tiskové hlavě je odporovým tělesem zahřívána tryska, kde se materiál taví na teplotu, při níž je schopen vytékat ven. Materiál je poté vytlačován skrz trysku na vyhřívanou tiskovou podložku. Tisková hlava se pohybuje v rovině osy X a Y. V této rovině zůstává do doby, než je vytištěna jedna celá vrstva výrobku. Po dokončení vrstvy tiskárna načte již dříve zmiňovaný G-kód,

který vyvolá změnu v posunu osy Z o předem danou hodnotu. Po posunu osy Z může tiskárna pokračovat v tisku další vrstvy.

2.2 VÝHODY A NEVÝHODY FDM METODY

Výhody:

- Nejjednodušší a nejlevnější metoda 3D tisku;
- Vznik minimálního odpadu;
- Čistý tisk;
- Velký sortiment materiálů pro tisk.

Nevýhody:

- V porovnání s jinými metodami tisku nedosahuje takové míry detailu;
- Povrch výtisku není hladký (nerovnosti způsobené jednotlivými vrstvami);
- Tloušťka vrstvy (nejnižší vrstva, kterou doporučuje slicer Cura, je 0,16 mm).

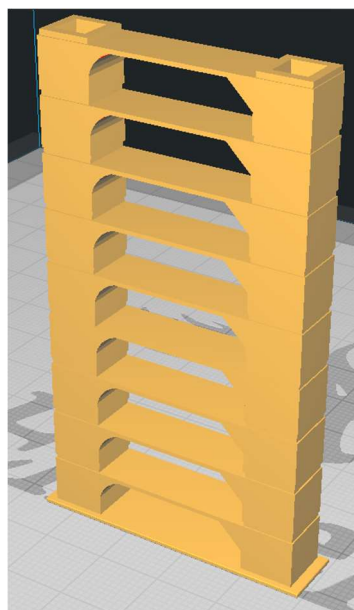
2.3 VYUŽITÍ METODY FDM

Metoda FDM je vhodná pro rychlé prototypování. Vytvořený 3D model se vytiskne a může se okamžitě používat. Není nutný zdlouhavý postprocesing. Výtisky dosahují velké pevnosti v ose mimo vrstvy. Pokud budeme namáhat výrobek z osy vrstev, může se stát, že se jednotlivé vrstvy od sebe oddělí. Díky široké škále materiálů může výsledný výtisk nabývat různých vlastností, například pružnost, odolnost vůči ultrafialovému záření apod.

3 METODIKA ZKOUMÁNÍ

3.1. TEPLOTNÍ VĚŽ

Pro testování teploty trysky byl použit model teplotní věže, který je dostupný v programu Cura jako jeho součást, rozšíření s názvem Part for calibration. Tento



Obrázek 10: Model teplotní věže
(Zdroj: Vlastní)

model je složen z jednotlivých bloků, jež se při správné modifikaci G-kódu tisknou různou teplotou trysky. Mezi jednotlivými bloky jsme se rozhodli pro 5°C dekrement. Tato hodnota byla odvozena od konstrukčních vlastností tiskárny a její tiskové hlavy. Nastavená teplota není při tisku stálá a konstantní. Teplota trysky kolísá kolem nastavené teploty přibližně o ± 1 °C. Pro zajištění rozlišení dvou nastavených teplot bylo určeno, že právě 5 °C zajistí jasné oddělení. Po vytisknutí modelu byla podle kvality tisku, dobré adheze mezi vrstvami a podle absence chyb vybrána nejlepší teplota. Zvolená teplota byla nastavena pro modely, které využívají vlastnosti jednotlivých materiálů.

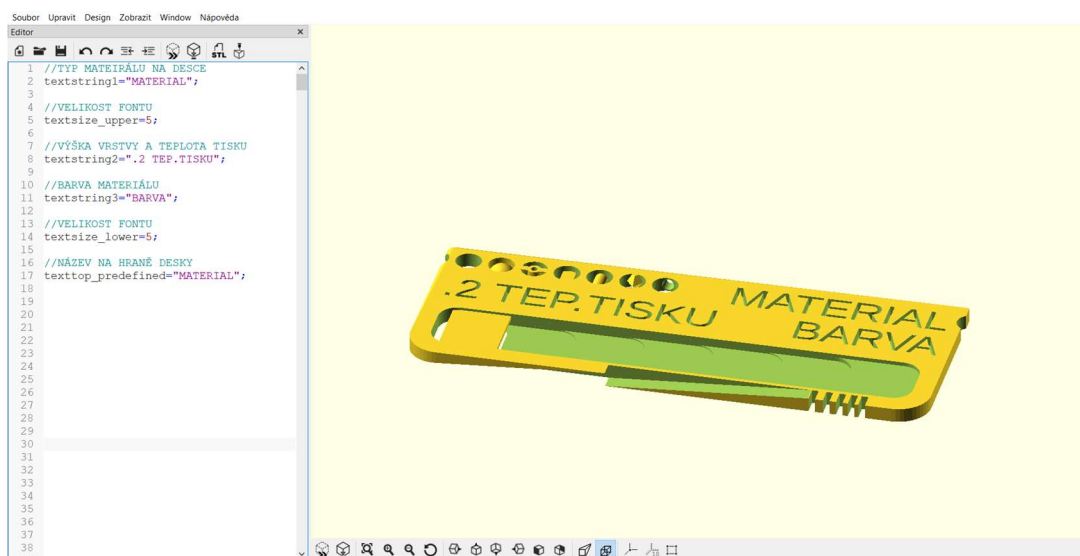
3.2 TESTOVACÍ DESTIČKA

Pro testování materiálu jsme přebírali jednoduchý model z webu thingiverse.com od uživatele @makkuro. Tento model má podobu destičky, která zachytává vlastnosti materiálu různými způsoby. Model byl upraven pomocí OpenSCAD tak, aby na něm vždy byl uveden typ materiálu, barva a tisková teplota trysky a výška vrstvy.

Vlastnosti a testy, které můžeme pozorovat na modelu:

- test převisu;
- test přemostění;
- vlastnosti při různých vrstvách;
- různé tvary (zachycení detailů);
- test tloušťky tisknutých zdí a vlastnosti sčítání vrstev;
- test kruhového tvaru.

Na tomto modelu jsme sledovali jednotlivé klady a zápory materiálu. Vlastnosti zjištěné z testovacího modelu a z teplotní věže jsme poté použili pro výběr tisknutých modelů pro jednotlivé materiály.



Obrázek 11: Testovací destička v programu
OpenSCAD
(Zdroj: Vlastní)

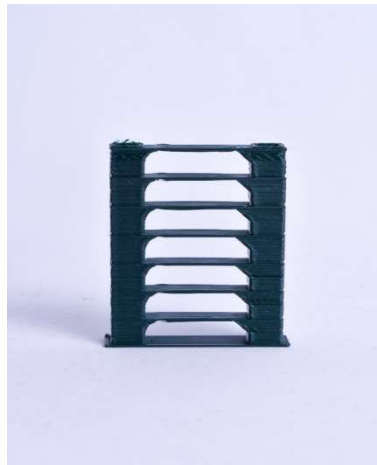
4 MATERIÁLY

V článku se zabýváme materiály PLA, PETG, ABS, ASA, TPE a PP. Všechny testované materiály jsou od společnosti Plasty Mladeč.

4.1 PLA

Teplotní věž

Výrobce udává v bezpečnostním listu tiskovou teplotu trysky v rozmezí od 200 do 230 °C. Proto jsme nastavili teplotní věž od teploty 230 °C s dekrementem 5 °C do teploty 190 °C. Tisk začínal na nejvyšší teplotě a postupně se teplota snižovala. Nakonec se podařilo vytisknout sedm pater teplotní věže. Při teplotě 200 °C již docházelo k přeskokování extruderu z důvodu nízké teploty trysky. Při teplotě 195 °C se materiál nedokázal protlačit hotendem a proto byl tisk předčasně ukončen. Po zchlazení tiskové desky byl model sejmут a pozorováním kvality tisku byla určena nejlepší teplota trysky jako 205 °C. Posuzována byla zejména kvalita tisku a přemostění, dále také adheze mezi vrstvami a případné chyby v modelu.



Obrázek 12: PLA – teplotní věž
(Zdroj: Vlastní)

Testovací destička

Po určení teploty 205 °C jako ideální teploty tisku byla vytištěna testovací destička. Na tomto modelu můžeme pozorovat, že tento materiál je velmi dobrý pro tisk detailů a dokáže si dobře poradit s přemostěním. Materiál je po vytištění matný. PLA také dobře odolává ohybu. Po pokusu destičku ohnout se vrátila zpět do původní podoby a zůstala na ní drobná deformace v podobě zblednutí v místě ohybu. Z modelu je také zřejmé, že PLA zvládá velmi dobře tenké zdi, protože po přeměření měly jednotlivé části přesnou šířku. Rozměry destičky byly přesné s odchylkou do 0,5 %. Materiál tedy splnil očekávání.

Extrémní převisy tento materiál nezvládá příliš dobře, protože poslední dvě vrstvy se již deformovaly. Jak si můžeme na obrázku 14 povšimnout, v pravé části modelu je vidět vlákno, které vzniklo tažením materiálu. Tato vlákna vznikají například lepením materiálu na trysku. To se může stát fatální při tisku modelů s vyššími detaily, jelikož tato vlákna způsobují deformace modelů.

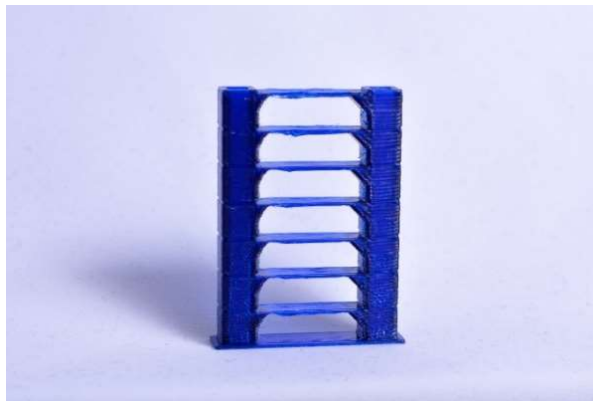


Obrázek 13: PLA – testovací destička
(Zdroj: Vlastní)

4.2 PETG

Teplotní věž

Teplotní věž pro PETG byla tisknuta v rozmezí teplot 225 až 255°C. Na rozdíl od výrobcem udávaného spektra se naše zvětšilo na každou hranici o 5 °C. Mezi jednotlivými bloky teplotní věže byl nastaven dekrement 5 °C. Tisk začal na teplotě 255 °C. Na této teplotě je vidět, že byla pro materiál příliš vysoká. Dochází zde k tečení materiálu z vnějších perimetrů a na materiálu je vidět i přehřívání. Na rozdíl teplota 225 °C je až příliš nízká. Dochází k předčasnému chladnutí materiálu za tryskou a tím k viditelným chybám na modelu. Po bližším prozkoumání, započítání chyb a posouzení kvality přemostění modelu jsme určili, že teplota 240 °C je pro tento materiál ideální. Blok s touto teplotou byl vytištěn nejlépe. Měl rohy s nejméně chybami a na vnějších perimetrech byl model velmi kvalitní, rovný a čistý.



Obrázek 14: PETG – teplotní věž
(Zdroj: Vlastní)

Testovací destička

Po stanovení, že teplota 240 °C poskytuje nejlepší výsledky tisku, jsme při této teplotě vytiskli testovací destičku. Na testovací desce jsme potvrdili, že materiál dokáže velmi kvalitně tvořit přemostění. Testovací destička nám v části vrstvení na prvním kroku potvrzuje, že tento materiál se může vyrábět i v transparentním provedení. Po prozkoumání modelu můžeme určit i to, že velmi dobře zvládá tepelnou roztažnost, jelikož rozměry testu tenkých stěn vyšly přesně jako na modelu v OpenSCAD. Tento materiál odolává velmi dobře vyšším teplotám, proto test převisů vyšel velmi dobře. Pevnost materiálu jsme otestovali ohnutím destičky. Po uvolnění tlaku se destička okamžitě vrátila do původní podoby. Byla velmi rovná. Takto jsme ověřili, že materiál dobře zvládá tlakové namáhání.



Obrázek 15: PETG – testovací destička
(Zdroj: Vlastní)

4.3 ABS

Teplotní věž

Teplotní věž se tiskla od teploty 255 do 215 °C s dekrementem 5 °C. Tisk začal na teplotě 255 °C. Tato teplota byla však příliš vysoká. Na bloku bylo vidět, že materiál vytéká z perimetrů a dochází tak k deformaci modelu. Při snižování teploty se kvalita vysoce zvyšovala. Posupným snižováním jsme se dostali do oblasti, kde vytlačený materiál podléhal tepelné roztažnosti. Při chladnutí se vytvářelo prnutí a tím se model deformoval až do doby, kdy se začaly odlepovat jednotlivé vrstvy. Po vytisknutí jsme určili 245 °C jako nejlepší tiskovou teplotu. Při této teplotě se na modelu nevyskytují problémová místa.



Obrázek 16: ABS – teplotní věž
(Zdroj: Vlastní)

Testovací destička

Po rozhodnutí, že teplota 245 °C poskytuje nejlepší výsledky tisku, jsme za této teploty vytiskli testovací destičku. Model ukázal, že materiál je schopný vytvořit kvalitní přemostění, ale že nedokáže zachytit mnoho detailů. O absenci detailů svědčí nápis na jejím povrchu. Materiál se v písmenech roztekl do míst, kde by neměl být a způsobil obtížné čtení. Zjistili jsme také to, že převisy materiál zvládá poměrně dobře, ale v extréměch si s nimi již neporadí. Na desce lze pozorovat, že teplotní roztažnost materiálu při jeho chladnutí může způsobit deformace v podobě ohnutí destičky od středu ke krajům. Po pokusu narovnat vzniklý ohyb se destička vrátila zpět do původní polohy a tím prokázala, že je tento materiál velmi pevný.



Obrázek 17: ABS - testovací destička
(Zdroj: Vlastní)

4.4 ASA

Teplotní věž

Pro tisk teplotní věže byl použit rozsah, který uvádí výrobce. Tisk začal od teploty 260 °C a probíhal s 5°C dekrementem. Při teplotě 260 °C je na modelu vidět, že materiál má pro tisk příliš vysokou teplotu. Na tomto bloku nejsou zachovány detaily a materiál se na vnějších perimetrech vytlačuje ven z modelu. S klesající teplotou se kvalita tisku zlepšovala. Při teplotě 245 °C však docházelo k oddělování vrstev a dalším snižováním teploty docházelo k postupnému ucpávání trysky. To se projevilo tím, že na modelu zůstávají pozůstatky po zmařených retrakcích. Po vytisknutí byla určena teplota 255 °C jako ideální. Tato teplota poskytuje nejvíce detailů a nejkvalitnější povrch.



Obrázek 18: ASA - teplotní věž
(Zdroj: Vlastní)

Testovací destička

Po vytisknutí teplotní věže a stanovení teploty 255 °C jsme vytiskli testovací destičku. Na této desce můžeme pozorovat, že materiál podléhá teplotní deformaci. Celá destička byla po vytisknutí ohnuta do tvaru písmene U. Při chladnutí se vně materiálu vytváří pnutí, které jej deformuje. ASA je však velmi dobrá pro zachycení detailů. V testovacích otvorech můžeme jednoznačně určit, o jaký tvar se jedná. Tento fakt můžeme potvrdit i na části, která se stará o tenké stěny. Po přeměření všech rozměrů můžeme potvrdit, že si materiál zachoval správnou velikost a při malých detailech nedochází ke ztrátě kvality tisku. Materiál má velmi dobré schopnosti při vytváření přemostění. Most na desce je rovný a vrstvy jsou mezi sebou dobře spojeny. Tento materiál dobře zvládá většinu nižších převisů, ale v extrémech si můžeme všimnout, že zde dochází k trhání a nevyplnění celé vrstvy. To může být zapříčiněno pnutím uvnitř modelu.



Obrázek 19: ASA - testovací destička
(Zdroj: Vlastní)

4.5 TPE

Teplotní věž

Teplotní věž jsme tiskli v rozsahu od 240 do 205 °C s 5°C dekrementem. Při teplotě 240 °C jsme pozorovali vysokou teplotu v přemostění. O jeden krok teploty níže jsme určili nejlepší teplotu tisku 235 °C. Další snižování teploty působilo na model negativně.

Materiál se začal deformovat. Vnější perimetry teplotní věže začaly vykazovat chyby v podobě děr ve vnějších perimetrech modelu.



Obrázek 20: TPE – teplotní věž
(Zdroj: Vlastní)

Testovací destička

Testovací destička se nepovedla kvalitně vytisknout z důvodu jejích vysokých detailů. Z destičky můžeme usoudit, že tento materiál nezvládá tisk přehrad. Můžeme pozorovat, že povrch materiálu je velmi rovný a vysoce odolný vůči otěru. Testovací otvory na desce nejsou dobře rozpoznatelné, a proto můžeme konstatovat, že tento materiál nezvládá tisk vysokých detailů. Celá testovací destička byla po sejmutí z tiskárny zahýbaná. Materiál zvládá tvarovou přesnost, jelikož při přiložení testovací destičky k dalším byly její rozměry stejné. Hlavní předností tohoto materiálu je to, že je velice houževnatý a ohebný. Testovací destičku je možné elasticky deformovat.

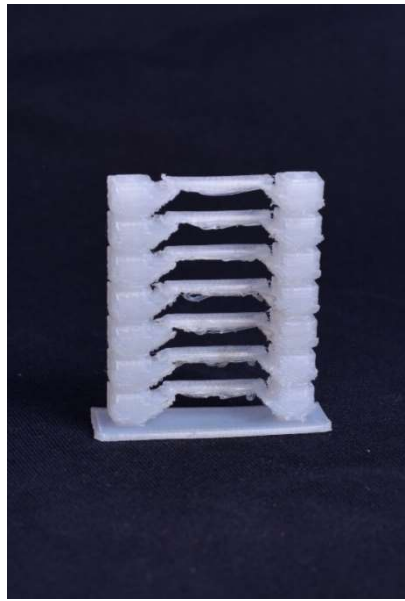


Obrázek 21: TPE - testovací destička
(Zdroj: Vlastní)

4.6 PP

Teplotní věž

Teplotní věž byla tisknuta od teploty 235 do 205 °C s 5°C dekrementem. Při nejvyšší teplotě se materiál při tisku vytlačoval z vnějších perimetrů a postupné snižování teplot vedlo k deformaci jednotlivých bloků teplotní věže. Po vytisknutí věže jsme odstranili brim (pomocný obrys pro lepší adhezi) a určili jsme hodnotu 230 °C jako nejlepší teplotu pro tisk. Při této teplotě se na povrchu modelu vyskytuje nejméně chyb a pohledovým posouzením vypadá nejlépe.



Obrázek 22:PP – teplotní věž
(Zdroj: Vlastní)

Testovací destička

Z testovací destičky je vidět, že tento materiál je pro tisk velmi složitý. Okraj, který se dotýkal brimu, je pěkný, ale místa, kam se tryska posunula na první vrstvě, se nevytiskla správně. Z této destičky lze poznat, že materiál špatně vytváří přemostění a není příliš vhodný pro zachycení detailů.



Obrázek 23: PP – testovací destička
(Zdroj: Vlastní)

5 SHRnutí VÝSLEDKŮ

Nejzásadnější zjištění jsou shrnuta v tabulce 1. Tabulka obsahuje název materiálu, ideální teplotu trysky pro tisk a vyhodnocení zjištění z testovací destičky.

Tabulka 1: Srovnání materiálů

MATERIÁL	TEPLOTA TRYSKY [°C]	VÝSLEDKY TESTOVACÍ DESKY					
		PŘESNOST ROZMĚRŮ	PŘEVISY	PŘEMOSTĚNÍ	DETAILY	KRUH	TENKÉ ZDI
PLA	205	✓	✓	✓	✓	✓	✓
PRTG	240	✓	✓	✓	✓	✓	✓
ABS	245	✓	✓	✓	✓	✓	✓
ASA	255	✓	✗	✓	✓	✓	✓
TPE	235	✓	✗	✗	✗	✗	✓
PP	230	✓	✗	✗	✗	✗	✓

6 ZÁVĚR

V úvodu článku jsme se seznámili principem 3D tisku pomocí aditivní metody FDM/FFF a vysvětlili si, že rozdíl mezi nimi je zejména licenčního charakteru. Následně jsme si shrnuli nejzásadnější výhody a nevýhody zmíněné technologie a její možné využití. V metodice výzkumu byly představeny modely, které byly použity pro stanovení vlastností materiálu a jeho vhodnosti pro určité modely. Zvolené modely byly teplotní věž, která byla tištěna se snižující se teplotou na tiskové trysce a testovací destička. Destička je vytvořena tak, aby umožňovala analýzu problematických částí tisku, jako je přemostění nebo důraz na detail.

LITERATURA

1. Krebs, S., Kolařík, L., & Bryksí Stunová, B. (2020). Technologie zpracování plastů a kompozitů. Praha: České vysoké učení technické v Praze.
2. Zeman, L. (2018). *Vstřikování plastů teorie a praxe*. Praha: Grada Publishing, a. s.

Kontakt

Tomáš Vajskebr, Mgr. Filip Frank a Mgr. Jan Bezděka
Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta pedagogická
Klatovská tř. 51, 306 19 Plzeň
Tel: +420 377 636 463
E-mail: frankf@kvd.zcu.cz