

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ
ÚSTAV MATERIÁLOVÉHO INŽENÝRSTVÍ



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

VLASTNOSTI TĚLES PŘIPRAVENÝCH 3D TISKEM

CHARACTERISTICS OF PARTS PREPARED

BY 3D PRINTING

AUTOR: David Čermák

STUDIJNÍ PROGRAM: Výroba a ekonomika ve strojírenství

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

PRAHA 2019

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Čermák** Jméno: **David** Osobní číslo: **473429**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav materiálového inženýrství**
Studijní program: **Výroba a ekonomika ve strojírenství**
Studijní obor: **Technologie, materiály a ekonomika strojírenství**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Vlastnosti těles připravených 3D tiskem

Název bakalářské práce anglicky:

Characteristics of parts prepared by 3D printing

Pokyny pro vypracování:

1. Vytvořit přehled metod 3D tisku polymerních materiálů.
2. Porovnat výsledky testování těles zhotovených 3D tiskem na ÚMI.
3. Navrhnout další způsoby přípravy těles.
4. Vzorky vytisknout, testovat a výsledky vyhodnotit.
5. Diskuse, závěr.

Seznam doporučené literatury:

- [1] ČSN EN ISO 527-1. Plasty - Stanovení tahových vlastností - Část 1: Obecné principy. Praha: Ústav pro technickou normalizaci a státní zkušebnictví, 2012.
- [2] ČSN EN ISO 179-1. Plasty - Stanovení rázové houževnatosti metodou Charpy - Část 1: Neinstrumentovaná rázová zkouška. Praha: Ústav pro technickou normalizaci a státní zkušebnictví, 2010.
- [3] Vyhledání závěrečných prací je součástí zadání.
- [4] Firemní materiály.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

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

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

Datum zadání bakalářské práce: **30.04.2020**

Termín odevzdání bakalářské práce: **31.07.2020**

Platnost zadání bakalářské práce: _____


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


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

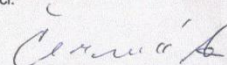

prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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.

1.6.2020

Datum převzetí zadání



Podpis studenta

Prohlášení

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

V Praze dne:

.....

Podpis

Abstrakt

Bakalářská práce ve své teoretické části zpracovává rešerši na téma aditivní technologie. Konkrétně se zaměřuje na používané metody 3D tisku, především pak na metodu FDM (Fused Deposition Modeling), parametry, které ovlivňují vlastnosti tištěného dílu, nejčastěji používané materiály a na mechanické zkoušky výtisků. Praktická část práce je zaměřena na samotný tisk zkušebních těles z materiálu PLA a na následné zkoušení a vyhodnocení mechanických vlastností v závislosti na zvolených parametrech tisku.

Klíčová slova

Aditivní technologie, 3D tisk, FDM technologie, Fused Deposition Modeling, PLA, Prusa-i3 MK3S, Stratasys F370, mechanické vlastnosti

Abstract

In its theoretical part, this bachelor thesis deals with the research of additive technology. Specifically, it focuses on the methods of 3D printing, mainly on the FDM method (Fused Deposition Modeling), parameters that affect the properties of printed parts, the most commonly used materials and on mechanical testing of parts. The practical part is focused on the actual printing of test specimens from PLA, on material testing and on evaluation of mechanical properties depending on the selected printing parameters.

Keywords

Additive technology, 3D printing, FDM technology, Fused Deposition Modeling, PLA, Prusa-i3 MK3S, Stratasys F370, mechanical properties

Poděkování

Tímto děkuji pí. Ing. Zdeňce Jeníkové Ph.D za vedení a odbornou pomoc při tvorbě této práce. P. Ing. Vladislavu Andronovovi za významnou výpomoc při tvorbě zkušebních vzorků. V neposlední řadě pak děkuji ústavu technologie obrábění, projektování a metrologie ČVUT v Praze za možnost využití všech dostupných tiskáren.

Obsah

Seznam použitých symbolů a zkratk.....	9
Úvod.....	11
Cíle práce	11
Teoretická část:.....	12
1 Historie 3D tisku.....	12
2 Princip a metody 3D tisku	14
2.1 Technologie SLA.....	14
2.2 Technologie SLS.....	15
2.3 Technologie FFF/FDM	16
2.4 Binder Jetting.....	19
3 Důležité parametry v 3D tisku	20
4 Materiály pro 3D tisk.....	29
4.1 PLA.....	29
4.2 ABS.....	30
4.3 PETG.....	31
4.4 PA6.....	32
4.5 Ostatní materiály.....	32
5 Zkoušení vlastností polymerů	33
5.1 Stanovení tahových vlastností plastů	33
5.1.1 Průběh zkoušky podle ČSN EN ISO 527	34
5.1.2 Vyhodnocení tahové zkoušky	35
5.2 Stanovení houževnatosti plastů.....	38
5.3 Stanovení porozity a rozměrů těles pomocí CT.....	39
Praktická část:	40
6 Tisk těles	40

6.1	Použité tiskárny.....	40
6.2	Vytištěná tělesa	43
6.3	Tisk co největšího sklonu bez podpěry.....	47
6.4	Tisk v závislosti na poloze tělesa na podložce	48
6.5	Tisk pro porovnání tiskáren	49
6.6	Tisk pro zjištění vlivu výplně na pevnost.....	52
7	Tahová zkouška.....	53
8	Výsledky a diskuse.....	66
	Závěr.....	69
9	Bibliografie.....	71
	Seznam obrázků a grafů	75
	Seznam tabulek	76
	Přílohy	78

Seznam použitých symbolů a zkratek

RP		Rapid prototyping (výroba prototypů)
SLA		Stereolitografie (metoda 3D tisku vytvrzující kapalným materiálem laserem či projektorem)
SLS		Selective Laser Sintering (metoda 3D tisku vytvrzující práškovým materiálem laserem)
FDM		Fused Deposition Modeling (metoda 3D tisku využívající tavení materiálu ve formě struny)
FFF		Fused Filament Fabrication (jiné označení pro FDM)
UV záření		Ultrafialové záření
CAD		Computer Aided Design (počítačem podporované navrhování)
CAD model		Počítačový 3D model vytvořený v CAD softwaru
G-kód		Systémový kód obsahující dráhy nástroje
Slicer		Program na přípravu G-kódu
STL		Formát CAD souboru vhodný pro otevření ve Sliceru
T_m	[°C]	Teplota tání
T_f	[°C]	Teplota viskózního toku
T_g	[°C]	Teplota skelného přechodu
ABS		Akrylonitrilbutadienstyren, termoplast, materiál pro 3D tisk
PLA		Polylactic acid (polymléčná kyselina), materiál pro 3D tisk

PC		Polykarbonát, skupina polymerů s využitím v 3D tisku
PETG		Termoplast odvozený od PET, materiál pro 3D tisk
Filament		Název pro tiskovou strunu používaný v cizojazyčné literatuře
S	$[mm^2]$	Plocha průřezu
σ	$[MPa]$	Napětí
σ_m	$[MPa]$	Mez pevnosti v tahu
ε	$[\%]$	relativní prodloužení
ε_{tb}	$[\%]$	Jmenovité poměrné prodloužení
F_{max}	$[N]$	Zatížení
r	$[mm]$	Poloměr
d	$[mm]$	Průměr
L	$[mm]$	Délka
ΔL	$[mm]$	Změna délky
E_t	$[MPa]$	Modul pružnosti
b	$[mm]$	Šířka vzorku
h	$[mm]$	Tloušťka vzorku
a_c	$[kJ \cdot m^{-2}]$	Rázová houževnatost
E_c	$[kJ]$	Absorbovaná energie

Úvod

Aditivní technologie je v dnešní době již rozšířenou výrobní technologií, která však dále nalézá svá nová uplatnění. Postupem času se 3D tisk stal dostupným i pro širokou veřejnost, což vedlo k velkému rozšíření. Podstatou této technologie je přidávání vrstev materiálu, které dohromady tvoří finální objekt. S vývojem technologie přišlo i více metod nanášení vrstev, některé z těchto metod jsou popsány v teoretické části této práce. Podstatou této práce je krom teoretického přehledu metod, materiálů a volených parametrů i experimentální využití metody FDM, využívající výchozí materiál v pevné formě, konkrétně ve formě tiskových strun.

V praktické části jsou zkušební tělesa normovaných rozměrů, připravena touto metodou, využita ke zjištění vlivu výplně a polohy tělesa na podložce na mez pevnosti a schopnost deformace a k porovnání jednotlivých tiskáren mezi sebou. Tyto výsledky jsou poté vyhodnoceny a okomentovány.

Tato práce využívá jak levné, pro obyčejného člověka, dostupné tiskárny (Prusa MINI, Prusa MK3S), tak i o několik řádů dražší tiskárnu (Stratasys F370). Materiálem použitým v této práci je PLA, důvodem jsou jeho příznivé vlastnosti pro 3D tisk, nepoužití tohoto materiálu v předchozích pracích na ÚMI a v neposlední řadě nízká cena.

Cíle práce

Zmapování dosavadních výsledků přípravy zkušebních těles 3D tiskem metodou FDM na ÚMI. Vytisknout vzorky za různých, dosud neprováděných, postupů a otestovat tělíska.

- Vytvořit přehled metod 3D tisku polymerních materiálů.
- Porovnat výsledky testování těles zhotovených 3D tiskem na ÚMI.
- Navrhnout další způsoby přípravy těles.
- Vzorky vytisknout, testovat a výsledky vyhodnotit.

Teoretická část:

1 Historie 3D tisku

3D tisk neboli aditivní technologie výroby (Additive Manufacturing) je proces, při kterém vzniká model nebo prototyp z digitálního souboru vytvořeného na počítači technologií vrstvení materiálu (nanášením materiálu po jednotlivých vrstvách). [1] 3D tisk se poprvé objevil již začátkem osmdesátých let minulého století v Japonsku. Tato technologie je přesto velice aktuální a odbornou veřejností je brána jako velmi perspektivní do budoucna. [2]

V počátcích této, dnes již velmi rozšířené, technologie bylo hlavním cílem co nejrychleji vytvořit prototypy, například pro vývoj průmyslových celků a součástí. Tato metoda výroby je i dnes označována jako Rapid Prototyping (RP). [3] Prvním, kdo použil metodu 3D tisku (konkrétně vytvrzení fotopolymeru pomocí UV záření), byl Japonec Dr. Hideo Kodama, kterému se však kvůli nedostatečné patentové specifikaci nepodařilo tuto metodu patentovat. [2] Vznik 3D tisku tak datujeme až k roku 1986, kdy si nechal Charles Hull patentovat svůj stereolitografický přístroj. Metoda patentovaná v tomto roce se používá dodnes a bývá označována zkratkou SLA (spočívá ve vytvrzování světlocitlivé pryskyřice pomocí světelného paprsku). [3] Charles Hull později založil společnost 3D Systems – jednu z dodnes největších společností v oblasti 3D tisku. [2] Další stále používaná technologie byla vyvinuta v roce 1988. Zasloužil se o to Carl Deckard, který ještě jako vysokoškolský student vynalezl metodu zvanou SLS, založenou na spékání jemného prášku laserem. [2] S dnes nejdostupnější metodu 3D tisku přišel v roce 1988 Scott Crump. S. Crump je inženýr, který ve své garáži experimentoval s vývojem stroje, který měl automaticky vytvářet 3D objekty pomocí natavení tiskového materiálu, nanesení na podložku a jeho následného tuhnutí. Tímto vznikla technologie FDM. Po patentování této technologie založil Scott Crump společně se svou ženou společnost Stratasys, ve které dodnes působí jako předseda představenstva. [2]

S nástupem moderních technologií a vypršením některých patentů se vývoj 3D tisku neubíral výhradně směrem k prototypování, ale i směrem k výrobním aplikacím (Rapid Manufacturing), či k tvorbě specifických nástrojů (Rapid Tooling). [1] [3] Díky snížení nákladů na pořízení tiskárny se časem dostala tato technologie i do kancelářského prostředí. Dnes existuje velké množství modelů tiskáren v ceně do 50 tisíc Kč. Velkou zásluhu na tom má projekt RepRap doktora Adriana Bowyerema, který přišel s ideou návrhu 3D tiskárny, která by si vlastní součástky tiskla sama. Díky licenci „open source“ celého projektu došlo k angažování nadšenců z celého světa a vzniku mnoha druhů tiskáren. Jedním z nadšenců je například Čech Josef Průša, který si na tomto nápadu založil úspěšný start up. 3D tisk tak našel uplatnění v dalších odvětvích. [3]

2 Princip a metody 3D tisku

Jak již bylo zmíněno v úvodu předchozí kapitoly, 3D tisk, neboli aditivní technologie, je proces, při kterém se materiál neodebírá, nýbrž je přidáván vrstvu po vrstvě, což vede ke vzniku finálního 3D objektu. [1] Z kapitoly o historii 3D tisku plyne, že existuje více technologií, kterými lze dosáhnout požadovaný výtisk. Volba vhodné technologie záleží na mnoha aspektech, od volby tvaru součásti až po požadavky na mechanické vlastnosti. Jedním z častých způsobů třídění metod 3D tisku je podle podoby tiskového (vstupujícího) materiálu na [3] [4]:

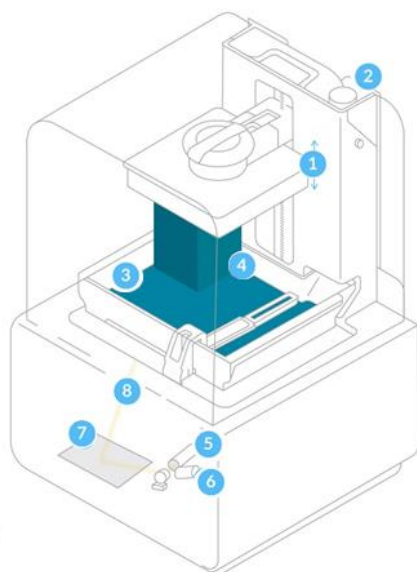
- Kapalným materiál, využívaný metodou Stereolitografie (SLA)
- Práškový materiál, který je využívaný metodou Selective Laser Sintering (SLS)
- Tuhý materiál v podobě tiskových strun, používaný metodou Fused Deposition Modeling (FDM) [3] [4]

2.1 Technologie SLA

Metoda Stereolitografie (SLA) používá kapalným materiál v podobě fotocitlivé pryskyřice. Pryskyřice reaguje na určité vlnové délky dopadajícího paprsku vysílaného z laseru nebo projektoru a dojde ke spojení krátkých molekulárních řetězců (k tzv. zesíťování) – k vytvrzení pryskyřice. Tím vzniká pevná struktura výtisku. Jednotlivé vrstvy vznikají posunem tiskové podložky. [5] SLA tiskárny pracují buďto s osvitom jen části plochy pomocí UV laserového paprsku, nebo s osvitom celé tiskové podložky pomocí projektoru, či s maskováním tiskové vrstvy LCD displejem. [3] Výhodou SLA je bezpochyby přesnost tisku, ať už co se týče vytištění detailů, či dosažení rozměrové přesnosti. Porovnání technologií tisku z hlediska charakteristik drsnosti povrchu je obtížné, jelikož v aditivní technologii rozhoduje o drsnosti povrchu mnoho faktorů. Pro její snižování se využívají dokončovací operace jako leštění, či vyhlazování. [5] Výše zmíněná technologie je zobrazena na obr. 1.

Stereolithography

SLA Printer



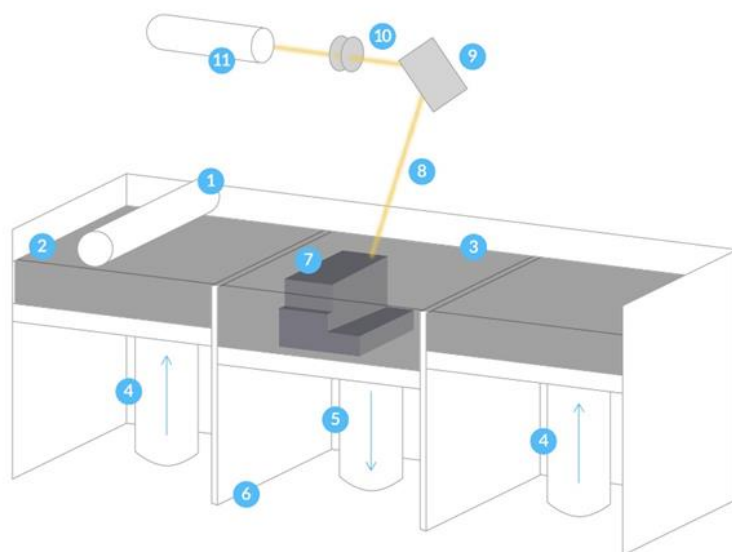
- 1 stavební platforma
- 2 kazeta s pryskyřicí
- 3 pryskyřice
- 4 tištěná část
- 5 laser
- 6 galvanometr
- 7 zrcadlo
- 8 paprsek laseru

Obrázek 1: Technologie SLA [35] – UPRAVENO

2.2 Technologie SLS

Materiál v podobě prášku využívá technologie selektivního laserového spékání (SLS). Kromě plastu (nejčastěji polyamid PA12) se tato technologie používá i pro další materiály jako ocel, hliník či keramiku. Dají se s ní vytvářet složité struktury a dosahuje se dobré přesnosti. Nicméně tiskárny využívající tuto technologii jsou drahé a používají se především v profesionálním 3D tisku. Zdrojem energie je výkonný laser, který spéká přehřátý jemný prášek v ploše řezu, kde se má nacházet výtisk. Po spečení každé vrstvy klesne tisková plocha ve směru osy Z (o velikost jedné vrstvy materiálu) a pomocí válce se nanese další vrstva prášku. Celý proces (viz obr. 2) se opakuje až do vzniku finální struktury. [6]

Selective Laser Sintering



SLS Printer

- 1 nanášecí válec
- 2 zásobník s práškem
- 3 práškové lůžko
- 4 podávací systém
- 5 pohyblivé dno
- 6 stavební komora
- 7 vytištěná součást
- 8 paprsek laseru
- 9 zrcadlo
- 10 čočky
- 11 laser



Obrázek 2: Technologie SLS [35]– UPRAVENO

2.3 Technologie FFF/FDM

Pevný materiál, konkrétně tiskové struny, používá technologie nanášení natavené struny (FFF), která bývá označována i zkratkou FDM (Fused Deposition Modeling). Zkratku FDM má však patentovanou firma Stratasys. Tisková struna je navinuta na cívku. [7]

Před samotným tiskem se musí vytvořit CAD model tištěné součásti, který se převede do formátu STL. Tento formát se poté otevře ve speciálním programu (Sliceru), ze kterého po nastavení parametrů (detailněji popsáno v kapitole 3) vyjde strojový G-kód. Tento kód – textový soubor je vložen do tiskárny (nejčastěji na SD kartě) a určuje pohyby a nahřívání tiskové hlavy a podložky. [7] Z cívky putuje struna materiálu do trysky umístěné v tryskové hlavě, která vykonává vertikální posuvný pohyb na ose Z a horizontální posuvný pohyb na ose X. Pohyb po ose Y koná tisková podložka. [3] V tiskové hlavě je materiál zahřát topným tělesem u semikrystalických termoplastů nad teplotu tání (T_m), při které dochází ke změně semikrystalické struktury polymeru a k přechodu do viskózního stavu. U amorfních termoplastů

dochází k zahřátí nad teplotu viskózního toku (T_f). Překonáním charakteristické teploty skelného přechodu (T_g), dojde ke změně ze sklovitého stavu na stav kaučukovitý čili k rapidnímu snížení modulu pružnosti, tvrdosti a křehkosti. Při zahřátí nad teplotu T_f dojde ke ztrátě elastických vlastností z kaučukovitého stavu a k toku materiálu. [8] Po dosažení daných teplot dojde k vytlačení materiálu na vyhřívanou podložku.

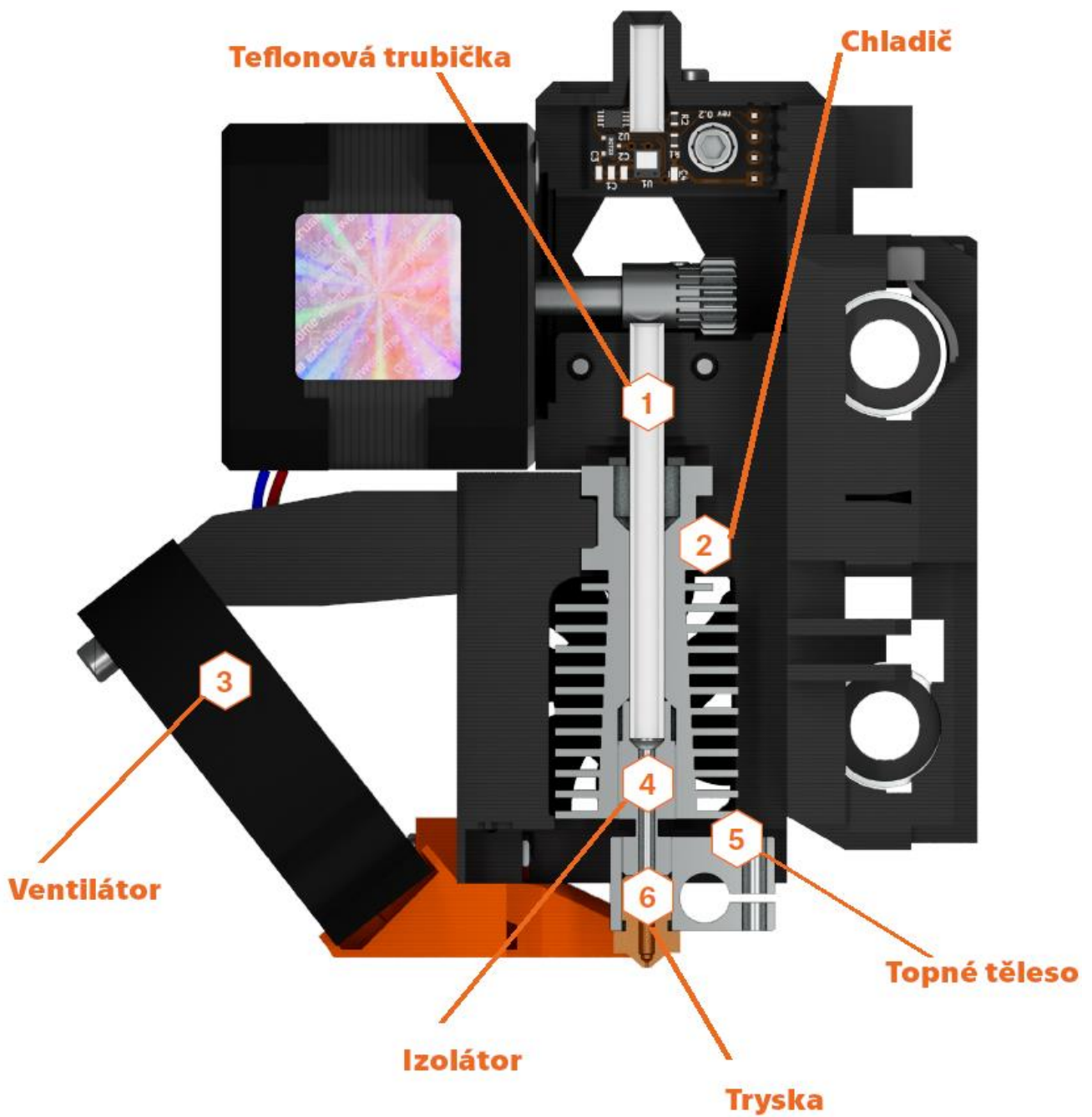
V tiskové hlavě (popsané na obr. 3) se nachází i chladič, který slouží k vytvoření co nejužšího pásma mezi pevným a viskózním stavem odvedením tepla. Toto teplo by se jinak nekontrolovaně šířilo směrem k nenatavenému materiálu v teflonové trubičce, kterou putuje materiál směrem k trysce. K zahřátí tiskové hlavy využíváme elektrické topné těleso. Toto topné těleso je umístěné v materiálu, který dobře vede teplo (nejčastěji hliník). Podložka je vyhřívána z důvodu zabránění kroucení součástek vlivem tepelné roztažnosti polymerních materiálů.

Podložka koná horizontální pohyb ve směru osy Y. Pohyby jednotlivých komponent jsou popsány pro kartézskou stavbu tiskárny, která bude použita v praktické části. Po výtisku jedné vrstvy dojde k posunu tryskové hlavy v ose Z o výšku nanesené vrstvy. Schéma procesu je znázorněno na obr. 4.

Tiskárny založené na metodě FDM pracují se dvěma druhy materiálů. S materiálem pro výrobu navržené součásti a s materiálem na tvorbu podpor sloužících k podepření materiálu při tvorbě mostů či dosažení vysokého sklonu součásti vůči svislé ose tisku. [3] [7] Podpory jsou po dokončení tisku odstraněny. Josef Průša ve své knize uvádí nutnost používat podpory pro sklon vyšší než 45° (sklon mezi svislou osou a stěnou modelu). [3] V praktické části mé práce bude tento údaj prověřen.

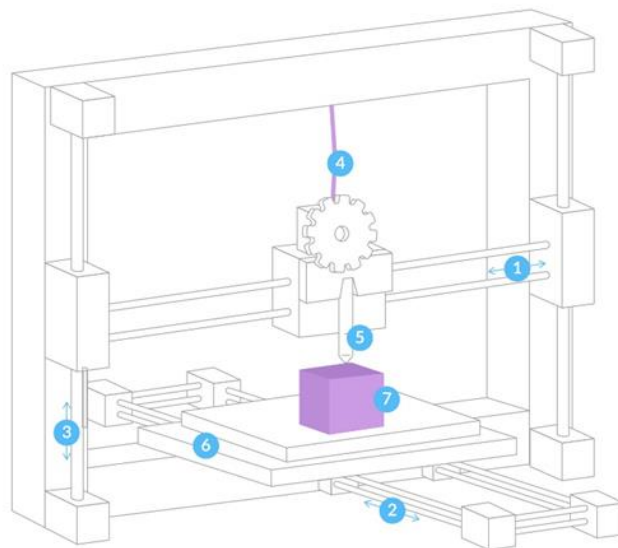
Technologie FDM se stala velmi oblíbenou v amatérském sektoru díky její dostupnosti a jednoduchosti. Nevýhody oproti ostatním technologiím jsou nižší dosažitelná přesnost a viditelnost tištěných vrstev.

Využití se však našlo mimo jiné i v profesionálních aplikacích v automobilovém průmyslu či v rapid prototypingu. [7]



Obrázek 3: Schéma tiskové hlavy v řezu [3] - UPRAVENO

Fused Deposition Modeling



FDM Printer

- 1 posun v ose x
- 2 posun v ose y
- 3 posun v ose z
- 4 tisková struna
- 5 tryska
- 6 tisková podložka
- 7 vytištěná část



Obrázek 4: Technologie FDM [35]– UPRAVENO

2.4 Binder Jetting

Binder Jetting je metoda aditivní technologie podobná technologii SLS. Používá však dva materiály zároveň. První ve formě prášku, který se nejprve nanese na tiskovou plochu, nad kterou je umístěna tisková hlava, pohybující se ve směru os X a Y. Druhý, nejčastěji kapalný, materiál slouží jako pojivo a je umístěn v tiskové hlavě. Pojivo je z trysek v tiskové hlavě vytlačováno a spojuje vrstvy na podložce. Po tisku každé vrstvy klesne podložka o výšku vrstvy ve směru osy Z. Po dokončení tisku následuje vytvrzení pojiva, po vytvrzení dochází k vyjmutí a očištění výtisku. U kovových výtisků navíc dochází k dalším operacím pro zvýšení tvrdosti materiálu. [9]

Binder Jetting lze použít pro nerezovou ocel, některé typy polymerů (ABS, PLA, PC) a pro keramiku. Pokud je v tiskové hlavě umístěno barvivo, je možné tisknout barevně. [9]

Metod v oboru aditivních technologií existuje více, většina však funguje na podobném principu jako technologie popsané v této práci. Z metod využívajících práškovou formu materiálu bych uvedl Selective Laser Melting (SLM), s kapalným materiálem pracuje například PolyJet Printing. Pevný materiál, konkrétně nastříhaný plastový papír, který je lepen na sebe vrstvou po vrstvě, zpracovává Laminated Object Manufacturing, jejich popis však není cílem této práce. [4]

3 Důležité parametry v 3D tisku

Během celého procesu výroby 3D tištěného dílu svými jednotlivými kroky zásadně ovlivňujeme vlastnosti finálního produktu. Již při vytváření CAD modelu by měl být brán ohled na technologičnost konstrukce. Především co se týče vyrobiteľnosti modelu danou metodou tisku, co možná nejvyšší úspory materiálu (například pomocí odstranění podpor), s tím spojené snížení hmotnosti dílu a doby tisku. Pokud je od dílu vyžadována předepsaná pevnost, je potřeba brát ohled i na směr kladení vrstev. [3] [10] Dnes již existují programy pro topologickou optimalizaci 3D tisku, které dokáží po zadání působících napětí vytvořit ideální stavbu součásti splňující jak mechanické, tak designové požadavky. Příkladem takového programu je DesignSpace od firmy Ansys nebo Altair Inspire. [10] Kromě vytvoření modelu v CAD softwaru se používá i metoda 3D skenu a fotogrammetrie. V obou případech se jedná o převedení reálného objektu do počítačového souboru a následného zpracování do 3D modelu. Nejčastěji používané CAD softwary jsou Blender, Openscad, SolidWorks či Autodesk Inventor, který byl použit k vytvoření modelu v praktické části této práce. [3] [11]

Samotné parametry tisku se volí v programu zvaném Slicer. Existuje celá řada slicerů, v praktické části této práce bude použit PrusaSlicer pro práci na tiskárně Průša I3 MK3S a slicer GrabCAD pro práci s tiskárnou Stratasys F370. Ve sliceru dochází k převodu 3D modelu na strojový G-kód. K tomu je potřeba zvolit celou řadu různých parametrů, které budou mít zásadní vliv na vlastnosti tištěného dílu. Tyto parametry jsou:

Hustota výplně – anglicky infill. Je udávána v procentech. [3] Čím vyšší je procento infillu, tím bude objekt více vyplněn (bude v něm méně vzduchových mezer). Studie prokazují, že vyšší hodnota infillu vede k výraznému zvýšení pevnosti s ovlivněním elastických vlastností. S rostoucím infillem však výrazně stoupá spotřeba materiálu a doba tisku. Obvyklá hodnota je 20 %. U součástí vyžadujících předepsanou pevnost i nad 70 %. Nastavit lze také úhel výplně. [12] [13]

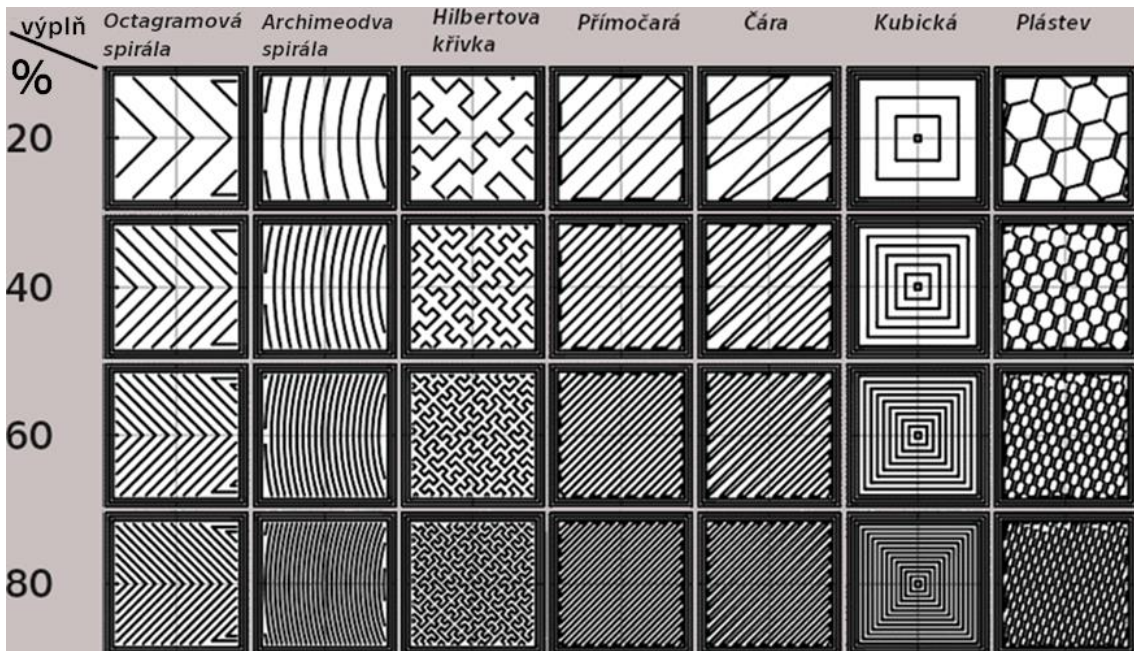
Vlivem procentuální hustoty výplně na pevnostní vlastnosti se zabývalo mnoho studií a odborných prací. Bc. Jiří Marek ve své práci došel k následující závislosti při použití materiálu ABS tisknutého metodou FDM, vzor stoprocentní výplně byl přímočarý, u ostatních výplní byla použita výplň ve tvaru plástve: [14]

Tabulka 1: Vliv procenta výplně na mez pevnosti v tahu [14]

Procento výplně (infill) [%]	Průměrná naměřená pevnost v tahu [MPa]	Poměr vůči pevnosti při 100% výplni
100	45	1,00
80	33	0,73
50	26	0,58
15	20	0,44

Závislost ukazuje, že nárůst pevnosti není lineární, roli při zvyšování pevnosti tedy hrají i další faktory.

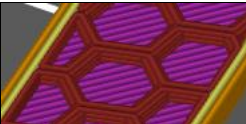

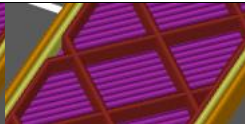
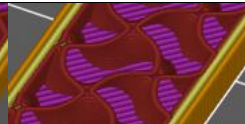
Vzory výplně – anglicky infill patterns. Slicery nabízejí různé vzory výplně, které rovněž výrazně ovlivňují pevnost. Obvykle se liší vzor výplně od spodní vrstvy, který bývá volen přímočarý. Na obr. 5 můžeme vidět příklady některých vzorů výplně při různých hodnotách infillu. [3] [12]



Obrázek 5: Vzory výplně při různých hodnotách infillu [3] - UPRAVENO

Vliv vzoru výplně na mechanické vlastnosti zkoumali ve svých pracích Bc. Ondřej Vích [15] a Bc. Jiří Marek. [14] O. Vích zkoumal vliv vzoru výplně na rázovou houževnatost u materiálu PET-G, J. Marek potom na pevnost u materiálu ASA. Pro materiál ASA byly z hlediska meze pevnosti porovnány tyto vzory výplně:

Tabulka 2: porovnání meze pevnosti v tahu pro různé vzory výplně, materiál ASA, 80% výplň [14]

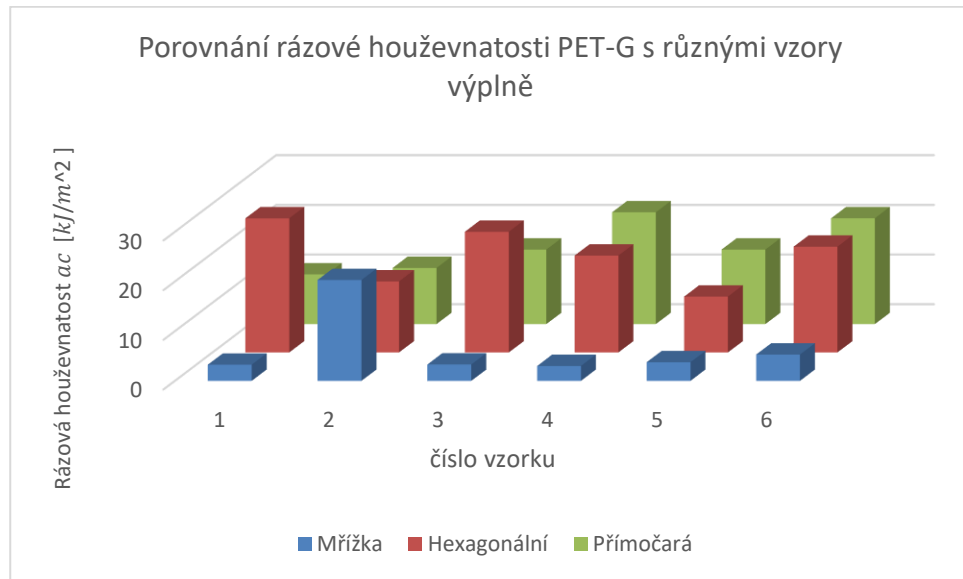
Vzor výplně				
	Plástev	Přímočará	Mřížka	Gyroid
σ_m [MPa]	21,9±0,4	35,1±0,1	22,0±0,9	22,4±0,3
poměr	0,62	1,00	0,63	0,64

obrázky v tabulce 2 - VLASTNÍ

řádek 3: procentuální poměr vůči přímočarému vzoru

Nevětší pevnost vykazuje přímočarý vzor, což je dané orientací materiálu ve směru deformace. Ostatní struktury vykazují téměř stejné hodnoty meze pevnosti, je to opět dané orientací vůči působícímu napětí. [3] [14]

O. Vích na materiálu PET-G zkoumal vliv vzoru výplně na rázovou houževnatost a_c [kJ/m^2]. Výsledky jeho zkoušek jsou uvedené v grafu 1:

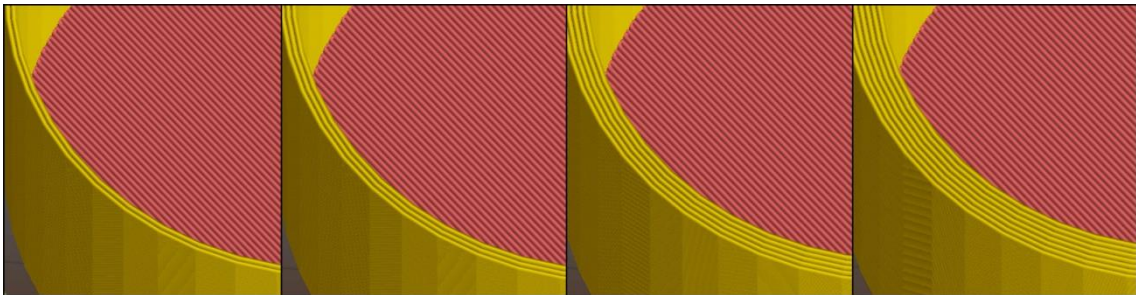


Graf 1: Porovnání rázové houževnatosti PET-G s různými vzory výplně – VLASTNÍ; data [15]

Z grafu je vidět rozptýl naměřených hodnot při zkoušení těles, nejnižší průměrnou hodnotu rázové houževnatosti ($6,46 \text{ kJ}/\text{m}^2$) vykazuje vzor výplně mřížka. Měření je však negativně ovlivněno výsledkem druhého vzorku, který by měl být podle Grubbsova testu vyřazen. I u dalších dvou struktur je směrodatná odchylka vysoká, u přímočaré struktury vyšla průměrná rázová houževnatost $15,8 \text{ kJ}/\text{m}^2$, nejvyšší průměrnou rázovou houževnatost však vykazuje hexagonální struktura ($19,6 \text{ kJ}/\text{m}^2$). Pořadí by se nezměnilo ani po vynechání statisticky odlišných nepřijatelných hodnot. [15]

Perimetr – (angl. Perimeters), neboli obvodové stěny (znázorněné na obr. 6), je parametr udávající počet obvodových stěn vytištěného objektu. Dle odborných studií je potvrzeno, čím vyšší počet obvodových stěn, tím vyšší tuhost (modul pružnosti) a pevnost. S vyšším počtem perimetrů se však

zvyšuje i spotřeba materiálu a doba tisku. Podobným parametrem zvaným Solid layers se nastavuje počet plných spodních a vrchních vrstev. [16] [3] [13]



Obrázek 6: Různé nastavení perimetrů 2, 3, 5 a 6 [3]

Závislost meze pevnosti v tahu na počtu perimetrů ve své práci zkoumal Bc. Jiří Marek. Při použití materiálu ABS došel k těmto výsledkům: [14]

Tabulka 3: Vliv počtu perimetrů na mez pevnosti v tahu, 100% výplň [14]

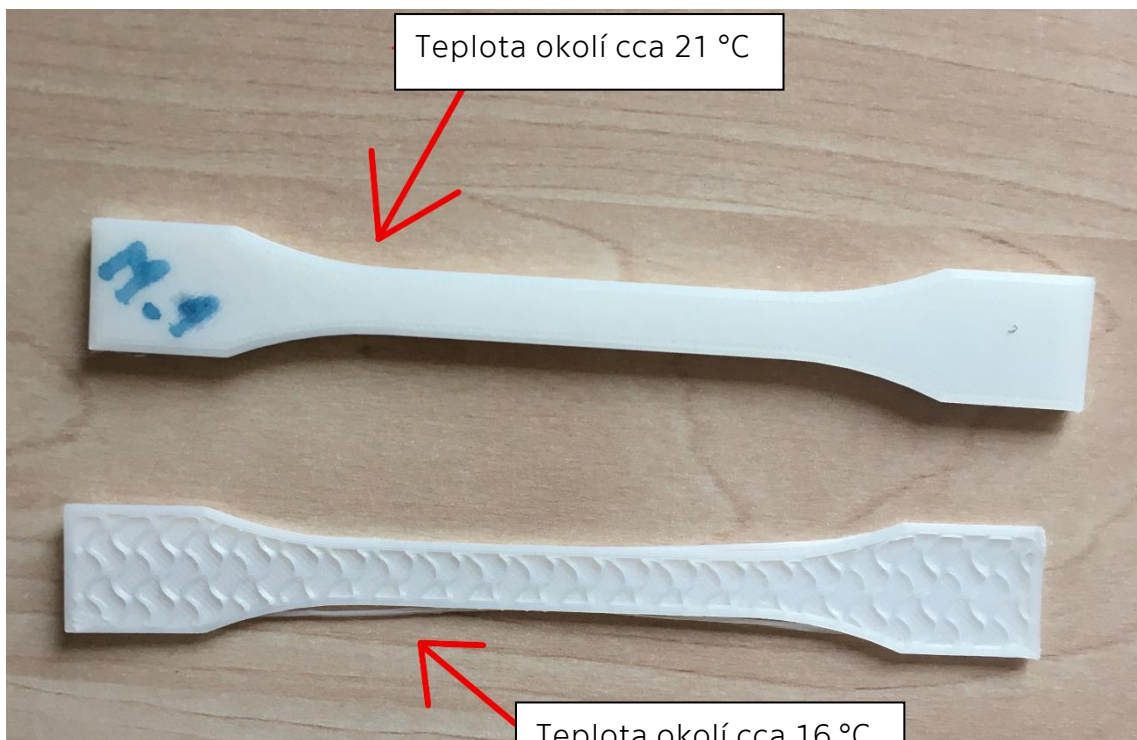
Počet perimetrů	Mez pevnosti v tahu σ_m [MPa]	Poměr vůči pevnosti při 10 perimetrech
10	44	1,00
5	42	0,95
0	40	0,91

Studie opět prokázala vliv počtu perimetrů na pevnostní vlastnosti, nicméně jak je vidno z pravého sloupce tabulky 3, vliv není zdaleka tak velký jako u hustoty výplně. Hlavní roli hraje orientace vláken perimetru ve směru zatížení, tím dochází ke zlepšení pevnosti v tahu. Při tisku tělesa bez perimetrů se pevnost snížila o 9 %.

Šířka vrstvy – neboli layer width je šířka vlákna vytlačeného při jednom přejezdu tryskovou hlavou nad podložkou. Šířka vrstvy je přímo ovlivněna průměrem trysky. Při snižování šířky vrstvy se zvyšuje doba tisku, jelikož za stejný čas nanášíme menší množství materiálu, ale zároveň dochází ke zlepšení povrchu součásti. Vliv na celkovou pevnost je mírný. [12] [17] Šířka vrstvy je vždy menší než průměr trysky. Výrobci doporučují maximální hodnotu 80 % šířky trysky. Nejčastější průměry trysek jsou 0,4 mm a 0,6 mm. [12] [17]

Výška vrstvy – jedním z nejdůležitějších parametrů je layer height neboli výška vrstvy. Jedná se o výšku (rozměr v ose Z) materiálu naneseného během jednoho přejezdu trysky. Výška vrstvy se může lišit ve složitých a jednoduchých místech modelu díky funkci variabilní výšky vrstvy. Snížením výšky vrstvy se zlepší kvalita povrchu (nebudou viditelné jednotlivé vrstvy) a dosáhne se detailnějšího tisku, logicky však opět dojde k prodloužení tiskového času. PrusaSlicer nabízí základní výšky vrstvy od 0,05 mm (Ultradetail) do 0,30mm (Draft). [3] [12] [11]

Teploty – jsou další důležité parametry. Jedná se o teplotu filamentu, která závisí na použitém materiálu a jeho teplotě tání T_m , při semikrystalické struktuře termoplastu a na teplotě viskózního toku (T_f) při amorfní struktuře termoplastu. Nastavuje se však i teplota podložky. Teploty jsou měřeny termistory. Ideální teplotu pro tisk udává výrobce tiskové struny. Pro materiál PLA použitý v této práci je ideální teplota trysky 215 °C a teplota podložky 50-60 °C. [12] [18] Roli hraje i teplota a relativní vlhkost prostředí, ve kterém byl tisk realizován. Na obr. 7 můžeme vidět vzorek vytisknutý za vhodných podmínek (Vzorek označen M.1) a vzorek vytisknutý za podmínek nevyhovujících. Při nízké teplotě v místnosti dojde k selhání tisku.



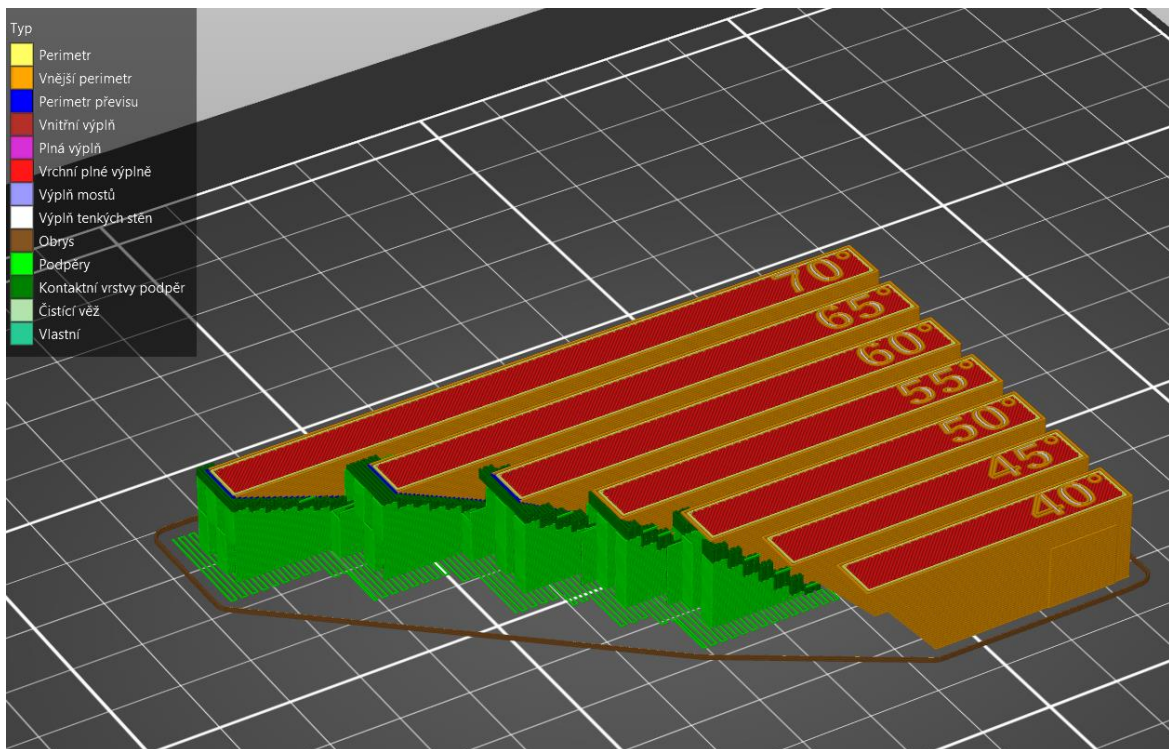
Obrázek 7: Vliv teploty okolí na tisk, vzor výplně Gyroid-VLASTNÍ

Rychlost tisku – jak již bylo uvedeno, rychlost tisku závisí na mnoha dalších parametrech. Existuje i možnost nastavit rychlost pohybů tiskárny. Při nastavení příliš vysokých hodnot bude tisk nekvalitní. Příklady nastavení rychlostí tisku v programu PrusaSlicer jsou zobrazeny na obr. 8 – vlevo nastavení velmi detailního tisku, vpravo rychlý tisk bez většího zřetele na tisk detailů.

Rychlosti pohybů tiskárny	Rychlosti pohybů tiskárny
Perimetry: 30 mm/s	Perimetry: 50 mm/s
Malé perimetry: 20 mm/s nebo %	Malé perimetry: 30 mm/s nebo %
Vnější perimetry: 20 mm/s nebo %	Vnější perimetry: 35 mm/s nebo %
Výplň: 30 mm/s	Výplň: 85 mm/s
Plná výplň: 30 mm/s nebo %	Plná výplň: 80 mm/s nebo %
Vrchní plně výplně: 20 mm/s nebo %	Vrchní plně výplně: 40 mm/s nebo %
Podpěry: 30 mm/s	Podpěry: 45 mm/s
Kontaktní vrstvy podpěr: 100% mm/s nebo %	Kontaktní vrstvy podpěr: 100% mm/s nebo %
Mosty: 20 mm/s	Mosty: 30 mm/s
Výplň tenkých stěn: 20 mm/s	Výplň tenkých stěn: 40 mm/s
Netiskové rychlosti	Netiskové rychlosti
Rychloposun: 180 mm/s	Rychloposun: 180 mm/s
Modifikátory	Modifikátory
Rychlost první vrstvy: 20 mm/s nebo %	Rychlost první vrstvy: 20 mm/s nebo %

Obrázek 8: Porovnání rychlostí pohybu tiskové hlavy v programu PrusaSlicer - VLASTNÍ



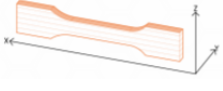
Podpěry – anglicky Supports. Slouží k podepření materiálu, který by jinak na součásti nedržel, visel by ve vzduchu nebo svírá s podložkou příliš malý úhel. Některé tvary se bez podpěr vytisknout nedají, ale cílem je používání podpěr minimalizovat z důvodu úspory času a materiálu. Pro lepší představu jsou znázorněny na obr. 9 zeleně. Obrázek 9 je pouze ilustrační, tento díl jsme skutečně tiskli, ale podpěry byly blokovány. Použití či blokování podpěr lze ve většině slicerů nastavit. Některé je však vyžadují a vynechat je nejde. Po tisku jsou podpěry odstraňovány v post processingu. [12] [3]



Obrázek 9: Díl zobrazený v PrusaSlicer, záměrné nastavení tiskových podpěr (v obr. zeleně) - VLASTNÍ

Orientace tisku tělesa – orientace tisku není voleným parametrem, ale přímo ovlivňuje mechanické vlastnosti výtisku. Orientací je myšlen různý způsob postavení tělesa během tisku. Rozdílné vlastnosti v závislosti na orientaci uvádějí i výrobci filamentu. [19] Tento trend ověřoval ve své práci [20] Bc. Tomáš Zavadil, který zkoumal pevnost v tahu u vzorků tištěných z materiálu ABS. Vzorky byly tištěny horizontálně, vertikálně a „na hraně“. Výsledky této práce jsou uvedeny v tabulce 4. Práce T. Zavadila potvrdila hypotézu, že horizontálně tištěné vzorky budou prokazovat vyšší mez pevnosti v tahu než ty tištěné vertikálně. Tahová zkouška byla provedena podle normy ČSN EN ISO 527-1. [20] [21]

Tabulka 4 Porovnání meze pevnosti v tahu u různých orientací tisku vzorků [19] [20]

Orientace tisku	„vertikálně“ 	„horizontálně“ 	„na hraně“ 	Struna filamentu ABS
Mez pevnosti v tahu σ_m [MPa]	23,1	32,1	33,5	40,8
Poměr vůči mezi pevnosti v tahu struny ABS	0,57	0,79	0,82	1,00

Kombinací výše zmíněných parametrů dosahujeme požadovaných vlastností součásti. Při prototypování je cílem vytvořit odpovídající model v krátkém čase. Na takový model nejsou většinou kladeny vysoké pevnostní požadavky. Naopak při tvorbě funkčních částí je tisk zpravidla časově náročnější. Dosahuje se však lepších mechanických vlastností. Struktura takových součástí je ještě před uvolněním do výroby testována na strojních zařízeních jako počítačový tomograf (pro nedestruktivní zkoumání materiálů) či mikrotom, což je zařízení, pomocí kterého se odeberou tenké fólie materiálu, které se poté zkoumají světelným mikroskopem. [22] Svou roli, co se týče kvality 3D tisku, hraje i umístění součásti na tiskové podložce, případně vzdálenost mezi tištěnými objekty a v neposlední řadě samozřejmě samotná tiskárna. Téma bude blíže rozebráno v praktické části této bakalářské práce, se zvláštním důrazem na mechanické vlastnosti dílů. Vlastnosti výsledného výtisku jsou výrazně ovlivněny materiálem, ze kterého je filament (tisková struna) vyroben. Tomuto tématu se věnuje další kapitola.

4 Materiály pro 3D tisk

Díky již pokročilému rozšíření aditivní technologie je v tomto odvětví používáno značné množství materiálů. Rozsah této práce neumožňuje popis všech materiálů. Z toho důvodu budou popsány materiály využívané metodou FDM. Každý materiál má specifické vlastnosti a vyžaduje různé nastavení tiskárny, proto je znalost materiálů tiskových strun klíčová. Stejně materiály od různých výrobců mohou mít odlišné vlastnosti a lišit se mohou také vlastnosti různě barevných materiálů od stejného výrobce. Výrobci u námi použitých materiálů však uvádějí stejné tabulkové hodnoty mechanických vlastností pro různě barevné materiály. [3] [11]

4.1 PLA

PLA je zkratka z anglického Polyactic acid (kyselina polymléčná). Jedná se o nejčastěji používaný materiál metodou FDM. Důvodů velké oblíbenosti vláken PLA je více. Jedním z nich je nízká teplota tání 150-175 °C [11], díky které není třeba vynaložit tolik energie na natavení materiálu. Mezi další výhody patří nízká teplotní roztažnost, která zabraňuje kroucení výtisku a odlepování od podložky důsledkem chladnutí. Nízká teplota tání sebou však nese i negativní vlastnosti, jako nízká teplotní odolnost – u PLA klesá mechanická pevnost již při 60 °C. [18] Vlákno z PLA je poměrně levné, kilogram tiskové struny v době psaní práce vyšel na 600 Kč. Pro tiskaře se jedná o nejjednodušší materiál pro tisk, výhodou je i malý zápach vznikající při extruzi. Teplota trysky se doporučuje 215 °C, teplota vyhřívané podložky pak 50-60 °C. [18]

Tiskové struny kyseliny polymléčné se vyrábí synteticky ze škrobu (nejčastěji obilného), jedná se tak o zřejmě nejekologičtější materiál v oblasti aditivní výroby. Rozpustné je PLA pouze v některých chemikáliích, proto se pro spojování více výtisků dohromady doporučuje používat lepidla. [18]

Krom nízké teplotní odolnosti je nevýhodou i křehkost, při mechanickém namáhání na ohyb často dochází k praskání. PLA zároveň není

vhodné pro venkovní použití kvůli nízké odolnosti proti UV záření a povětrnostním vlivům. [18] [3] Díky velmi dobrým tiskovým vlastnostem, široké dostupnosti a poměrně nízké ceně použijí tento materiál v praktické části této práce.

4.2 ABS

Akrylonitrilbutadienstyren neboli ABS je, co se týče dostupnosti, druhým nejoblíbenějším materiálem v aditivní výrobě metodou extruze polymeru. [11] ABS byl zároveň prvním dostupným tiskovým materiálem, jeho kvalita se postupem času neustále vylepšuje, ale v současné době bývá nahrazován materiálem ASA (Acrylonitrilestyreneacrylate), který byl vyvinut jako nástupce ABS. [3]

ABS je odolnější proti opotřebení, pevnější a má i lepší teplotní odolnost než PLA. Je vhodný pro venkovní i vnitřní použití. Vyšší teplotní odolnost zaručuje stabilní mechanické vlastnosti až do 98 °C, což je podstatně více než u PLA. Nevýhodou je velmi vysoká tepelná roztažnost způsobující kroucení výtisku a komplikace při chladnutí. Z toho důvodu je vhodné ABS tisknout v dobře zateplené místnosti na tiskárně s vyhřívanou podložkou. Kvůli intenzivnímu zápachu se často používají i kryty a odvětrávání. ABS se nehodí k tvorbě rozměrných výtisků ani k velmi detailnímu tisku. Cena vlákna ABS je obdobná jako u PLA. [18]

Bezesporu velkou výhodou ABS i ASA je možnost post processingu. Jedná se nejčastěji o vyhlazování vrstev modelu acetonovými výpary, či o lepení součástí acetonem. Výsledkem jsou tak často velice lesklé a na pohled povedené výtisky. [3]

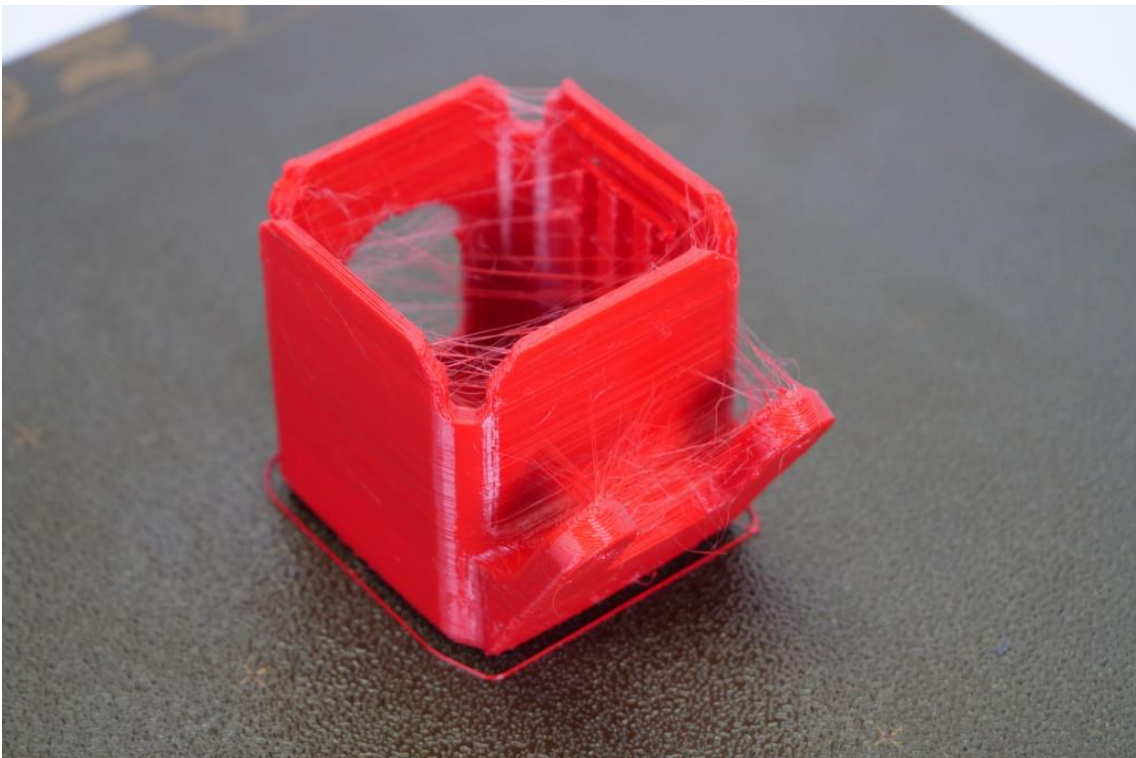
Teplota trysky pro extruzi se doporučuje 250 °C, teplota podložky pak mezi 80 a 110 °C v závislosti na rozměrech modelu – čím větší model, tím vyšší teplota. [18]

4.3 PETG

Polyethylentereftalát glykol je materiál používaný zejména pro tisk mechanicky namáhaných částí. Důvodem jsou velmi dobré vlastnosti, ať už tiskové, tak i pevnostní. Podobně jako ABS tak i PETG má vysokou teplotní odolnost, na rozdíl od ABS má však nízkou tepelnou roztažnost, což umožňuje snazší tisk. Materiál PETG vykazuje malou smršťivost. Další výhodou je snadnější recyklovatelnost a mírnější zápach oproti ABS. [3] [18]

Díky glykolu, který je aditivem ve výrobním procesu je struna méně křehká a je průhledná. Houževnatost ve spojení s pružností dělá z PETG velice zajímavý materiál. Jeho cena je přibližně 700 Kč za kilogram vlákna.

Nevýhodou PETG je takzvané stringování, což je jev, se kterým se můžeme setkat nejčastěji při kladení první vrstvy. Jde o nechtěné vytvoření tenkých vláken plastu na konci trysky, která je poté tahá za sebou při přejezdech tiskové hlavy. Tento jev vede nejčastěji ke znehodnocení výtisku, příklad stringování je na obr.10. [3] [18]



Obrázek 10: Příklad výtisku znehodnoceného vytvářením stringů při tisku součásti [18]

PETG je zároveň materiálem, který firma Průša Research využívá pro tisk (výrobu) prodávaných tiskáren. Teploty tisku jsou obdobné jako u ABS. Teoreticky se PETG dá tisknout i bez vyhřívané podložky. [18]

4.4 PA6

Polyamidová (PA6) vlákna jako materiál pro tiskové struny používáme pouze pro výtisky, u kterých vyžadujeme mechanickou pevnost. Jedná se o flexibilní, všestranný materiál. Má vysokou teplotní odolnost, je odolný vůči tření. Vyrábí se pod obchodním označením Nylon. Nevýhodou jsou hygroscopické vlastnosti Nylonu (absorbuje vlhkost). Vlákna tak musí být skladována v suchu, aby nedošlo k vytvoření bublin na výtisku. Teploty extruze jsou vyšší než u předchozích materiálů, tryska musí být zahřáta na 235 - 260 °C, podložka na 100 - 130 °C. [23]

PA6 (polyamid 6) je také materiál široce používaný v automobilovém průmyslu. Vyčnívá svou trvanlivostí, vysokou pevností a pružností. Cena Nylonu v době psaní práce byla přes 1600 Kč za kilogram struny. [23]

4.5 Ostatní materiály

Portfolio materiálů používaných metodou extruze nataveného polymeru je celá řada. Dá se očekávat, že se stále se vyvíjející technologií bude množství používaných materiálů stále narůstat, do budoucna se předpokládá větší využití aditiv, která mohou materiálům dodat důležité vlastnosti. [11]

Kromě již zmíněných materiálů se používají i materiály FLEX, které jinak nazýváme částečně ohebné materiály. Jde o termoplastické elastomery a vyrábějí se ze směsi termoplastických polymerů a měkkých pryžových materiálů. V praxi se využívají pro modelářské účely, či pro domácí kutilství. Poměrně zajímavým odvětvím jsou kompozitní materiály pro 3D tisk, obvykle se skládají z polymerní matrice a sekundárního materiálu ve formě prachu, existují však i kompozity s uhlíkovými, či skelnými vlákny. [3]

Každý ze míněných materiálů má samozřejmě i jiné využití než na tvorbu strun pro aditivní technologii. Je obecně známé, že z PET se vyrábějí lahve a obaly pro potravinářský průmysl. Z ABS jsou pak známé Lego kostky. PLA i PA lze najít v textilním průmyslu.

5 Zkoušení vlastností polymerů

V této kapitole se budu věnovat popisu zkoušek mechanických vlastností polymerů připravených metodami aditivní technologie, konkrétně metodou FDM. Josef Průša u svých produktů uvádí použití zkušební metody ČSN EN ISO 527-1 [19], která popisuje obecné principy stanovení tahových vlastností plastů, jedná se o normu používanou pro testování vzorků vyrobených i jinými technologiemi jako vstřikování či obrábění plastu. Tuto normu použiji pro testování vzorků i v mé práci. V zahraničí se však uvažují i jiné normy, například Aaron M. Forster z Národního institutu standardů a technologie v USA v zveřejněné publikaci [24] uvádí alternativu k ISO 527-1 a to sice ASTM D638. Zkouška ohybových vlastností plastů je definována v normě ČSN EN ISO 178. Norma ČSN EN ISO 527-1 je doplněna svou druhou částí ČSN EN ISO 527-2. [24] [21]

5.1 Stanovení tahových vlastností plastů

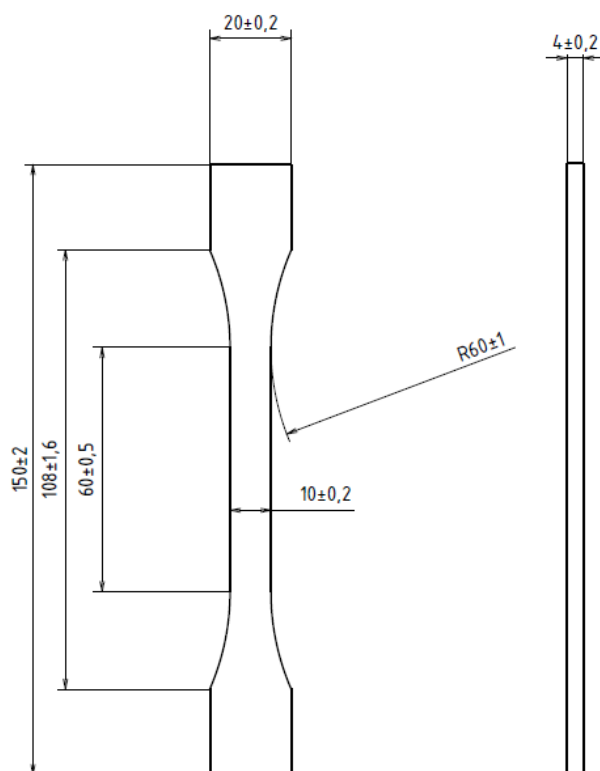
Jak již bylo uvedeno, normy popisující zkoušku stanovení tahových vlastností plastů jsou ČSN EN ISO 527-1, 2 a ASTM D638, ze zkoušek provedených podle těchto norem se nejčastěji určuje mez pevnosti v tahu, napětí na mezi kluzu, modul pružnosti v tahu a prodloužení na mezi kluzu. [21] [25]

5.1.1 Průběh zkoušky podle ČSN EN ISO 527

Rozměry a tvar zkušební tělesa definuje přímo norma ČSN EN ISO 527 [21] [25]. Těleso je upnuto do čelistí stroje pro tahovou zkoušku zobrazeného na obr. 11. Konkrétní rozměry použité pro tisk těles v této práci jsou zobrazeny na obr. 12.



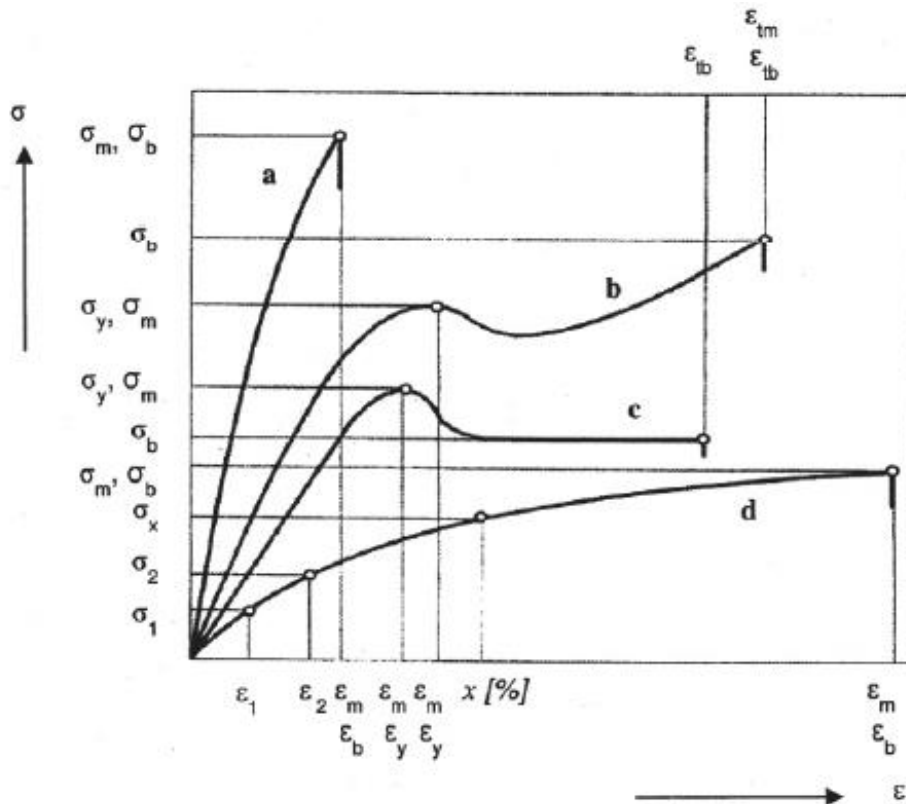
Obrázek 11: Zkušební stroj Walter+bai ag ZD 10/90 - VLASTNÍ



Obrázek 12: Rozměry zkušební tělesa – VLASTNÍ

Zkušební těleso je dále zatíženo silou F , působící ve směru podélné osy, síla je způsobena konstantním pohybem čelistí zkušebního stroje, který tak těleso „natahuje“. Zaznamenávání zkoušky (závislost deformace na zatěžující síle) končí v momentě, kdy dojde k přetržení zkušebního tělesa, nebo k dosažení předem definované hodnoty napětí či deformace.

Na obr. 13 je znázorněn průběh tahové zkoušky křehkého materiálu (a), houževnatých materiálů s mezí kluzu (b, c) a houževnatého materiálu bez meze kluzu (d). [26] Rychlost posuvu čelistí zkušebního stroje je také definována normou a závisí na materiálu, velikosti vzorku a cíli měření. [21] [25] [27]



Obrázek 13: Znázornění průběhu tahové zkoušky čtyř vzorků [32]

Před začátkem zkoušky je třeba tělesa proměřit a označit počáteční měřenou délku L_0 , či vzdálenost čelistí L . Ideální teplota prostředí, ve kterém zkouška probíhá, je $(23 \pm 2 \text{ } ^\circ\text{C})$ a relativní vlhkost $(50 \pm 10 \text{ } \%)$. [21] [27]

5.1.2 Vyhodnocení tahové zkoušky

Výstupem zaznamenávacího zařízení je průběh změny velikosti měřené délky na zatěžující síle, z těchto parametrů vypočítáme napětí a poměrné prodloužení.

Napětí se vypočítá z velikosti zatěžující síly F [N], vztahuje se na počáteční průřez S a nazýváme ho technické napětí.

$$S = b \cdot h \quad [\text{mm}^2] \quad (1)$$

Kde b je šířka vzorku [mm], h tloušťka vzorku [mm].

Pro výpočet technického napětí platí vzorec:

$$\sigma = \frac{F}{S} \quad [MPa] \quad (2)$$

Z výsledků zkoušky vyhodnocujeme:

- Mez pevnosti σ_m [MPa] definovaná jako napětí při prvním lokálním maximu při pozorování průběhu zkoušky tahem
- Napětí na mezi kluzu σ_y [MPa] čili napětí při prvním výskytu poměrného prodloužení bez navyšujícího se napětí.

Dále je možné vyhodnocovat napětí při přetržení, či napětí při určité hodnotě prodloužení.

Při homogenní deformaci, tedy deformaci, při které se těleso nebude „zkracovat“ v příčném směru a vytvářet krček, ze změny velikosti měřené délky při tahové zkoušce vyhodnocujeme poměrné prodloužení ε . Deformace se měří pomocí průtahoměrů.

Pro poměrné prodloužení platí vztah:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L_0}{L_0} \quad (3)$$

L_0 je počáteční měřená délka, označená na zkušebním vzorku před přetržením, ΔL_0 pak přírůstek této délky.

Zjišťované hodnoty poměrného prodloužení jsou:

- Poměrné prodloužení na mezi kluzu ε_y , tedy první výskyt zvětšení poměrného prodloužení bez zvýšení napětí
- Poměrné prodloužení při přetržení ε_b , čili poměrné prodloužení v posledním bodu při zaznamenávání zkoušky v tahu před snížením napětí na hodnotu maximálně 10 % meze pevnosti, pokud dojde k přetržení po mezi kluzu [21] [25]

Při nehomogenní deformaci tělesa během tahové zkoušky se vypočítává jmenovité poměrné prodloužení při přetržení ε_{tb} , při kterém zaznamenáváme zvětšení na vzorku předem nastavené upínací vzdálenosti při průběhu zkoušky. Tento způsob byl využit v praktické části práce. Obvykle se jedná o hodnotu 115 mm.

Jmenovité prodloužení při přetržení je definované vztahem:

$$\varepsilon_{tb} = \frac{\Delta L_t}{L} \quad (4)$$

Z průběhu tahové zkoušky lze krom již zmíněných vlastností zkušebního tělesa zjistit i modul pružnosti v tahu E_t [MPa] a Poissonův poměr ν vyjadřující poměr mezi poměrným podélným prodloužením k poměrnému příčnému zkrácení. [28]

Modul pružnosti se u zkoušek, při kterých byl použit průtahoměr určí jako sečna grafu napětí – poměrné prodloužení. Sečna musí procházet body poměrného prodloužení $\varepsilon_1 = 0,0005$ a $\varepsilon_2 = 0,0025$. V těchto bodech se odečtou odpovídající hodnoty napětí a modul se vypočte pomocí vzorce:

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

[21] [25]

Zkouška podle normy ASTM D638

Tato norma vydaná Národním institutem standardů a technologie v USA je podobná normě ČSN EN ISO 527. Lišit se tyto normy mohou v některých případech vyhodnocování vlastností materiálů v oblasti nelineární (plastické) deformace. Tento problém nastává nejčastěji u materiálů s malou oblastí lineární deformace. Německá firma Zwick/Roell, která se rozdíl mezi těmito normami zabývala [29] uvádí ve své publikaci mimo jiné i rozdíl v požadavcích na měřicí elektroniku (rychlost převodu naměřených bodů do vyhodnocujícího softwaru) obou norem, tento fakt tvoří rozdíl především u zkoušek probíhajících vysokou rychlostí. Rozdílně

jsou definované rychlosti posuvu čelistí i rozměry zkušebních vzorků, obě normy však dovolují určitou změnu rozměrů a volbu rychlosti, zkouška podle obou norem jde tedy nastavit i se stejnými parametry. Velkou roli při zkoušení mechanických vlastností (tím spíše u plastů) hraje prostředí, ve kterém zkouška probíhá. Krom zde uvedených norem se ve světě využívá i norma JIS K 7161, vytvořena v Japonsku. [24] [21] [29]

5.2 Stanovení houževnatosti plastů

Pro stanovení houževnatosti plastů se využívá dynamické zkoušky rázem v ohybu, ze které určujeme především rázovou a vrubovou houževnatost materiálu. [26]

Původní myšlenkou v praktické části práce bylo ověření výsledků p. Vícha, který vyhodnocoval především rázovou houževnatost a_c . Ta je definována jako schopnost materiálu rychle absorbovat energii (jednotka $[kJ \cdot m^{-2}]$) a počítá se pomocí vzorce:

$$a_c = \frac{E_c}{h \cdot b} \quad (6)$$

E_c je spotřebovaná energie pro přeražení tělesa. Hodnota je odečtena na stroji pro zkoušku rázem v ohybu po přeražení tělesa. h je tloušťka zkušebního tělesa v mm a b je jeho šířka v mm, tloušťka i šířka musí být změřena před provedením zkoušky na třech místech s přesností na 0,02 mm. Naměřené hodnoty musí ležet v tolerančním poli pro rozměry tělesa dle normy [24] [30]

Zkouška probíhá dle normy ČSN EN ISO 179. Zkušební těleso je umístěno souměrně mezi dvě podpory nastavené na předepsanou vzdálenost. Úderem kladiva vedeného na střed tělesa se těleso přerazí a dojde k zaznamenání hodnoty absorbované energie. [30]

Rozměry zkušebního tělesa pro tuto zkoušku závisí na použitém typu materiálu, pro naše potřeby měla být použita tělesa o rozměrech 4x10x80 mm.

5.3 Stanovení porozity a rozměrů těles pomocí CT

Analýza odchylek, rozměrů, ale i vnitřní struktury strojírenských součástí je v dnešní době prováděna nedestruktivní metodou počítačové tomografie, která je v průmyslu používána již od 90. let minulého století. Dnes se jedná již o rozšířenou technologii využívanou pro kontrolu strojních součástí. Počítačová tomografie sice nedosahuje takové přesnosti, jako například měření na souřadnicovém měřícím stroji a zároveň není možné měřit rozměrné objekty (velikost objektu omezena rozměry tomografu), přesto našla široké využití především v kontrole materiálů jako plast, hliník či slitiny lehkých kovů. [31] [32]

Počítačová tomografie funguje na principu rentgenového záření. Díl je umístěn do komory, ve které je rentgenkou vyslán téměř bodový zdroj záření, díl toto záření absorbuje a podle absorpce a tvaru dílu se část tohoto záření dostane na rentgenový detektor umístěný za měřeným dílem. Obraz na detektoru je dále zpracováván pomocí výpočetní techniky. Třetí rozměr pak vzniká pohybem otočného stolu pod součástí. [31] [32]

Tato technologie je vhodná pro polymerní materiály z důvodů úměrnosti absorpce velikosti atomového čísla daného prvku. Zjednodušeně řečeno se plast snadněji prosvítí a není tedy potřeba tak výkonný zdroj.

V této práci měla být použita analýza porovnání skutečných rozměrů vytištěných vzorků (jejich odchylek) s modelem CAD a dále analýza porozity materiálu. Porozita materiálu se určuje pomocí speciálních modulů a algoritmů pro nalezení různých vad. Tyto moduly se využívají například při kontrole odlitků. [31]

Praktická část:

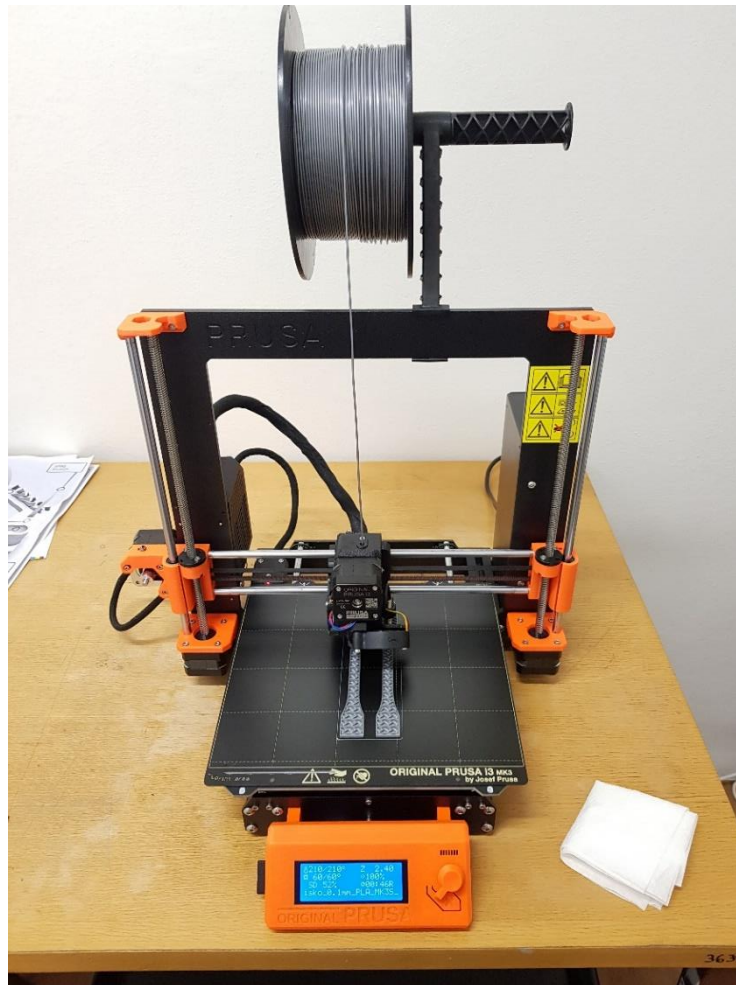
Prvním úkolem v praktické části této práce bylo vytištění zkušebních těles s rozměry dle uvedených norem. Tisk všech těles proběhl na Fakultě strojní ČVUT.

6 Tisk těles

V této práci byl proveden experiment dosažení maximálního sklonu, viz obr 19. Důvodem tohoto experimentu bylo ověření schopnosti tiskárny Prusa i3 MK3S tisknout vysoké sklony, což by mohlo být využito v dalších pracích na ČVUT v Praze. Dále bylo provedeno porovnání pevnosti těles tištěných uprostřed tiskové podložky a na krajích na dvou různých tiskárnách od firmy Prusa. Tento experiment byl proveden pro zjištění, zda tiskárny tisknou na všech místech podložky stejně kvalitně. Zároveň byl proveden pokus sjednocení parametrů na tiskárnách Prusa i3 MK3S a Stratasys F370 a porovnání pevností výtisků, důvodem byla snaha nastavit na tiskárně Prusa i3 MK3S co nejvíce podobné parametry, jako pevně nastavené parametry u tiskárny Stratasys F370. V neposlední řadě byl vyhodnocován vliv hustoty výplně zkušebních těles na pevnost.

6.1 Použité tiskárny

V této práci byly použity celkem tři typy tiskáren. Tiskárna Prusa i3 MK3S byla k dispozici dvakrát. Z toho důvodu jsou vzorky označeny čísly. 1 znamená, že k tisku byla použita první tiskárna, 2 značí použití druhé tiskárny. Modely tiskáren se parametry nijak neliší, ale z důvodů úspory času při tisku byly použity obě tiskárny. Tiskárna Prusa i3 MK3S má k dubnu 2020 cenu od 19 990 Kč. [18] S touto cenou se jedná o stavebnici, kterou je třeba dle návodu složit a zkalibrovat. Kompletně nastavena a zkalibrována začíná svou cenou na 26 990 Kč. [18] Tiskárna Prusa i3 MK3S je zobrazena na obr. 14.



Obrázek 14: Tiskárna Prusa i3 MK3S-VLASTNÍ

Další tiskárnou použitou v této práci byla novinka od firmy Prusa Research – tiskárna Prusa MINI. Použití této tiskárny v seznamu výtisků označuje písmeno M. Jedná se o menší a levnější variantu tiskárny MK3S. S cenou 9990 Kč [18] (k dubnu 2020) je velice levnou tiskárnou vhodnou pro začátečníky v oblasti 3D tisku. Tiskárna Prusa MINI je na obr. 15. Pro obě tiskárny byl připraven G-kód v programu Prusaslicer.



Obrázek 15: Tiskárna Prusa MINI-VLASTNÍ

Nejdražší tiskárnou použitou v této práci je tiskárna Stratasys F370 (na obr. 16) od stejnojmenné firmy. Tato tiskárna byla použita pro vytištění vzorků s označením S. Cena této tiskárny je 50 000 USD [33] (k dubnu 2020). Při přepočtu s aktuálním kurzem $25,61 \text{ Kč} = 1 \text{ USD}$ [34] je cena této tiskárny přibližně 1 280 690 Kč. Z důvodu vysoké ceny tiskárny byl pro tisk použit oficiální materiál Stratasys PLA. Pro vytvoření G-kódu byl použit software GrabCAD.

Tiskárna od firmy Stratasys se svou vysokou cenou přináší i podstatně větší kvalitu a přesnost tisku, přináší i možnosti kombinace více materiálů, pokročilý software si navíc sám spočítá ideální parametry pro tisk či například umístění a velikost podpěr. V tomto ohledu je Slicer pro tiskárnu stratasys (GrabCAD) mnohem více „automatizován“. Při samotném tisku je to určitě

výhoda, ale při výzkumu v této práci, který měl porovnat vlastnosti tiskáren, byly fixně dané parametry a nutnost použití oficiálního materiálu komplikací.

Přesto jsem se pokusil se co nejvíce přiblížit fixním parametrům z GrabCADU a zadat podobný tisk na tiskárně Prusa i3 MK3S. Toto snažení je dále popsané v kapitole 6.5.



Obrázek 16: Tiskárna Stratasys F370-VLASTNÍ

6.2 Vytištěná tělesa

Všechna zkušební tělesa vytištěná v rámci této práce byla připravena metodou FDM, detailněji popsanou ve druhé kapitole. Touto metodou byly vytištěny vzorky pro tahovou zkoušku podle normy ČSN EN ISO 527 (viz kapitola 5) a pro stanovení houževnatosti dle normy ČSN EN ISO 178, zkouška rázem v ohybu však nakonec nebyla uskutečněna. K přípravě těles byly využity tři tiskárny, dvě od firmy Prusa Research a jedna tiskárna firmy

Stratasys. Pro zkoušku tahových vlastností byl použit materiál PLA, který byl zvolen z několika důvodů. Jedná se o velice často používaný materiál, má vynikající tiskové vlastnosti a není ani příliš nákladný, navíc pro materiál PLA nebyly nalezeny práce zabývající se tímto tématem. Pro zkoušku ohybových vlastností byl zvolen materiál PETG, jelikož jde o ověření výsledků z jiné práce na ÚMI ČVUT. [15] Seznam všech vytištěných těles, včetně základních parametrů je uveden v tabulkách 6 a 7. Popis jednotlivých poloh tisku a odůvodnění zvolených parametrů je v následujících podkapitolách. Tabulka 5 vysvětluje označování vzorků.

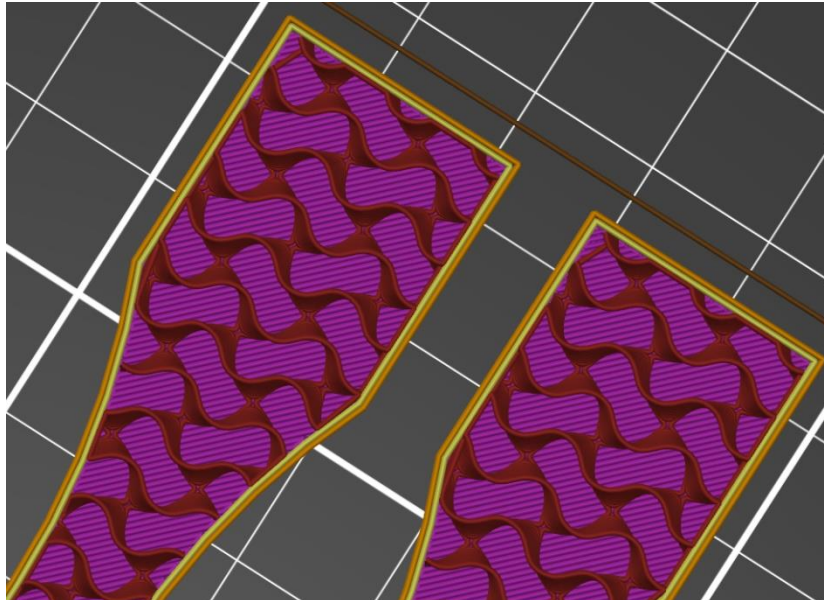
Tabulka 5: Značení vzorků

Označení	Vysvětlivka
1	Tiskárna Prusa i3 MK3S-1
2	Tiskárna Prusa i3 MK3S-2
M	Tiskárna Prusa MINI
S	Tiskárna Stratasys F370
X	Číslo vzorku
1S	Tiskárna Prusa i3 MK3S-1, parametry co nejbližší tiskárně Stratasys F370
D	Vzorky tištěny dál od sebe (v poloze B, viz obr. 21)

Tabulka 6: Seznam výtisků pro tahovou zkoušku

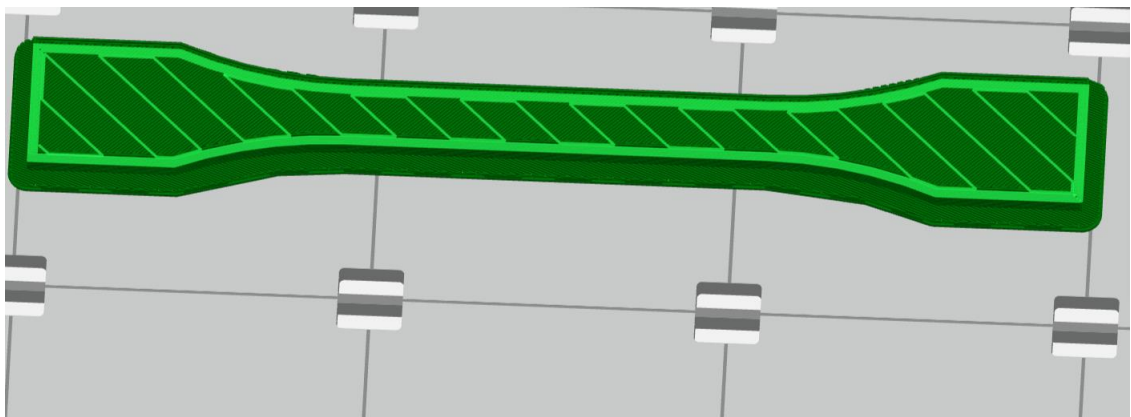
Označení vzorku	Počet výtisků	Pozice tisku	Výška vrstvy [mm]	Výplň [%]	Použitý materiál
1.X	6	A	0,1	15	Prusa PLA
2.X	6	A	0,1	15	Prusa PLA
1D.X	4	B	0,1	15	Prusa PLA
2D.X	8	B	0,1	15	Prusa PLA
M.X	6	A	0,1	15	Prusa PLA
MD.X	6	B	0,1	15	Prusa PLA
S.X	9	C	0,254	0	Stratasys PLA
1S.X	8	C	0,2	0	Prusa PLA
1.X 0 %	4	A+B	0,1	0	Prusa PLA
1.X 50 %	4	A+B	0,1	50	Prusa PLA

Pro všechny výtisky krom těch označených S. byl použit vzor výplně gyroid (obr. 17) a základní nastavení dvou perimetrů. Rychlost posuvů, teploty a další parametry byly zachovány dle doporučení výrobce. X je u každého vzorku konkrétní číslo, vzorky byly číslovány podle umístění na tiskové podložce zleva doprava.



Obrázek 17: Vzor výplně gyroid použit u všech výtisků, kromě těch s označením S - VLASTNÍ

U vzorků „bez výplně“ na tiskárnách firmy Prusa není vzor výplně podstatný, jelikož po vyplnění plných spodních vrstev následuje tisk pouze obvodových perimetrů vrchní strana součásti je poté vyplněna mosty a plnými horními vrstvami. U tiskárny Stratasys F370 je i u vzorků bez výplně tištěna základní struktura, viz obrázek 18.



Obrázek 18: Základní struktura "prázdných" vrstev u tiskárny Stratasys F370 - VLASTNÍ

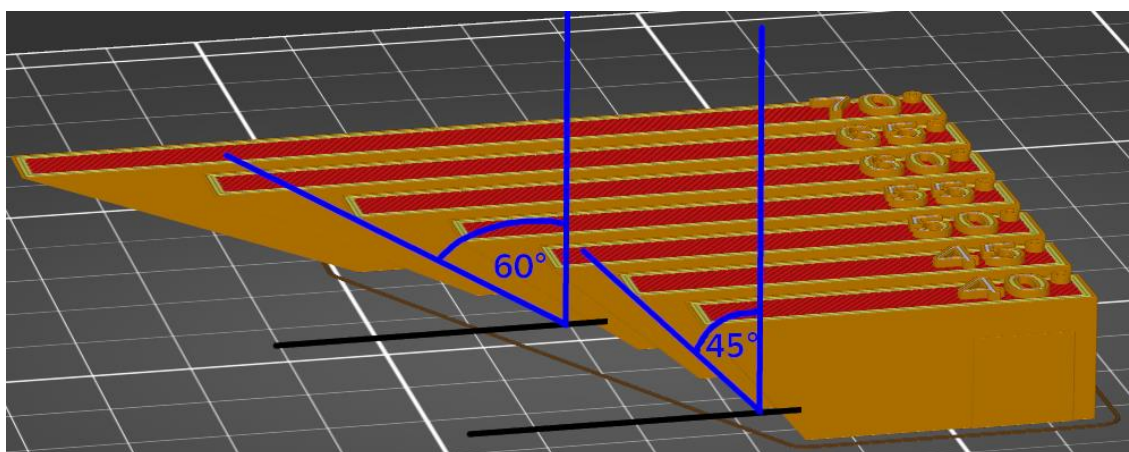
Tabulka 7: Seznam výtisků pro zkoušku rázem v ohybu

Označení vzorku	Počet výtisků	Pozice tisku	Výška vrstvy [mm]	Výplň [%]	Použitá tiskárna	Použitý materiál
G 20 %	6	C	0,1	20	Prusa i3 MK3S-1	Prusa PETG
G 50 %	6	C	0,1	50	Prusa i3 MK3S-1	Prusa PETG

Pro tyto výtisky bylo použito obdobné nastavení jako v práci O. Vícha [15], mělo jít o ověření výsledků této práce. Strukturou výplně byla zvolena mřížka, teplota trysky byla 260 °C a teplota podložky 90 °C.

6.3 Tisk co největšího sklonu bez podpěry

Z důvodu ověření hodnot od výrobce a možnosti ušetření materiálu za podpěry byl proveden test maximálního sklonu mezi stěnou tisknutého tělesa a svislou stěnou (zobrazeno na obr. 19) na tiskárně Prusa i3 MK3S. Vyhodnocení tohoto experimentu mělo proběhnout pomocí CT, kvůli omezeným možnostem přístupu do laboratoří byla však provedena pouze vizuální kontrola povrchu součásti.

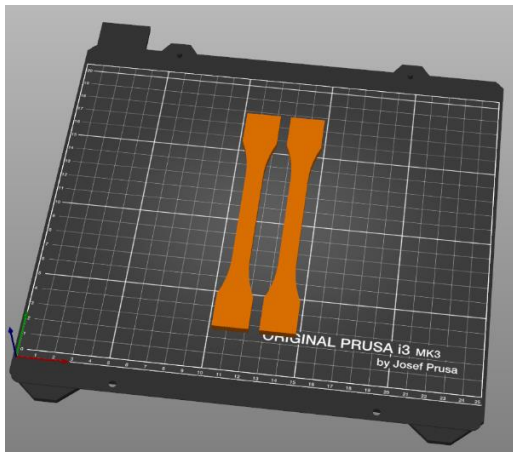


Obrázek 19: Označení zkoumaných sklonů - VLASTNÍ

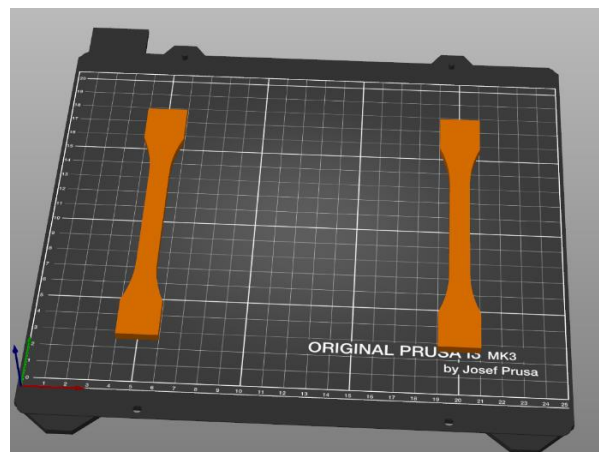
Výrobci tiskáren uvádějí maximální možný sklon při tisku 45°, označený na obr. 19, v této práci bylo dosaženo sklonu 60°, který je rovněž zakótovaný v obr. 19. Sklon vyhovoval při vizuální kontrole, pokud byl povrch součásti bez stringů a pokud na sebe vrstvy správně navazovaly [3]

6.4 Tisk v závislosti na poloze tělesa na podložce

První sada byla vytištěna za účelem zjištění pevnosti v závislosti umístění tělesa na tiskové podložce. Tělesa byla tištěna na dvou typech tiskáren (MK3S a MINI) ve dvou polohách. Poloha A (obr. 20) a poloha B (obr. 21).



Obrázek 20: Poloha A-VLASTNÍ



Obrázek 21: Poloha B-VLASTNÍ

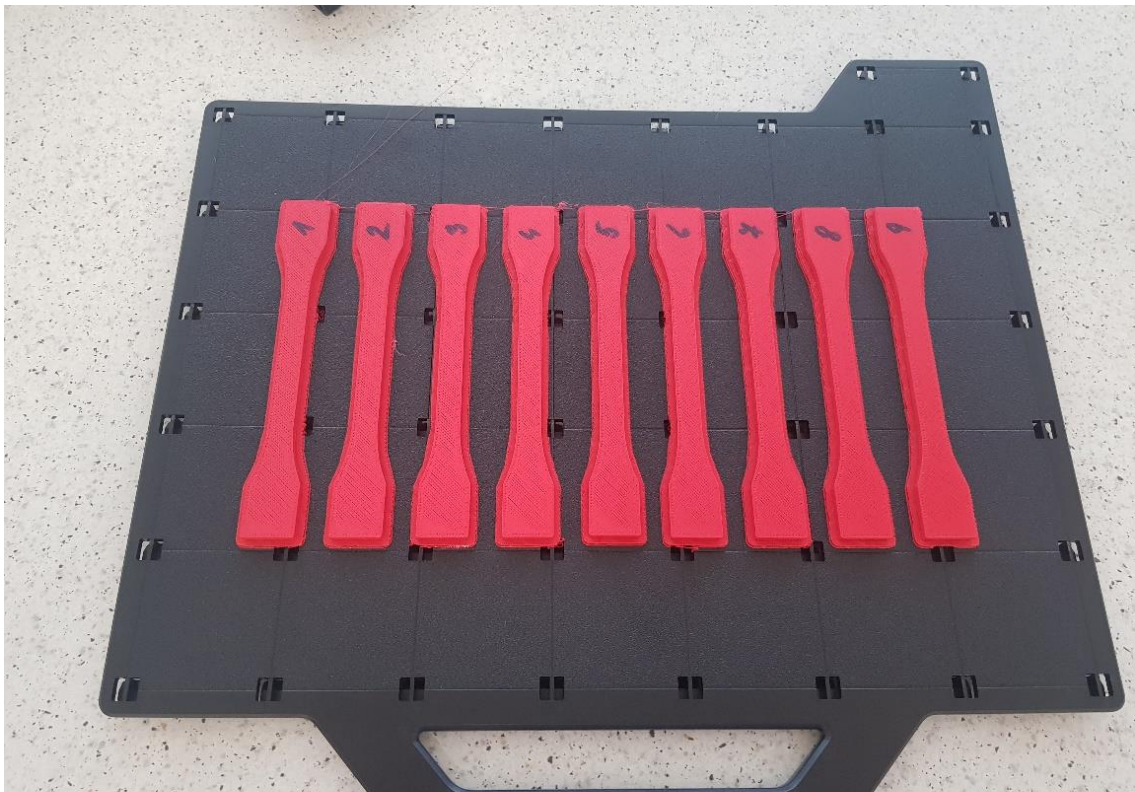
Tištěné díly v těchto polohách měly být otestovány zkouškou pevnosti v tahu a také měly být prověřeny jejich rozměry a další vlastnosti jako např. pórovitost. K prověření přesnosti rozměrů a pórovitosti měla posloužit analýza CT na Ústavu strojírenské technologie v Dejvicích. Výsledkem celého procesu měl být přehled, ve kterém by bylo zřejmé, zda daná tiskárna tiskne stejně přesné a pevné vzorky uprostřed a na krajích tiskové podložky a zda má pozice vliv na pórovitost tištěných těles.

Rozdíl v rozměrech i pórovitosti jsme předpokládali i z důvodu menší přesnosti těchto poměrně levných tiskáren. Použití dvou tiskáren je zase odůvodněno možností porovnání levnější a dražší varianty stroje od jednoho výrobce. Parametry testování byly zvoleny tak, aby se co nejvíce přiblížily těm nejpoužívanějším. Proto byla zvolena přednastavená výplň 15 % a tisk

s výškou vrstvy 0,1 mm, který je kompromisem mezi kvalitou a časem tisku. Materiálem je nejpoužívanější PLA. Vzhledem k aktuální situaci a zavření laboratoří na Fakultě strojní nebylo v této práci možné provést analýzu CT. Tudíž bude tento výzkum doplněn pouze zkouškou pevnosti v tahu. Dle mého se však jedná o zajímavý námět, který dovedu do konce v průběhu navazujícího studia.

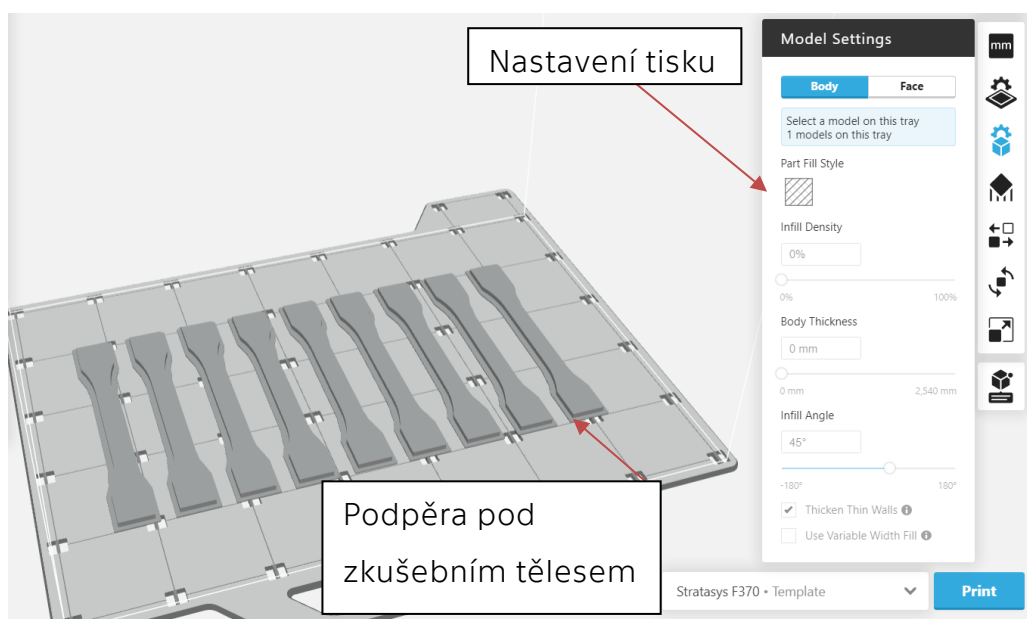
6.5 Tisk pro porovnání tiskáren

Další série těles, konkrétně ty s označením S a 1S byly vytištěny za účelem porovnání tahových vlastností vzorků z tiskárny Stratasys F370 a Prusa i3 MK3S. Jako první bylo vytištěno 9 těles na tiskárně firmy Stratasys. tento počet byl zvolen z důvodu co největší zaplněnosti podložky při současném zachování dostatečných mezer mezi tělesy. Pohled na tiskovou podložku na obr. 22.



Obrázek 22: Zkušební tělesa vytištěná na tiskárně Stratasys F370, poloha C-VLASTNÍ

Na obr. 23 je zobrazen panel možností nastavení tisku v softwaru GrabCAD (v panelu Model Settings se pro materiál PLA nedá nastavit nic). Důvodem jsou již zmiňovaná předdefinovaná nastavení, pro každý materiál je tak možný pouze výběr z variant. U materiálu PLA je varianta dokonce pouze jedna. Na obrázcích 22 i 23 jsou patrné podpěry pod tištěnými tělesy, ty si slicer GrabCAD definuje také sám. Materiál podpěr byl shodný s materiálem tělesa. Podpěry byly odstraněny ručně v post processingu. Přednastavené parametry jsou shrnuty v tabulce 8.

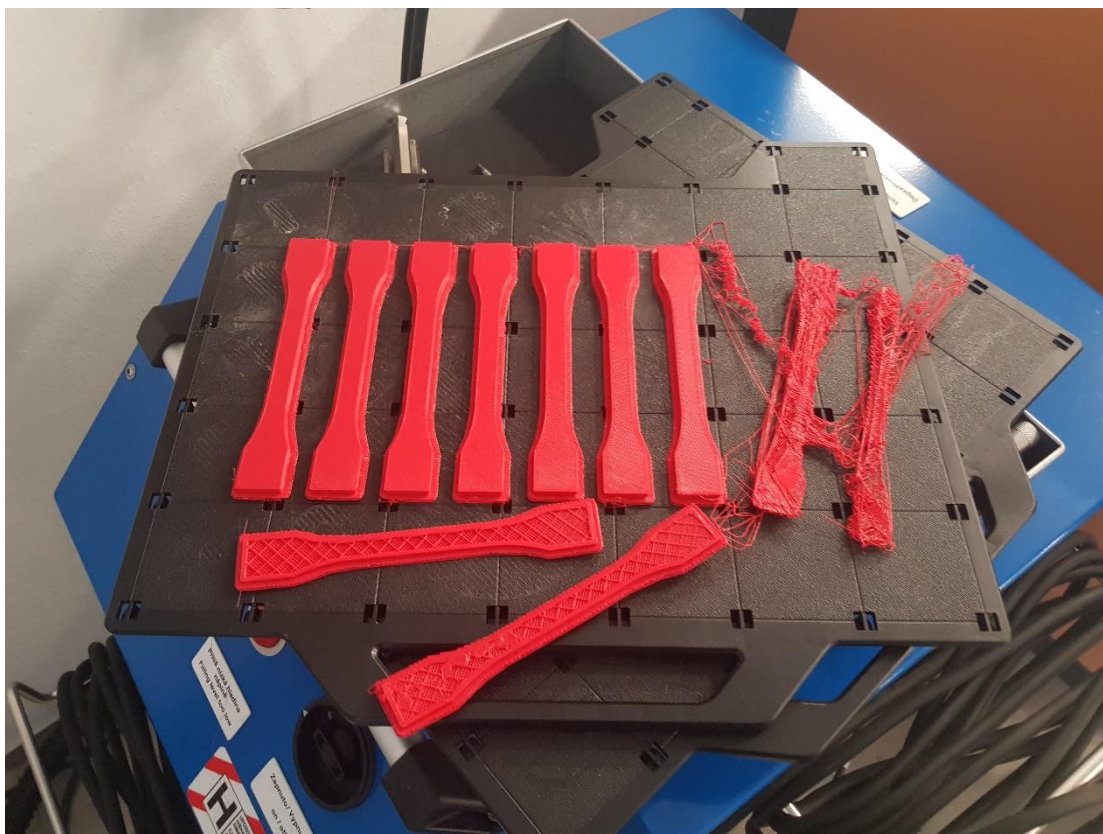


Obrázek 23: Zobrazení tisku ve sliceru GrabCAD - VLASTNÍ

Tabulka 8: Parametry tisku na tiskárně firmy Stratasys pro tisk vzorků S.X

Materiál	Počet těles	Výška vrstvy [mm]	Hustota výplně [%]	Vzor výplně	Doba tisku [min]	Spotřebovaný materiál [cm ³]
F123 PLA	9	0,25	0	Mřížka	122	62,18

První pokus o tisk těles na této tiskárně skončil neúspěchem, když došlo k odtržení několika těles z podložky. Tisk byl přerušen a zadán znovu. Chyba mohla nastat při pohybu extruderu nanesením materiálu v oblasti trysky či nevhodnými podmínkami tisku. Neúspěšný tisk je zobrazen na obr. 24.



Obrázek 24: Neúspěšný tisk na tiskárně firmy Stratasys-VLASTNÍ

Na tiskárně Prusa i3 MK3S bylo vytištěno 8 těles. Parametry tisku byly nastaveny tak, aby se co nejvíce přiblížily těm na tiskárně Stratasys. Nemohl však být použit materiál F123 PLA. Místo něj byl použit originální Prusa PLA. Zároveň byl na tiskárně firmy Prusa zvětšen počet plných spodních vrstev. Na otázku, zda je možné na podstatně levnější tiskárně dosáhnout alespoň podobných mechanických vlastností odpoví zkouška tahem. Nastavené vlastnosti pro tisk na tiskárně Prusa jsou v tabulce 9. Menší spotřeba materiálu je dána absencí podpěr. Delší doba je dána vyšší rychlostí tiskárny Stratasys F370 a zvětšeným počtem spodních plných vrstev.

Tabulka 9: Parametry tisku vzorků 1S.X

Materiál	Počet těles	Výška vrstvy [mm]	Hustota výplně [%]	Doba tisku [min]	Spotřebovaný materiál [cm ³]
Prusa PLA	8	0,20	0	178	36,15

Z výsledků tahových zkoušek bude možné také porovnat tiskárny Prusa i3 MK3S a Prusa MINI, jelikož na obou tiskárnách byly připraveny vzorky se stejným nastavením ve sliceru a ze stejného materiálu. Porovnají se tak pevnostní charakteristiky vzorků M.X s vzorky 1.X a 2.X. Dále pak vzorky MD.X, 1D.X a 2D.X. Porovnání základních údajů tisku je v tabulce 10.

Tabulka 10: Základní porovnání tisku na tiskárnách Stratasys F370 a Prusa i3- MK3S

Tiskárna	Stratasys F370	Prusa i3 MK3S
Doba tisku 1 tělesa [min]	13,6	22,3
Spotřebovaný materiál na 1 těleso [cm ³]	6,9	4,5
Dosažená průměrná pevnost [MPa]	19,4±0,3	36,4±1,1

6.6 Tisk pro zjištění vlivu výplně na pevnost

Další sada zkušebních vzorků byla vytištěna za účelem zaznamenání vlivu výplně vzorku (infill) na velikost napětí na mezi pevnosti a hodnotu jmenovitého prodloužení při přetržení.

Za tímto účelem byly z materiálu Prusa PLA vytisknuty vzorky s označením 1.X, 1.X 0 % a 1 X 50 %. Sada 1.X čili vzorky s patnáctiprocentní výplní (viz tabulka 6, výplň) byla stejně jako sady s žádnou a padesátiprocentní připravena na tiskárně Tiskárna Prusa i3 MK3S-1, jediným rozdílem v nastavení tisku je hustota výplně. Další hodnoty nastavení tisku jsou v tabulce 11.

Tabulka 11: parametry tisku pro zjištění vlivu výplně na pevnost

Sada vzorků	Počet vzorků	Výška vrstvy [mm]	Hustota výplně [%]	Vzor výplně	Doba tisku [min]	Spotřebovaný materiál [cm ³]
1.X	6	0,10	15	Gyroid	48	5,2
1.X 0 %	4	0,10	0	Gyroid	40	4,5
1.X 50 %	4	0,10	50	Gyroid	68	6,5

Spotřebovaný materiál i doba tisku v tabulce 11 jsou vztaženy na průměr tisku jednoho zkušebního tělesa.

7 Tahová zkouška

Průběh zkoušky a postup vyhodnocení je detailně popsán v páté kapitole. Pro tahovou zkoušku byl použit stroj Walter+bai_ag ZD 10/90, zobrazený na obr. 11. Výstupem tahové zkoušky je pracovní diagram závislosti deformace na zatížení zkušebního tělesa.

Parametry tahové zkoušky:

Rychlost posuvu čelistí $v_0 = 50 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$

Počáteční měřená vzdálenost čelistí $L = 115 \text{ mm}$

Teplota v místnosti $t = 20 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$

Osy grafů:

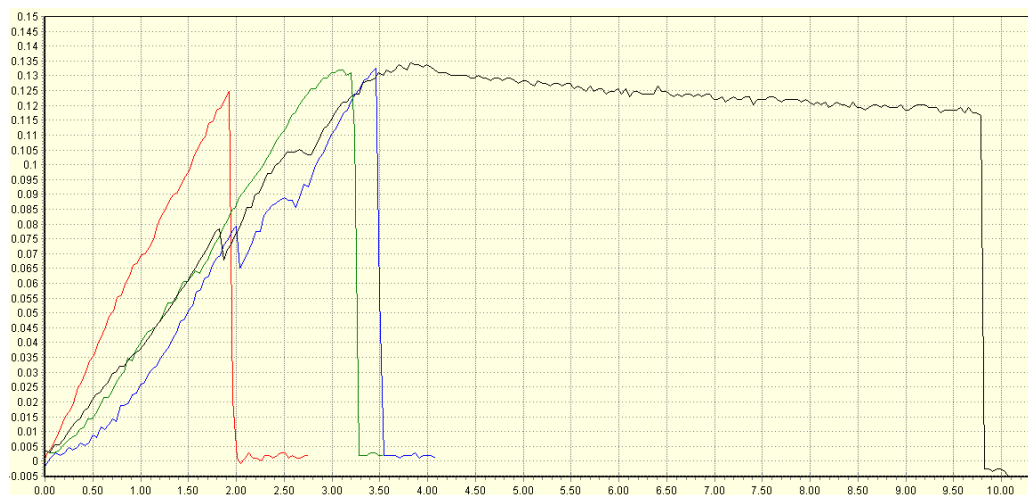
Vodorovná osa Deformation [mm] Deformace (ΔL)

Svislá osa Load [kN] Zatížení (F)

Místo pěti vzorků byly z testovací sady použity jen tři vzorky, zbytek byl ponechán pro vyhodnocení na CT, po proběhnutí analýzy rozměrů a struktury budou testy dokončeny.

7.1 Porovnání pevnosti tiskových strun

Jediným materiálem použitým pro tisk těles pro tahové zkoušky bylo PLA, nicméně jednotlivé struny se lišily barvou. Přehled strun a jejich pevností vycházejících z grafu 2 je v tabulce 12. Hodnoty v tabulce byly odečteny z grafu a následně dopočítány.



Graf 2: Příklad záznamu tahové zkoušky tiskových strun

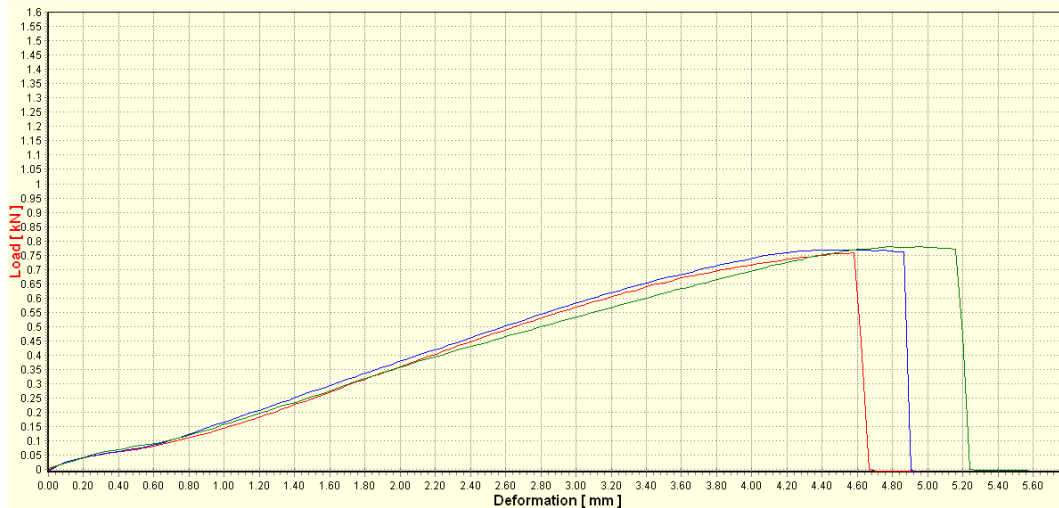
Průměr všech tiskových strun byl 1,75 mm, odchylka může být zanedbána.

Tabulka 12: Pevnostní hodnoty tiskových strun

Struna	Barva	Barva graf	F_{max} [kN]	ΔL [mm]	σ_m [MPa]	ϵ_{tb} [%]
F123 PLA			0,12	1,9	49,8	3,1
Prusa PLA			0,13	3,5	53,9	5,6
Prusa PLA			0,13	9,5	53,9	15,3
Prusa PLA			0,13	3,3	53,9	5,3

Hodnoty napětí na mezi pevnosti jsou téměř totožné, nicméně hodnoty jmenovitého poměrného prodloužení při přetržení se výrazně liší, struny měly rozdílnou schopnost deformace. Jmenovité poměrné prodloužení při přetržení modré struny je oproti červené struně téměř pětinasobné.

7.2 Vzorky S.X – Stratasys, 0% výplň, vzorky vedle sebe



Graf 3: Průběh tahové zkoušky vzorků S.X

Z grafu 3 byly odečteny hodnoty zatížení a deformace při přetržení zobrazené v tabulce 13.

Tabulka 13: Hodnoty odečtené z průběhu tahové zkoušky vzorků S.X

	1	2	3
F_{max} [kN]	0,76	0,77	0,79
ΔL [mm]	4,65	4,9	5,2

Z odečtených hodnot bylo dále vypočteno napětí na mezi pevnosti a jmenovité poměrné prodloužení. Pro výpočet napětí na mezi pevnosti byla použita rovnice:

$$\sigma_m = \frac{F_{max}}{S} = \frac{760}{40} = 19 \text{ MPa} \quad (7)$$

Hodnota jmenovitého prodloužení při přetržení byla vypočtena pomocí rovnice:

$$\varepsilon_{tb} = \frac{\Delta L}{L} = \frac{4,65}{115} = 0,04 = 4 \% \quad (8)$$

Další hodnoty napětí na mezi pevnosti a jmenovitého poměrného prodloužení při přetržení byly vypočteny pomocí rovnic (7, 8) a jsou zobrazeny v tabulce 14, 15.

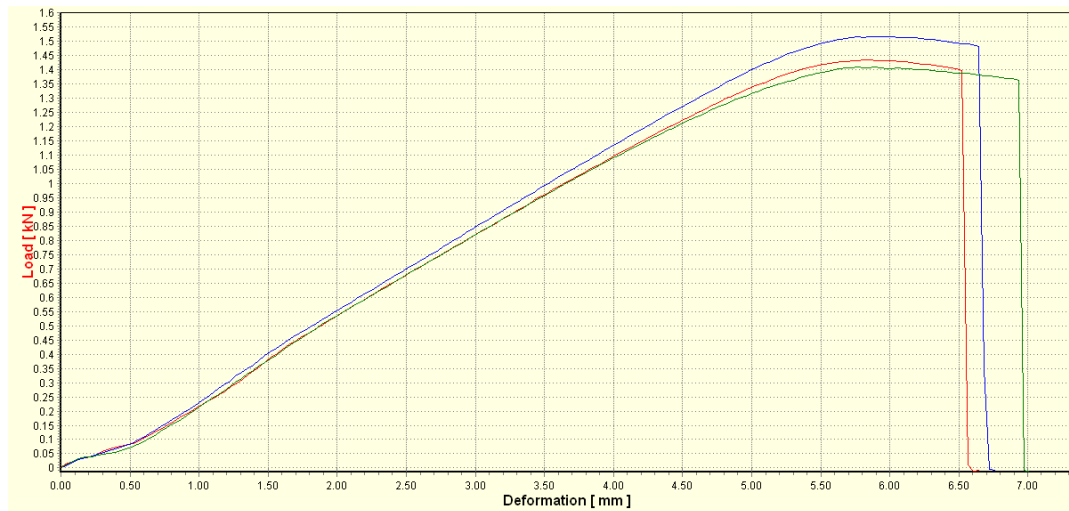
Tabulka 14: Vypočtené hodnoty ε_{tb} a σ_m pro sadu vzorků S.X

	1	2	3
σ_m [MPa]	19,0	19,3	19,75
ε_{tb} [%]	4,0	4,2	4,5

Tabulka 15: Průměrná hodnota a směrodatná odchylka pro sadu vzorků S.X

	Průměrná hodnota	Směrodatná odchylka
σ_m [MPa]	19,4	0,31
ε_{tb} [%]	4,2	0,2

7.3 Vzorky 1S.X - Prusa MK3S-1, 0% výplň, vedle sebe



Graf 4: Průběh tahové zkoušky vzorků 1S.X

Tabulka 16: Hodnoty odečtené z průběhu tahové zkoušky vzorků 1S.X

	1	2	3
F_{max} [kN]	1,44	1,52	1,41
ΔL [mm]	6,58	6,7	6,95

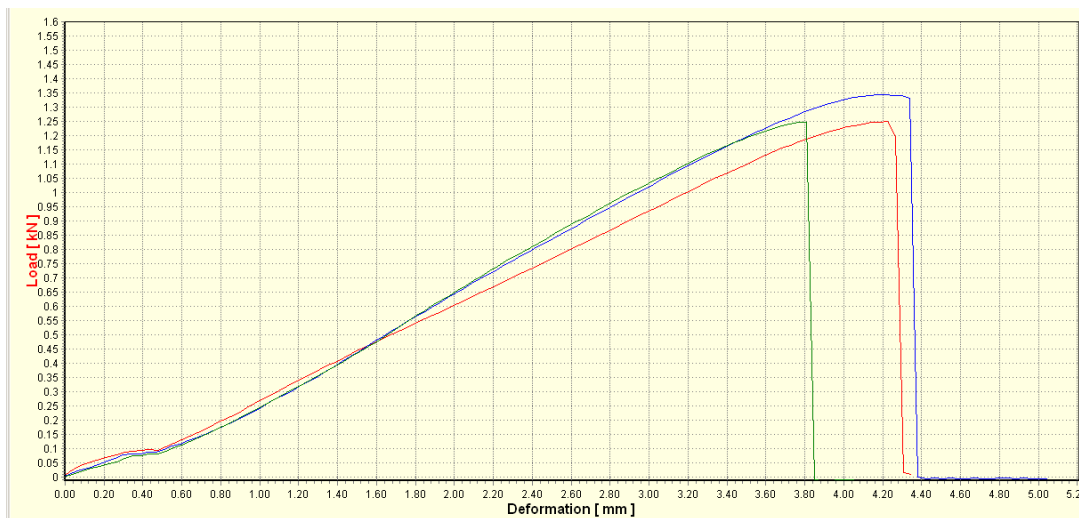
Tabulka 17: Vypočtené hodnoty ϵ_{tb} a σ_m pro sadu vzorků 1S.X

	1	2	3
σ_m [MPa]	36,0	38,0	35,3
ϵ_{tb} [%]	5,7	5,8	6,0

Tabulka 18: Průměrná hodnota a směrodatná odchylka pro sadu vzorků 1S.X

	Průměrná hodnota	Směrodatná odchylka
σ_m [MPa]	36,4	1,1
ϵ_{tb} [%]	5,8	0,1

7.4 1.X – Prusa MK3S-1, 15% výplň, blíž k sobě



Graf 5: Průběh tahové zkoušky vzorků 1.X

Tabulka 19: Hodnoty odečtené z průběhu tahové zkoušky vzorků 1.X

	1	2	3
F_{max} [kN]	1,25	1,35	1,25
ΔL [mm]	4,3	4,35	3,84

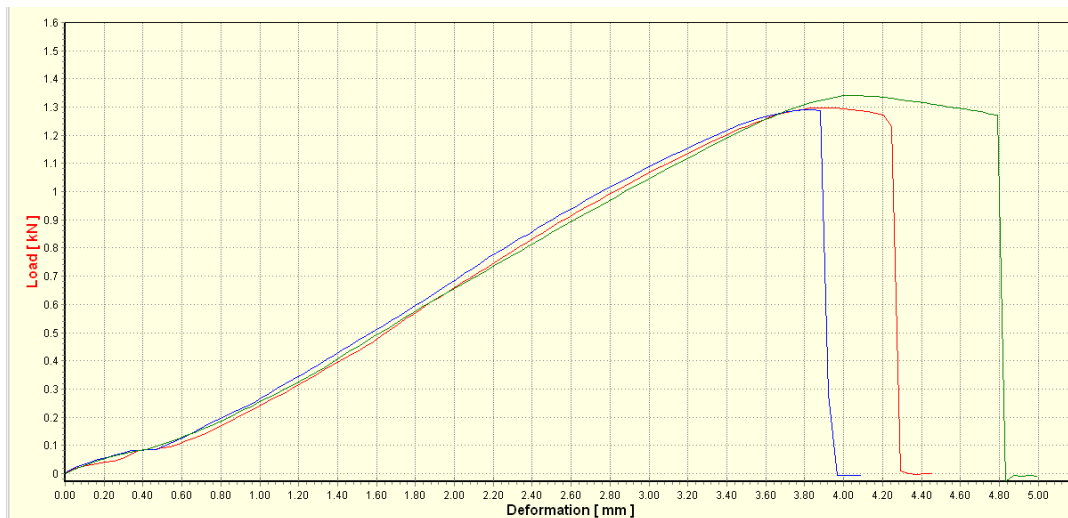
Tabulka 20: Vypočtené hodnoty ϵ_{tb} a σ_m pro sadu vzorků 1.X

	1	2	3
σ_m [MPa]	31,3	33,8	31,3
ϵ_{tb} [%]	3,7	3,8	3,3

Tabulka 21: Průměrná hodnota a směrodatná odchylka pro sadu vzorků 1.X

	Průměrná hodnota	Směrodatná odchylka
σ_m [MPa]	32,1	1,18
ϵ_{tb} [%]	3,6	0,2

7.5 1D.X - Prusa MK3S-1, 15% výplň, dál od sebe



Graf 6: Průběh tahové zkoušky vzorků 1D.X

Tabulka 22: Hodnoty odečtené z průběhu tahové zkoušky vzorků 1D.X

	1	2	3
F_{max} [kN]	1,30	1,30	1,34
ΔL [mm]	4,3	3,85	4,8

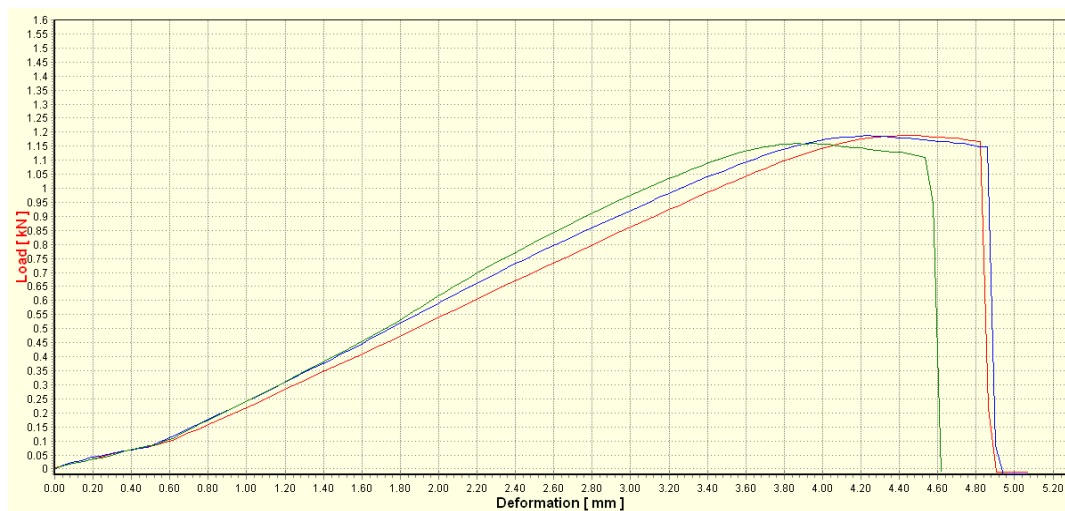
Tabulka 23: Vypočtené hodnoty ϵ_{tb} a σ_m pro sadu vzorků 1D.X

	1	2	3
σ_m [MPa]	32,5	32,5	33,5
ϵ_{tb} [%]	3,7	3,3	4,2

Tabulka 24: Průměrná hodnota a směrodatná odchylka pro sadu vzorků 1D.X

	Průměrná hodnota	Směrodatná odchylka
σ_m [MPa]	32,8	0,47
ϵ_{tb} [%]	3,7	0,4

7.6 M.X – Prusa MINI, 15% výplň, blíž k sobě



Graf 7: Průběh tahové zkoušky vzorků M.X

Tabulka 25: Hodnoty odečtené z průběhu tahové zkoušky vzorků M.X

	1	2	3
F_{max} [kN]	1,20	1,20	1,17
ΔL [mm]	4,8	4,9	4,5

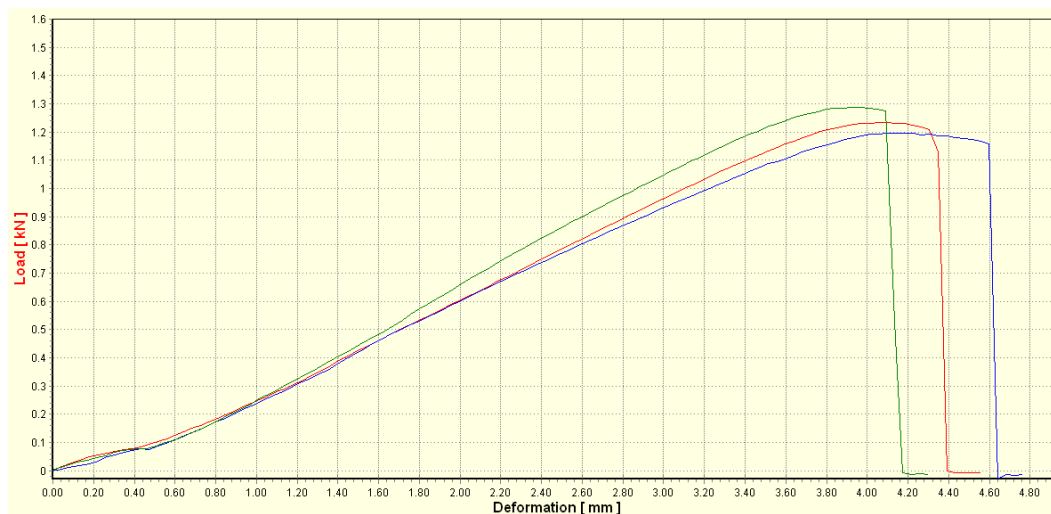
Tabulka 26: Vypočtené hodnoty ϵ_{tb} a σ_m pro sadu vzorků M.X

	1	2	3
σ_m [MPa]	29,9	29,9	29,3
ϵ_{tb} [%]	4,2	4,2	3,9

Tabulka 27: Průměrná hodnota a směrodatná odchylka pro sadu vzorků M.X

	Průměrná hodnota	Směrodatná odchylka
σ_m [MPa]	29,7	0,28
ϵ_{tb} [%]	4,1	0,1

7.7 MD.X - Prusa MINI, 15% výplň, dál od sebe



Graf 8: Průběh tahové zkoušky vzorků MD.X

Tabulka 28: Hodnoty odečtené z průběhu tahové zkoušky vzorků MD.X

	1	2	3
F_{max} [kN]	1,23	1,20	1,29
ΔL [mm]	4,35	4,62	4,1

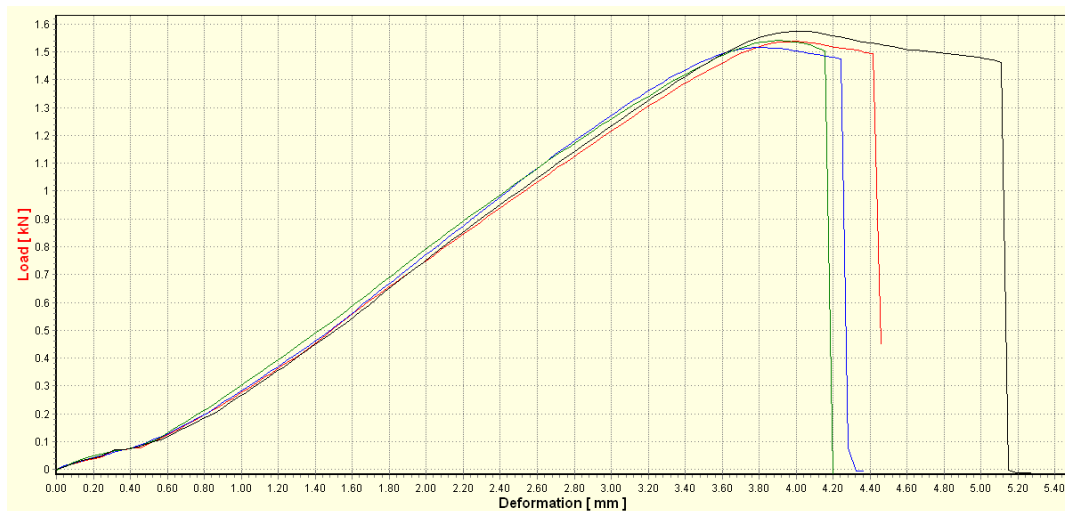
Tabulka 29: Vypočtené hodnoty ϵ_{tb} a σ_m pro sadu vzorků MD.X

	1	2	3
σ_m [MPa]	30,8	30,0	32,2
ϵ_{tb} [%]	3,8	4,0	3,6

Tabulka 30: Průměrná hodnota a směrodatná odchylka pro sadu vzorků MD.X

	Průměrná hodnota	Směrodatná odchylka
σ_m [MPa]	31,0	0,91
ϵ_{tb} [%]	3,8	0,2

7.8 1.X 50 % - Prusa MK3S-1, 50% výplň, poloha A+B



Graf 9: Průběh tahové zkoušky vzorků 1.X 50 %

Tabulka 31: Hodnoty odečtené z průběhu tahové zkoušky vzorků 1.X 50 %

	1	2	3	4
F_{max} [kN]	1,54	1,51	1,54	1,57
ΔL [mm]	4,4	4,3	4,2	5,1

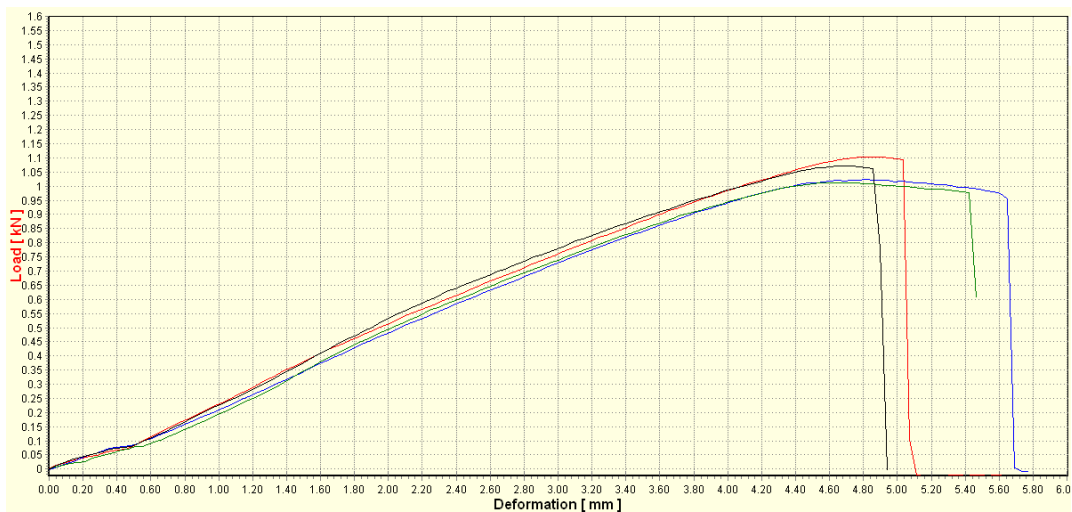
Tabulka 32: Vypočtené hodnoty ϵ_{tb} a σ_m pro sadu vzorků 1.X 50 %

	1	2	3	4
σ_m [MPa]	38,5	37,8	38,5	39,3
ϵ_{tb} [%]	3,8	3,7	3,7	4,5

Tabulka 33: Průměrná hodnota a směrodatná odchylka pro sadu vzorků 1.X 50 %

	Průměrná hodnota	Směrodatná odchylka
σ_m [MPa]	38,5	0,53
ϵ_{tb} [%]	3,6	0,3

7.9 1.X 0% - Prusa MK3S-1, 0% výplň, poloha A+B



Graf 10: Průběh tahové zkoušky vzorků 1.X 0 %

Tabulka 34: Hodnoty odečtené z průběhu tahové zkoušky vzorků 1.X 0 %

	1	2	3	4
F_{max} [kN]	1,10	1,20	1,11	1,08
ΔL [mm]	5,00	5,85	5,40	4,35

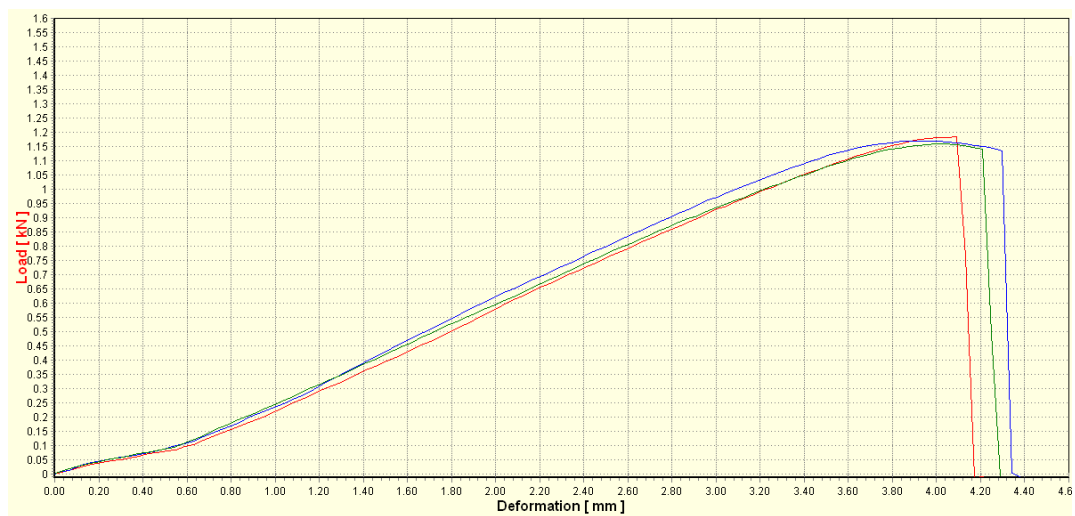
Tabulka 35: Vypočtené hodnoty ϵ_{tb} a σ_m pro sadu vzorků 1.X 0%

	1	2	3	4
σ_m [MPa]	27,5	30,0	27,8	27,0
ϵ_{tb} [%]	4,3	5,1	4,7	3,8

Tabulka 36: Průměrná hodnota a směrodatná odchylka pro sadu vzorků 1.X 0 %

	Průměrná hodnota	Směrodatná odchylka
σ_m [MPa]	28,1	1,15
ϵ_{tb} [%]	4,5	0,5

7.10 2.X - Prusa MK3S-2, 15% výplň, blíž k sobě



Graf 11: Průběh tahové zkoušky vzorků 2.x

Tabulka 37: Hodnoty odečtené z průběhu tahové zkoušky vzorků 2.X

	1	2	3
F_{max} [kN]	1,19	1,18	1,16
ΔL [mm]	4,1	4,3	4,2

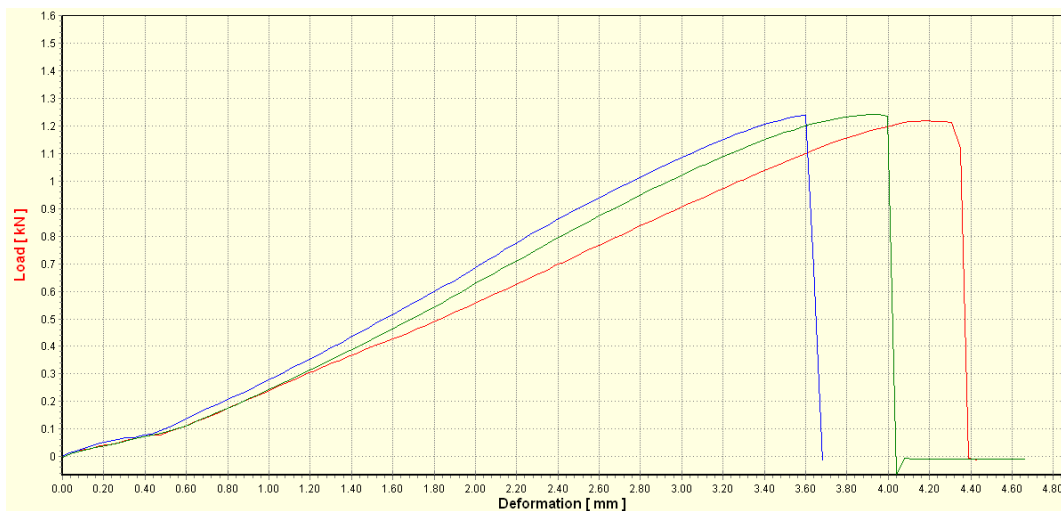
Tabulka 38: Vypočtené hodnoty ϵ_{tb} a σ_m pro sadu vzorků 2.X

	1	2	3
σ_m [MPa]	29,8	29,5	29,0
ϵ_{tb} [%]	3,6	3,7	3,7

Tabulka 39: Průměrná hodnota a směrodatná odchylka pro sadu vzorků 2.X

	Průměrná hodnota	Směrodatná odchylka
σ_m [MPa]	29,4	0,33
ϵ_{tb} [%]	3,7	0,1

7.11 2D.X - Prusa MK3S-2, 15% výplň, dál od sebe



Graf 12: Průběh tahové zkoušky vzorků 2D.X

Tabulka 40: Hodnoty odečtené z průběhu tahové zkoušky vzorků 2D.X

	1	2	3
F_{max} [kN]	1,11	1,24	1,24
ΔL [mm]	4,4	3,6	4,0

Tabulka 41: Vypočtené hodnoty ϵ_{tb} a σ_m pro sadu vzorků 2D.X

	1	2	3
σ_m [MPa]	27,8	31,0	31,0
ϵ_{tb} [%]	3,8	3,1	3,5

Tabulka 42: Průměrná hodnota a směrodatná odchylka pro sadu vzorků 2D.X

	Průměrná hodnota	Směrodatná odchylka
σ_m [MPa]	29,9	1,51
ϵ_{tb} [%]	3,5	0,3

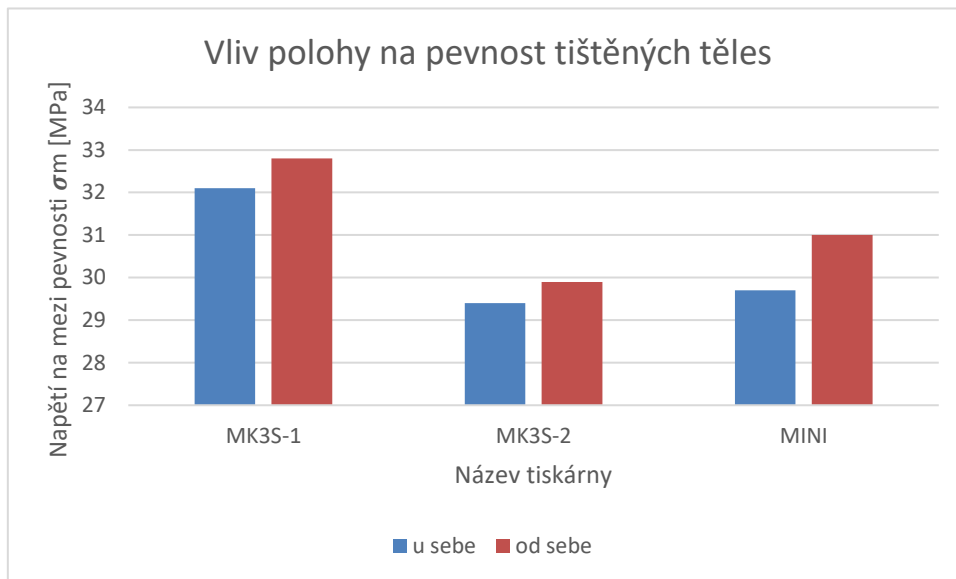
8 Výsledky a diskuse

Pro zjištění vlivu polohy zkušební tělesa na podložce na pevnostní charakteristiky byly použity tři tiskárny od firmy Průša (dvě s označením MK3S a jedna MINI). U obou tiskáren bylo dosaženo obdobných výsledků. Na první tiskárně MK3S byla hodnota průměrného napětí na mezi pevnosti $32,1 \pm 1,18 \text{ MPa}$ u vzorků tištěných u sebe. U vzorků tištěných v poloze B, tedy dále od sebe byla dosažená průměrná hodnota napětí $32,8 \pm 0,47 \text{ MPa}$. Na druhé tiskárně stejného typu jsou výsledky napětí na mezi pevnosti obdobné: $29,4 \pm 0,33 \text{ MPa}$ u sebe, $29,9 \pm 1,51 \text{ MPa}$ od sebe. Odpovídají i hodnoty průměrného jmenovitého poměrného prodloužení při přetržení, které jsou $3,6 \pm 0,2 \%$ a $3,7 \pm 0,1 \%$ u výtisků blíže k sobě a $3,7 \pm 0,4 \%$ a $3,5 \pm 0,3 \%$ u výtisků dále od sebe. Z těchto hodnot můžeme usoudit, že pozice tištěného tělesa na podložce má pouze velmi malý vliv na pevnost a na velikost deformace.

Nicméně u všech tiskáren můžeme pozorovat mírně vyšší pevnost tělísek tištěných od sebe, viz graf 13. U levnější tiskárny Prusa MINI bylo dosaženo průměrných hodnot napětí $29,7 \pm 0,28 \text{ MPa}$ u vzorků M.X a $31,0 \pm 0,91 \text{ MPa}$ u MD.X. Hodnoty poměrného prodloužení byly naměřeny $4,1 \pm 0,1 \%$ u vzorků u sebe a $3,8 \pm 0,2 \%$ u vzorků dál od sebe. Z těchto výsledků je rovněž patrné, že výběr použité tiskárny MINI či Průša MK3S nemá zásadní vliv na pevnost tištěných těles. Bez analýzy CT však nemůžeme vyloučit vliv umístění a volby tiskárny na porozitu a rozměrovou přesnost těles, tyto výsledky podpořené mírně vyšší mezí pevností v tahu u vzdálenějších těles by mohly určit finální obraz vlivu polohy na pevnost. Z tohoto důvodu byla některá zkušební tělesa ponechána a budou dále testována. Toto zkoumání bude předmětem méj další práce na ÚMI. Grafy porovnání tahových zkoušek jsou součástí příloh.

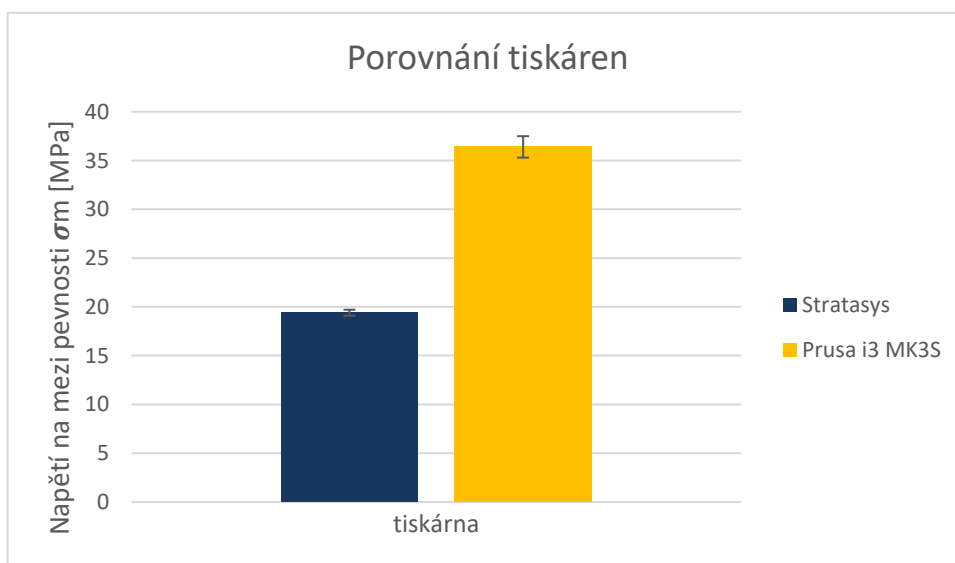
Rozdíl v pevnosti těles připravených na dvou tiskárnách stejného typu (Prusa MK3S) je již znatelný, tisk na obou probíhal na stejném místě ve stejnou dobu, i struny byly od stejného výrobce a stejné barvy. Důvodem

tedy může být rozdílná kalibrace obou tiskáren a tím odlišné výtisky, či rozdíl v pevnosti dvou strun ze stejného materiálu.



Graf 14: Vliv polohy na pevnost tištěných těles

Dalším úkolem bylo porovnání vzorků S.X vytištěných na tiskárně Stratasys F370 se vzorky vytištěnými na tiskárně Prusa i3 MK3S. Tisk byl proveden tak jak je popsán v kapitole 6. Z výsledků tahové zkoušky je patrné, že se nepodařilo dosáhnout podobných výsledků na obou tiskárnách. Zatímco na tiskárně Stratasys dosáhly vzorky průměrného napětí na mezi pevnosti $19,4 \pm 0,31 \text{ MPa}$, na tiskárně Průša byla průměrná mez pevnosti vyšší o 47 %, konkrétně $36,4 \pm 1,10 \text{ MPa}$ (viz graf 13).



Graf 13: Porovnání dosažených pevností na tiskárně Prusa i3 Mk3S - 1 a Stratasys F370

Důvodem je složité nastavení podobných tiskových podmínek na obou tiskárnách. Jak již bylo v práci uvedeno tiskárna Stratasys má pro materiál PLA přesně definované tiskové parametry a tiskárna Prusa podobné nastavení neumožňuje. S ohledem na výsledky zkoušky měl být při tisku vzorků na tiskárně Průša zvolen nižší počet spodních plných vrstev. Vzhledem k rozdílnému zaplnění dílu nebylo dosaženo ani podobných hodnot deformace.

Vliv hustoty výplně (infill) na pevnost je i u materiálu PLA značný, což odpovídá počáteční hypotéze. Byly testovány tři sady vzorků 1.X, 1.X 0 %, 1. X 50 %. Hodnoty získané při tahové zkoušce jsou zobrazeny v tabulce 43.

Tabulka 43: Výsledky tahové zkoušky pro zjištění vlivu výplně na pevnost a schopnost deformace

Procento výplně (infill) [%]	σ_m [MPa]	Poměr vůči pevnosti při 50% výplni	ϵ_{tb} [%]	Poměr pevnost/doba tisku
50	38,5±0,53	1,00	3,6±0,3	0,57
15	32,1±1,18	0,83	3,6±0,2	0,67
0	28,1±1,15	0,73	4,5±0,5	0,70

Z tabulky je patrné, že s klesajícím stupněm výplně nelineárně klesá i napětí na mezi pevnosti v tahu. Při patnáctiprocentní výplni bylo dosaženo 83% hodnoty pevnosti v porovnání se vzorky vyplněnými padesáti procenty. U nevyplněných vzorků byla tato pevnost 73 %. Hodnoty poklesu meze pevnosti v tahu poměrově přibližně odpovídají hodnotám, které ve své práci dosáhl J. Marek u materiálu ABS (tabulka 1). Naopak bylo zjištěno, že rozdíl ve schopnosti deformace se u padesátiprocentních a patnáctiprocentních vzorků neprojevil, vzorky bez výplně měly relativní poměrné prodloužení dokonce o 25 % vyšší. Vzhledem k době tisku a spotřebě materiálu (tabulka 11) při tisku těchto vzorků bych pro aplikace nevyžadující vyšší pevnost doporučil tisk vzorků s 15 % výplně. Tato hodnota výplně se vyskytuje i u všech předdefinovaných nastavení tisku v programu PrusaSlicer.

Posledním úkolem praktické části bylo experimentální ověření maximálního vytisknutelného sklonu dle obr. 19 na tiskárně Prusa i3 MK3S. Za tímto účelem byly zhotoveny celkem tři výtisky. Předpokladem bylo, že detailnější tisk s nižší výškou vrstvy umožní tisknout vyšší sklon. To se však nepotvrdilo, u menšího tělesa s nastavením výšky vrstvy na 0,07 mm se podařilo dosáhnout vizuálně povedeného sklonu 60°. U tělesa s dvojnásobnými rozměry a výškou vrstvy 0,05 mm se skutečně povedl vytisknout maximální sklon 45°. Na tiskárně Prusa MK3S tedy lze vytisknout vyšší sklon než 45°, je k tomu však potřeba vhodných podmínek okolního prostředí a pokud možno menších rozměrů tělesa. Obrázky vytištěných sklonů jsou součástí příloh.

Závěr

Cílem této práce bylo vytvoření přehledu o aditivních technologiích, podpořené vytištěním zkušebních těles z materiálu PLA metodou FDM na třech různých tiskárnách, jejich testování a vyhodnocení získaných výsledků.

Všechny cíle této bakalářské práce byly splněny:

- V teoretické části práce byl vytvořen přehled metod 3D tisku polymerních materiálu (kapitola 2), zároveň byl doplněn přehled polymerních materiálů využívaných v aditivní technologii a přehled volených parametrů, které byly zásadní pro pochopení praktické části práce.
- Byla provedena rešerše prací na téma 3D tisk polymerních materiálů na ÚMI. Tyto výsledky byly uvedeny v teoretické části práce a bylo na ně částečně navázáno v praktické části.
- Byl navržen nový způsob zkoumání těles, a to zkoumání pevnostních charakteristik na základě polohy těles na tiskové podložce, tento experiment bude v dalším studiu doplněn analýzou porozity a rozměrových přesností těles. Dále bylo provedeno zkoumání maximálního vytisknutelného sklonu, při

kterém se došlo k závěru, že za vhodných podmínek je možné vytisknout i sklon 60°, nikoli jen 45° jak uvádějí výrobci tiskáren a tím v některých případech ušetřit materiál za podpěry.

- Byly vytištěny vzorky na tiskárnách Prusa i3 MK3S, Prusa MINI a Stratasys F370, tyto vzorky byly testovány na zkušebním stroji Walter+bai_ag ZD 10/90 a výsledky byly vyhodnoceny v kapitole 8.
- V experimentálním zkoumání bylo zjištěno, že vliv polohy tělesa na podložce na pevnost tělesa je minimální, sice bylo dosaženo mírně vyšších hodnot u těles tištěných dál od sebe, nicméně tento experiment bude podroben dalšímu zkoumání pomocí počítačové tomografie. Zároveň bylo potvrzeno, že hustota výplně má zásadní vliv na pevnost tělesa, a že pokles pevnosti u materiálu PLA je podobný jako u materiálu ABS v práci J. Marka. Dále bylo zjištěno, že klesající hustota výplně neznamena klesající schopnost deformace, naopak vzorky bez výplně dosáhly nejlepších hodnot jmenovitého poměrného prodloužení.
- Z hlediska kombinace doby tisku, spotřeby materiálu, pevnosti tělesa a schopnosti deformace byla jako nejvhodnější hustota výplně zjištěna 15 %.
- Zároveň nebyl zjištěn zásadní rozdíl v pevnosti těles zhotovených na tiskárně Prusa i3 MK3S a Prusa MINI, u tiskárny Stratasys z důvodu nemožnosti nastavení tiskových parametrů nebylo dosaženo požadovaných pevností.

9 Bibliografie

- [1] MCAE SYSTEMS, . *MCAE Slovník 3D pojmů*. První. Brno, 2015.
- [2] *The history of 3d printer: from rapid prototyping to additive fabrication* [online]. 2017 [cit. 2019-11-18]. Dostupné z: <https://www.sculpteo.com/blog/2017/03/01/whos-behind-the-three-main-3d-printing-technologies/>
- [3] PRŮŠA, Josef. *Základy 3D tisku* [online]. První. Praha, Česká republika: Prusa Research s.r.o., 2019 [cit. 2019-11-18]. Dostupné z: <https://www.prusa3d.cz/wp-content/uploads/zaklady-3d-tisku.pdf>
- [4] The Free Beginner's Guide. *3D Printing Industry: The authority on additive manufacturing* [online]. [cit. 2019-11-23]. Dostupné z: <https://3dprintingindustry.com/3d-printing-basics-free-beginners-guide#04-processes>
- [5] Guide to Stereolithography (SLA) 3D Printing in 2019. *Formlabs* [online]. 2019 [cit. 2019-11-23]. Dostupné z: <https://formlabs.com/blog/ultimate-guide-to-stereolithography-sla-3d-printing/>
- [6] Selective Laser Sintering: Encyklopedie 3D tisku. *3D-tisk.cz* [online]. Vydavatelství Nová média, s. r. o., 2013 [cit. 2019-11-23]. Dostupné z: <https://www.3d-tisk.cz/selective-laser-sintering/>
- [7] Fused Deposition Modeling: Most Common 3D Printing Method. *LiveScience* [online]. 2013 [cit. 2019-11-24]. Dostupné z: <https://www.livescience.com/39810-fused-deposition-modeling.html>
- [8] ING. BĚHÁLEK, Luboš, *Polymery*. První. Code Creator, s.r.o.; distribuce publi.cz; 2016, 2016. ISBN 978-80-88058-68-7.

- [9] About Additive Manufacturing: Binder Jetting. *Loughborough University* [online]. [cit. 2020-03-01]. Dostupné z: <https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/binderjetting/>
- [10] Topology optimisation for 3D printing. *3Dnatives* [online]. 2018 [cit. 2019-12-03]. Dostupné z: <https://www.3dnatives.com/en/topology-optimisation140820184/>
- [11] Tensile strength of commercial polymer materials for fused filament fabrication 3D printing. *Additive Manufacturing* [online]. Elsevier B.V. All rights, 2019 [cit. 2019-12-06]. ISSN 2214-8604. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214860416300859>
- [12] 3D Slicer Settings for Beginners. *All3DP* [online]. [cit. 2019-12-03]. Dostupné z: <https://all3dp.com/3d-slicer-settings-beginners-8-things-need-know/>
- [13] *Torsion analysis of the anisotropic behavior of FDM technology* [online]. Springer-Verlag London Ltd., part of Springer Nature, 2018, , 1-3 [cit. 2019-12-06]. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-018-1602-0>. Dostupné z: <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs00170-018-1602-0>
- [14] MAREK, Jiří. *Problematika 3D tisku*. Praha, 2017.. Diplomová práce. ČVUT v Praze, Fakulta strojní.
- [15] VÍCH, Ondřej. *Technologie 3D tisku*. Praha, 2017.. Bakalářská práce. ČVUT v Praze, Fakulta strojní. Vedoucí práce Ing. Zdeňka Jeníková, Ph.D.
- [16] K čemu slouží nastavení perimeters?. *Josef Průša* [online]. 2015 [cit. 2019-12-03]. Dostupné z: <https://josefprusa.cz/k-cemu-slouzi-nastaveni-perimeters/>

- [17] Vše o tryskách s různým průměrem. *Josef Průša* [online]. 2018 [cit. 2019-12-06]. Dostupné z: <https://josefprusa.cz/vse-o-tryskach-s-ruznym-prumerem/>
- [18] *PRUSA RESEARCH: Official Josef Prusa shop* [online]. Prusa Research a.s., Partyzánská 188/7a 170 00 Praha [cit. 2020-01-10]. Dostupné z: <https://shop.prusa3d.com/cs/16-filamenty>
- [19] PRŮŠA, Josef. Technický list : Prusament ASA od Prusa. *Prusa Research* [online]. [cit. 2020-04-23]. Dostupné z: https://shop.prusa3d.com/fotky/ASA_DataSheet_CZE.pdf
- [20] ZAVADIL, Tomáš. *Zkoušky vlastností vzorků z plastu vyrobených 3D tiskem*. 2019.. Bakalářská práce. ČVUT v Praze, Fakulta strojní. Vedoucí práce Ing. Jan Tomíček, Ph.D.
- [21] ČSN EN ISO 527-1. *Plasty – Stanovení tahových vlastností – Část 1: Obecné principy*. Praha: Ústav pro technickou normalizaci a státní zkušebnictví, 2012.
- [22] Analýza vlastností plastů a plastových dílů pro průmyslové partnery. *Katedra strojírenské technologie* [online]. Technická univerzita v Liberci [cit. 2020-04-09]. Dostupné z: <http://www.ksp.tul.cz/reference-lzp>
- [23] Material pro 3D. *Nylon (PA)* [online]. 2019 [cit. 2020-01-10]. Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz>
- [24] *Materials Testing Standards for Additive Manufacturing of Polymer Materials*. NISTIR 8059. National Institute of Standards and Technology, 2015.
- [25] ČSN EN ISO 527-2. *Plasty – Stanovení tahových vlastností – Část 2: Zkušební podmínky pro tvářené plasty*. Praha: Ústav pro technickou normalizaci a státní zkušebnictví, 2012.

- [26] *Nauka o materiálu I. a II. cvičení*. Praha: Česká technika, 2014. ISBN 978-80-01-05550-2.
- [27] *Zkoušky plastů dle ISO 527-2: Metodiky a normy: JD Dvořák* [online]. [cit. 2020-04-23]. Dostupné z: <https://www.testsysteme.cz/iso-527-2-stanoveni-tahovych-vlastnosti-tvarenych-plastu>
- [28] *Kurz fyziky: Poissonův poměr: Matematicko-fyzikální fakulta Univerzita Karlova* [online]. [cit. 2020-04-23]. Dostupné z: https://physics.mff.cuni.cz/kfpp/skripta/kurz_fyziky_pro_DS/display.php/kontinuum/3_3
- [29] ZWICK/ROELL, . *ISO 527 and ASTM D638 – explaining the difference: Materials Testing*. Zwick GmbH & Co. KG August-Nagel-Strasse 11, 89079 Ulm, Germany, 2014, , 1-5.
- [30] *Plasty - Stanovení rázové houževnatosti metodou Charpy*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.
- [31] KREJZEK, Ladislav. *Využití počítačové tomografie v rámci kontroly kvality ve strojírenském průmyslu*. Praha, 2016. Bakalářská práce. ČVUT v Praze, Fakulta strojní. Vedoucí práce Ing. Libor Beránek, Ph.D.
- [32] *CAD.cz*. 2016, 17(3). ISSN 1802-6168.
- [33] *Aniwaa: Stratasys f370* [online]. 2020 [cit. 2020-05-16]. Dostupné z: <https://www.aniwaa.com/product/3d-printers/stratasys-f370/>
- [34] *Kurzy* [online]. ČNB, Česká Republika, 2020 [cit. 2020-05-16]. Dostupné z: <https://www.kurzy.cz/kurzy-men/>
- [35] *How Do 3D Printers Work?: The 4 3D Technologies You Should Know. Pinshape* [online]. 2016 [cit. 2020-04-29]. Dostupné z: <https://pinshape.com/blog/how-do-3d-printers-work-sla-fdm-sls/>

Seznam obrázků a grafů

Obrázek 1: Technologie SLA [35] – UPRAVENO	15
Obrázek 2: Technologie SLS [35]– UPRAVENO	16
Obrázek 3: Schéma tiskové hlavy v řezu – UPRAVENO [3]	18
Obrázek 4: Technologie FDM [35]– UPRAVENO	19
Obrázek 5: Vzory výplně při různých hodnotách infillu [3] - UPRAVENO	22
Obrázek 6: Různé nastavení perimetrů 2, 3, 5 a 6 [3]	24
Obrázek 7: Vliv teploty okolí na tisk, vzor výplně Gyroid-VLASTNÍ	25
Obrázek 8: Porovnání rychlostí pohybu tiskové hlavy v programu PrusaSlicer - VLASTNÍ	26
Obrázek 9: Díl zobrazený v PrusaSlicer, záměrné nastavení tiskových podpěr (v obr. zeleně) - VLASTNÍ	27
Obrázek 10: Příklad výtisku znehodnoceného vytvářením stringů při tisku součásti [18]	31
Obrázek 11: Zkušební stroj Walter+bai ag ZD 10/90 - VLASTNÍ	34
Obrázek 12: Rozměry zkušebního tělesa – VLASTNÍ	34
Obrázek 13: Znázornění průběhu tahové zkoušky čtyř vzorků [32]	35
Obrázek 14: Tiskárna Prusa i3 MK3S-VLASTNÍ	41
Obrázek 15: Tiskárna Prusa MINI-VLASTNÍ	42
Obrázek 16: Tiskárna Stratasys F370-VLASTNÍ	43
Obrázek 17: Vzor výplně gyroid použit u všech výtisků, kromě těch s označením S - VLASTNÍ	46
Obrázek 18: Základní struktura "prázdných" vrstev u tiskárny Stratasys F370 - VLASTNÍ	46
Obrázek 19: Označení zkoumaných sklonů - VLASTNÍ	47
Obrázek 20: Poloha A-VLASTNÍ	48
Obrázek 21: Poloha B-VLASTNÍ	48
Obrázek 22: Zkušební tělesa vytištěná na tiskárně Stratasys F370, poloha C-VLASTNÍ	49
Obrázek 23: Zobrazení tisku ve sliceru GrabCAD - VLASTNÍ	50
Obrázek 24: Neúspěšný tisk na tiskárně firmy Stratasys-VLASTNÍ	51
Obrázek 25: Tištěné těleso pro zkoušku sklonu	79
Obrázek 26: Test sklonu	79

Graf 1: Porovnání rázové houževnatosti PET-G s různými vzory výplně – VLASTNÍ; data [15]	23
Graf 2: Příklad záznamu tahové zkoušky tiskových strun	54
Graf 3: Průběh tahové zkoušky vzorků S.X	55
Graf 4: Průběh tahové zkoušky vzorků 1S.X	57
Graf 5: Průběh tahové zkoušky vzorků 1.X	58
Graf 6: Průběh tahové zkoušky vzorků 1D.X	59
Graf 7: Průběh tahové zkoušky vzorků M.X	60
Graf 8: Průběh tahové zkoušky vzorků MD.X	61
Graf 9: Průběh tahové zkoušky vzorků 1.X 50 %	62
Graf 10: Průběh tahové zkoušky vzorků 1.X 0 %	63
Graf 11: Průběh tahové zkoušky vzorků 2.x	64
Graf 12: Průběh tahové zkoušky vzorků 2D.X	65
Graf 13: Porovnání dosažených pevností na tiskárně Prusa i3 Mk3S - 1 a Stratasys F370	67
Graf 14: Vliv polohy na pevnost tištěných těles	67
Graf 15: Porovnání vzorků 1.X (červená) a 1.DX (modrá)	78
Graf 16: Porovnání vzorků 1.X (červená), 1.X 0 % (zelená), 1.X 50% (modrá)	78
Graf 17: Vzorek z tiskárny Stratasys (červená) a Prusa MK3S (modrá)	79

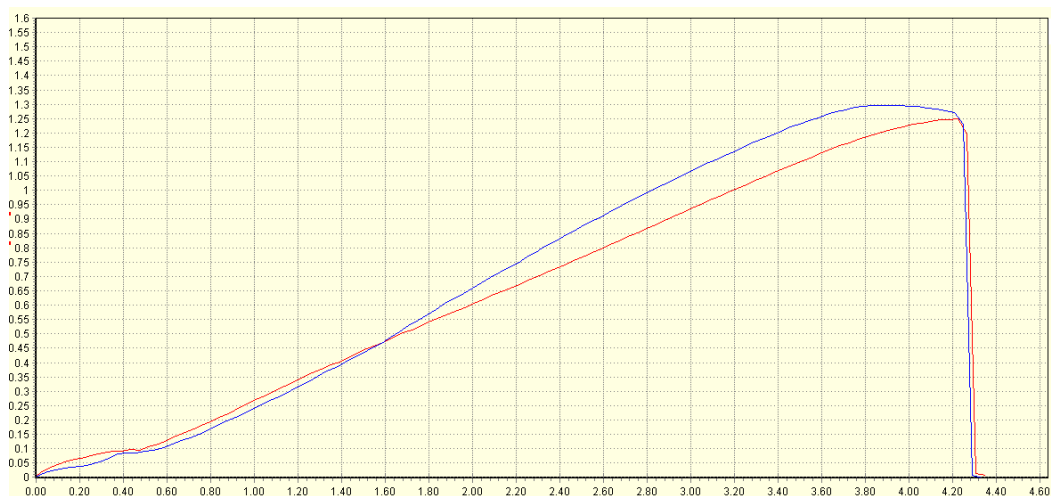
Seznam tabulek

Tabulka 1: Vliv procenta výplně na mez pevnosti v tahu [14]	21
Tabulka 2: porovnání meze pevnosti v tahu pro různé vzory výplně, materiál ASA, 80% výplň [14]	22
Tabulka 3: Vliv počtu perimetrů na mez pevnosti v tahu, 100% výplň [14]	24
Tabulka 4 Porovnání meze pevnosti v tahu u různých orientací tisku vzorků [19] [20]	28
Tabulka 5: Značení vzorků	44
Tabulka 6: Seznam výtisků pro tahovou zkoušku	45
Tabulka 7: Seznam výtisků pro zkoušku rázem v ohybu	47
Tabulka 8: Parametry tisku na tiskárně firmy Stratasys pro tisk vzorků S.X	50
Tabulka 9: Parametry tisku vzorků 1S.X	51
Tabulka 10: Základní porovnání tisku na tiskárnách Stratasys F370 a Prusa i3- MK3S	52
Tabulka 11: parametry tisku pro zjištění vlivu výplně na pevnost	53

Tabulka 12: Pevnostní hodnoty tiskových strun.....	54
Tabulka 13: Hodnoty odečtené z průběhu tahové zkoušky vzorků S.X.....	55
Tabulka 14: Vypočtené hodnoty ϵ_{tb} a σ_m pro sadu vzorků S.X.....	56
Tabulka 15: Průměrná hodnota a směrodatná odchylka pro sadu vzorků S.X.....	56
Tabulka 16: Hodnoty odečtené z průběhu tahové zkoušky vzorků 1S.X.....	57
Tabulka 17: Vypočtené hodnoty ϵ_{tb} a σ_m pro sadu vzorků 1S.X.....	57
Tabulka 18: Průměrná hodnota a směrodatná odchylka pro sadu vzorků 1S.X.....	57
Tabulka 19: Hodnoty odečtené z průběhu tahové zkoušky vzorků 1.X.....	58
Tabulka 20: Vypočtené hodnoty ϵ_{tb} a σ_m pro sadu vzorků 1.X.....	58
Tabulka 21: Průměrná hodnota a směrodatná odchylka pro sadu vzorků 1.X.....	58
Tabulka 22: Hodnoty odečtené z průběhu tahové zkoušky vzorků 1D.X.....	59
Tabulka 23: Vypočtené hodnoty ϵ_{tb} a σ_m pro sadu vzorků 1D.X.....	59
Tabulka 24: Průměrná hodnota a směrodatná odchylka pro sadu vzorků 1D.X.....	59
Tabulka 25: Hodnoty odečtené z průběhu tahové zkoušky vzorků M.X.....	60
Tabulka 26: Vypočtené hodnoty ϵ_{tb} a σ_m pro sadu vzorků M.X.....	60
Tabulka 27: Průměrná hodnota a směrodatná odchylka pro sadu vzorků M.X.....	60
Tabulka 28: Hodnoty odečtené z průběhu tahové zkoušky vzorků MD.X.....	61
Tabulka 29: Vypočtené hodnoty ϵ_{tb} a σ_m pro sadu vzorků MD.X.....	61
Tabulka 30: Průměrná hodnota a směrodatná odchylka pro sadu vzorků MD.X.....	61
Tabulka 31: Hodnoty odečtené z průběhu tahové zkoušky vzorků 1.X 50 %.....	62
Tabulka 32: Vypočtené hodnoty ϵ_{tb} a σ_m pro sadu vzorků 1.X 50 %.....	62
Tabulka 33: Průměrná hodnota a směrodatná odchylka pro sadu vzorků 1.X 50 %.....	62
Tabulka 34: Hodnoty odečtené z průběhu tahové zkoušky vzorků 1.X 0 %.....	63
Tabulka 35: Vypočtené hodnoty ϵ_{tb} a σ_m pro sadu vzorků 1.X 0 %.....	63
Tabulka 36: Průměrná hodnota a směrodatná odchylka pro sadu vzorků 1.X 0 %.....	63
Tabulka 37: Hodnoty odečtené z průběhu tahové zkoušky vzorků 2.X.....	64
Tabulka 38: Vypočtené hodnoty ϵ_{tb} a σ_m pro sadu vzorků 2.X.....	64
Tabulka 39: Průměrná hodnota a směrodatná odchylka pro sadu vzorků 2.X.....	64
Tabulka 40: Hodnoty odečtené z průběhu tahové zkoušky vzorků 2D.X.....	65
Tabulka 41: Vypočtené hodnoty ϵ_{tb} a σ_m pro sadu vzorků 2D.X.....	65
Tabulka 42: Průměrná hodnota a směrodatná odchylka pro sadu vzorků 2D.X.....	65
Tabulka 43: Výsledky tahové zkoušky pro zjištění vlivu výplně na pevnost a schopnost deformace.....	68

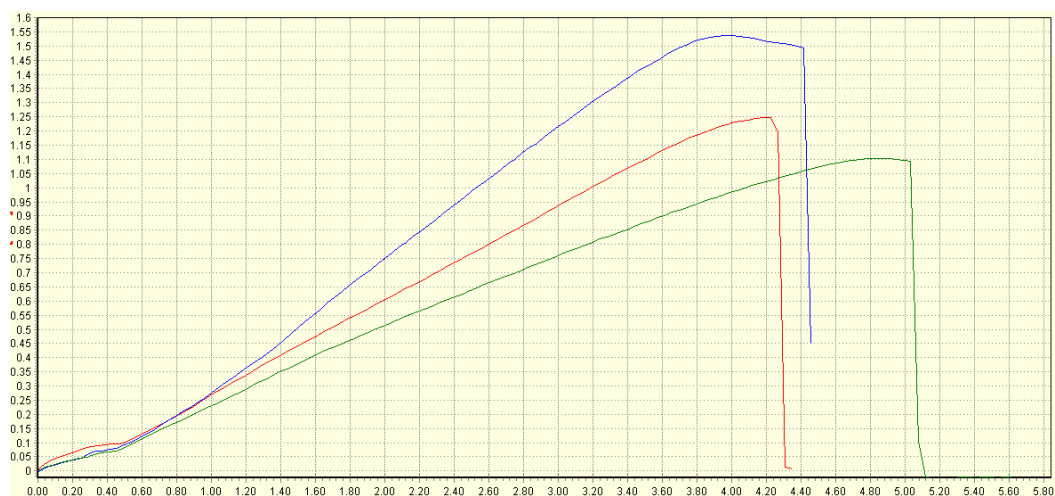
Přílohy

Porovnání vzorků blíže (červená) a dále (modrá) od sebe:



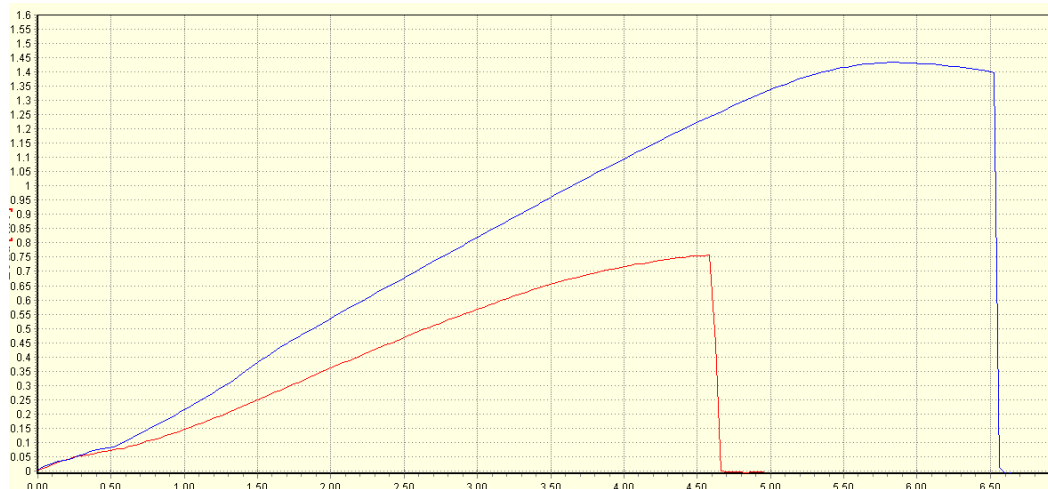
Graf 15: Porovnání vzorků 1.X (červená) a 1.DX (modrá)

Porovnání vzorků s různou hustotou výplně:



Graf 16: Porovnání vzorků 1.X (červená), 1.X 0% (zelená), 1.X 50% (modrá)

Porovnání tiskárny Stratasys a Prusa MK3S (odlišně zvolené parametry, nemožnost nastavit stejné):



Graf 17: Vzorek z tiskárny Stratasys (červená) a Prusa MK3S (modrá)

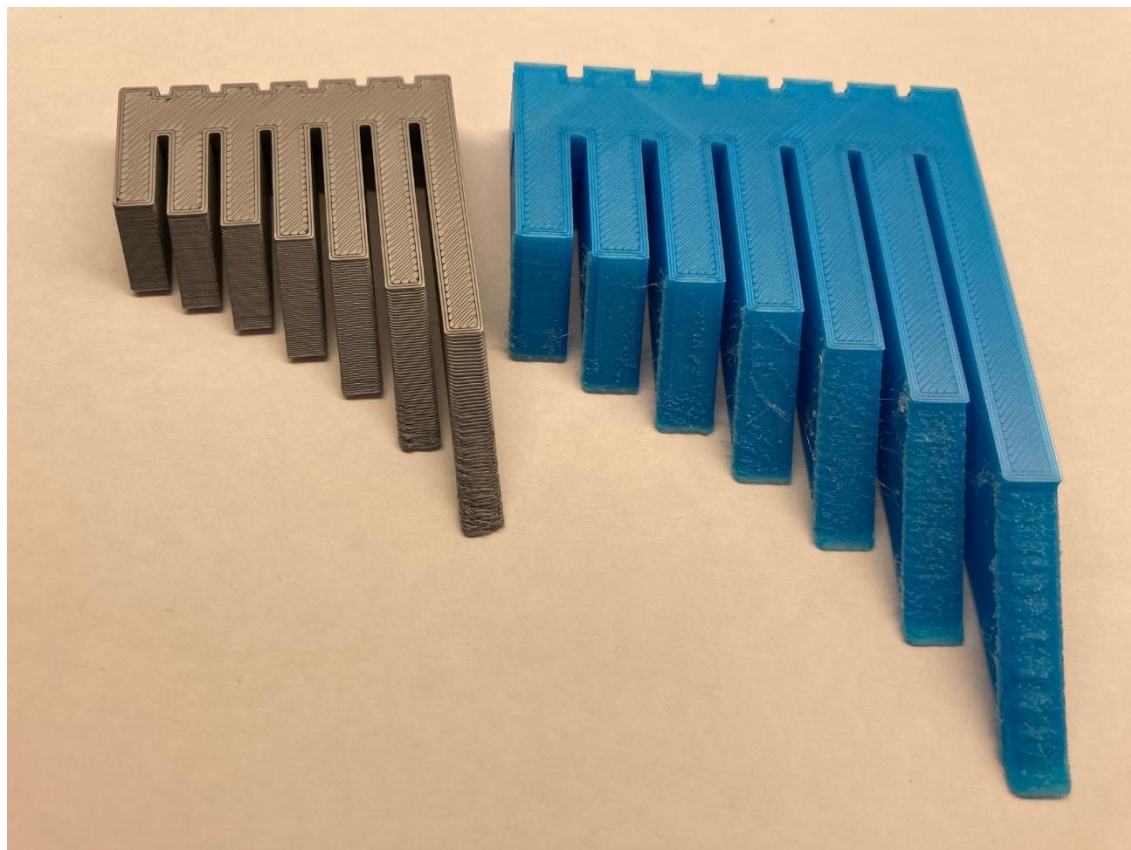
Tisk maximálního sklonu:



Obrázek 25: Tištěné těleso pro zkoušku sklonu

Šedivý vzorek zvolen poloviční rozměr oproti modrému, výška vrstvy 0,07 mm. Modrý vzorek tištěný s výškou vrstvy 0,05 mm.

Fotografie vzorků ze spodní strany (strana na tiskové podložce), vidíme zhoršující se navazování vrstev při rostoucím sklonu. (Sklon roste zleva doprava).



Obrázek 26: Výsledek testu maximálního sklonu, vlevo těleso polovičních rozměrů