

**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

FAKULTA STROJNÍ



**BAKALÁŘSKÁ
PRÁCE**

Janů

Jan

2020

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Janů** Jméno: **Jan** Osobní číslo: **474838**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav strojírenské technologie**
Studijní program: **Teoretický základ strojírenského inženýrství**
Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Problematika 3D tisku tenkostěnných konstrukcí FDM technologií

Název bakalářské práce anglicky:

Problematic 3D print of thickness wall parts by FDM technology

Pokyny pro vypracování:

Úvod
Výrobní parametry aditivních technologií plastových dílců
Filamenty pro FDM technologii a jejich materiálové a mechanické vlastnosti
Experimentální část
Závěr

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

doc. Ing. Aleš Herman, Ph.D., ústav strojírenské technologie FS


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


Datum zadání bakalářské práce: **29.04.2020**

Termín odevzdání bakalářské práce: **31.07.2020**

Platnost zadání bakalářské práce: **31.12.2020**


doc. Ing. Aleš Herman, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce


doc. Ing. Ladislav Kolář, Ph.D.
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.

29.5. 2020
Datum převzetí zadání

Jan
Podpis studenta

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá tahovými vlastnostmi plastových dílů vyrobených aditivní technologií Fused Deposition Modeling. Díly byly vyrobeny z kompozitního materiálu PC-ABS. Práce porovnává různé nastavení orientace tisku a použití hustoty výplně z důvodu zjištění nejpříznivějšího tiskového nastavení pro pevnost v tahu.

Klíčová slova

3D tisk, orientace tisku, výplň, tahové vlastnosti, materiál, Fused Deposition Modeling

Abstract

This bachelor thesis deals with the tensile properties of plastic parts produced by additive technology Fused Deposition Modeling. The parts were made of composite material PC-ABS. The work compares different settings of print orientation and the use of infill density in order to find the most favorable print setting for a tensile strength.

Keywords

3D printing, print orientation, infill, tensile properties, material, Fused Deposition Modeling

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci na téma **Problematika 3D tisku tenkostěnných konstrukcí FDM technologií** vypracoval samostatně a veškeré literární prameny a zdroje informací, které jsem použil, cituji a uvádím v seznamu použité literatury a zdrojů informací.

Dále prohlašuji, že nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne

.....

Jméno, Příjmení

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Aleši Hermanovi, Ph.D. za pomoc a vstřícný přístup při tvorbě této práce. Dále bych chtěl poděkovat panu Ing. Nikodému Heczkovi za odborné konzultace k experimentální části práce. Také děkuji všem ostatním, kteří se podíleli na realizaci experimentu, a své rodině za podporu.

Obsah

1.	Úvod.....	8
1.1.	Aditivní výroba obecně	8
1.2.	Cíl práce.....	8
2.	Technologie 3D tisku FDM/FFF.....	9
2.1.	Popis technologie.....	9
2.2.	Rozdělení tiskáren	10
2.2.1.	Rozdělení podle způsobu pohybu	10
2.2.2.	Rozdělení podle systému výrobce.....	11
2.3.	Komponenty tiskárny	12
3.	Materiály	15
3.1.	Vady materiálů při tisku	16
3.2.	PLA.....	17
3.3.	ABS	18
3.4.	PET/PETG	19
3.5.	Nylon	20
3.6.	TPU.....	21
3.7.	PC	22
3.8.	Zhodnocení základních stavebních materiálů.....	23
4.	Praktická část.....	24
4.1.	Návrh zkušebního tělesa.....	24
4.2.	Varianty vzorků	25
4.3.	Příprava tisku	26
4.4.	Tisk	27
4.5.	Použitý materiál PC-ABS	28
4.6.	Příprava na tahovou zkoušku.....	29
4.7.	Zkouška tahem.....	30
4.8.	Výsledky.....	32
4.8.1.	Orientace tisku naplocho při výplni 100 %.....	33
4.8.2.	Srovnání výplně při stejné orientaci	34
4.8.3.	Srovnání orientace při stejné hustotě výplně.....	36
5.	Závěr.....	38
6.	Seznam obrázků	40
7.	Seznam grafů a tabulek	41
8.	Seznam použitých zdrojů	42

9. Seznam příloh.....	44
-----------------------	----

1. Úvod

Technologie 3D tisku je neustále se rozvíjející odvětví. Součásti vyrobené aditivní technologií se v dnešní době nepoužívají pouze na prototypování výrobku, ale i jako funkční díly. Je zapotřebí, aby byly tyto díly schopné odolávat různým druhům namáhání. Nejdostupnější a nejrozšířenější technologií 3D tisku je technologie FDM. Ve své práci se zabývám popsáním této technologie a materiálů v ní používaných. V praktické části porovnávám tahové vlastnosti vzorků touto technologií vyrobených za různého nastavení tisku.

1.1. Aditivní výroba obecně

Základem každého procesu 3D tisku je digitální model, který lze získat různými možnostmi. Model může být vytvořen pomocí 3D softwarových programů a editorů nebo může být požadovaný díl naskenován 3D skenerem. Soubory modelů pro 3D tisk jsou nejčastěji ve formátu .stl. [1]

Následuje vložení modelu do přípravného softwaru, takzvaného sliceru. V něm se nastavují parametry, které se liší podle zvolené tiskárny a také konkrétního sliceru. Hlavní funkce sliceru spočívá v převedení modelu a jeho parametrů na soubor čitelný pro tiskárnu. [1]

Posledním krokem výroby je samotný tisk. Tiskárna vytiskne díl podle vloženého G-codu a po dokončení poslední vrstvy je součást ihned k použití. Může následovat finální úprava, takzvaný postprocessing, při kterém dojde k vylepšení povrchu broušením, kytováním, lakováním apod. [1]

1.2. Cíl práce

- Popis problematiky aditivní technologie FDM a materiálů v této technologii využívaných
- Porovnání tahových vlastností plastových dílů vyrobených technologií FDM při různé výplni a orientaci tisku

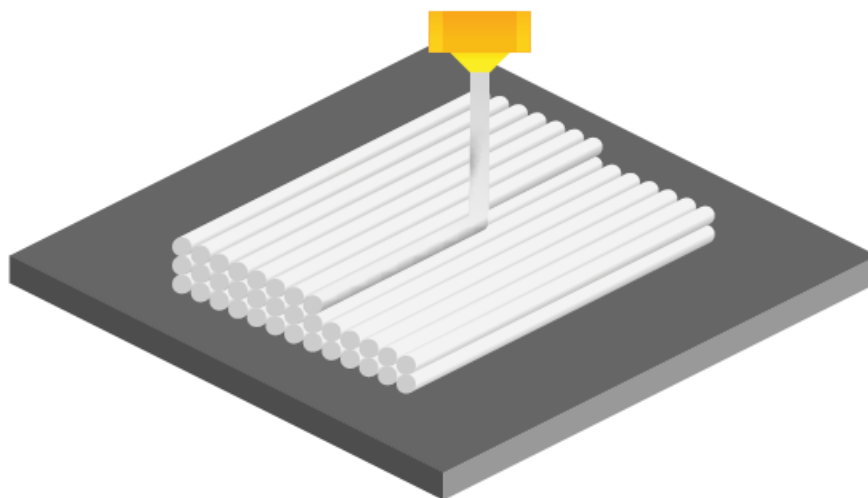
2. Technologie 3D tisku FDM/FFF

2.1. Popis technologie

Tato metoda využívá vytlačování termoplastického materiálu. Je to nejdostupnější a nejrozšířenější aditivní technologie. [2]

Hlavním rozdílem mezi technologiemi FDM a FFF je název. Firma Stratasys, která s technologií FDM přišla, si jméno Fused Deposition Modeling zaregistrovala a také vlastní většinu patentů. FFF neboli Freeform Fabrication je jakousi zjednodušenou verzí technologie pod jiným názvem. [2]

Proces této technologie spočívá v roztavení dodávaného vlákna materiálu přes vyhřívanou tiskovou hlavu (extruder) a následném vytlačení vrstvy po vrstvě tryskou na tiskovou podložku (Obr. 2.1.1) podle G-codu vloženého do tiskárny. Každá vrstva po vytlačení zatuhne a následně je na ni nanášena další vrstva. V případě, že vyráběný díl má převislou geometrii, a nelze tedy navázat novou vrstvu na vrstvu předchozí, je zapotřebí vytvořit podpurné struktury. Tyto struktury mohou být dvojího typu. Prvním typem je stavba podpurných struktur ze speciálního materiálu k tomu určenému, který lze následně chemickou cestou rozpustit ve vodě nebo například v roztoku hydroxidu sodného. Druhý typ podpěr je ze stejného materiálu jako díl samotný. Po dokončení procesu tisku je nutné podpěry z dílu odstranit odlomením, případně odstřížením. [2]



Obrázek 2.1.1 Schéma vytlačování materiálu do vrstev [1]

Mezi hlavní výhody FDM/FFF technologie patří velikost tiskáren a v porovnání s ostatními technologiemi cena výroby dílu a také samotné tiskárny. [2]

K hlavním nevýhodám z principu procesu výroby patří spojování jednotlivých vrstev. V lepším případě jsou na výtisku patrné okem. V horším případě může z důvodu špatné přilnavosti materiálu dojít k netěsnosti dílu a jeho špatným mechanickým vlastnostem. [2]

Materiálů využívaných pro FDM technologii je celá řada a stále vznikají nové. Podrobněji se jimi zabývám v další části své práce.

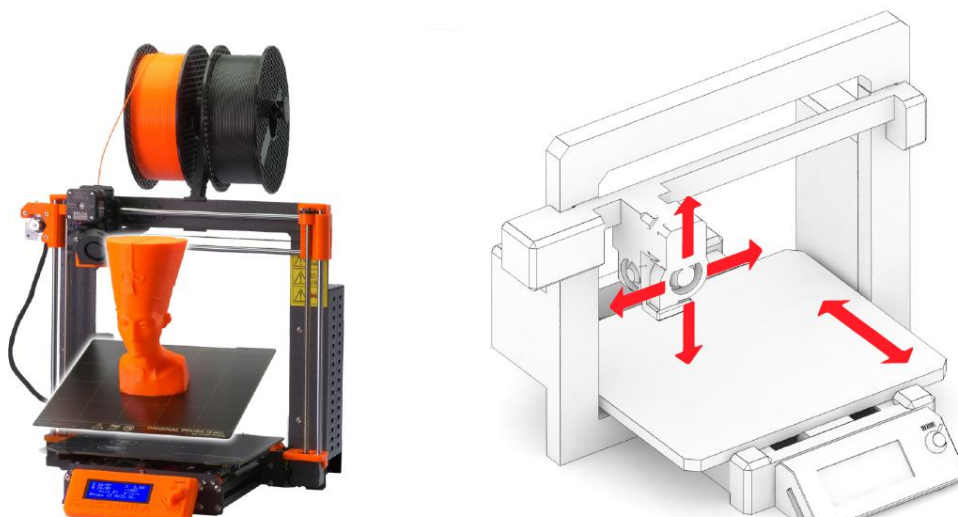
2.2. Rozdělení tiskáren

FDM tiskárny lze z důvodu lepší přehlednosti dělit podle různých kritérií. Hlavním kritériem je způsob pohybu tiskové hlavy/tiskové podložky. Pro účely této práce zde uvádím ještě dělení podle systému daného výrobcem. [1]

2.2.1. Rozdělení podle způsobu pohybu

1. Kartézská tiskárna.

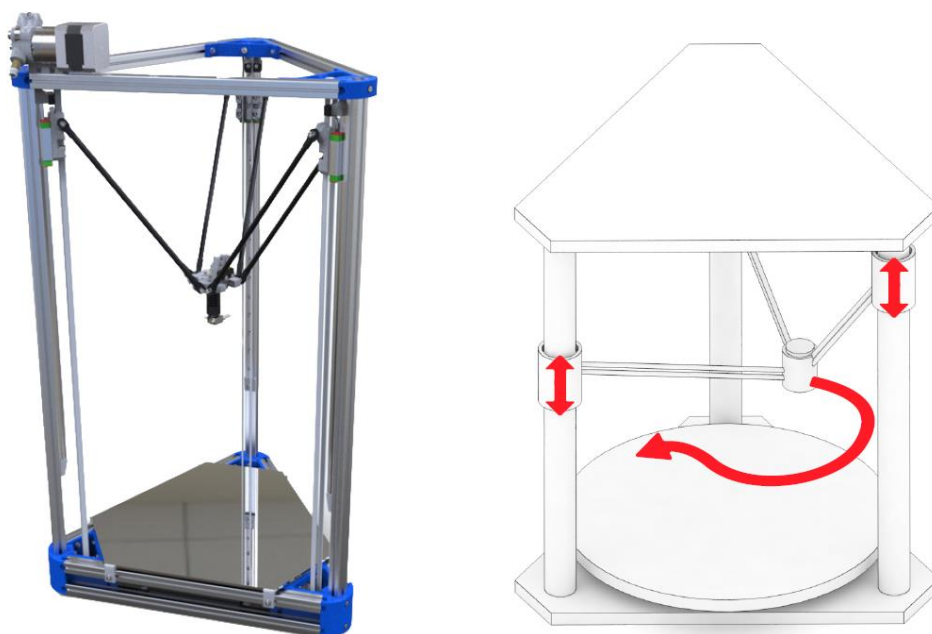
Pohybuje se ve třech lineárních osách. Tisková hlava se pohybuje v osách X a Z a tisková plocha v ose Y. [1]



Obrázek 2.2.1 Kartézská tiskárna [1]

2. Delta tiskárna.

Zavěšená tisková hlava na třech ramenech se může pohybovat v jakémkoli směru. Tisková plocha se nepohybuje. [1]



Obrázek 2.2.2 Delta tiskárna [1]

3. Polar tiskárna.

Nejméně používaný systém založený na polárním pohybu extruderu ve dvou osách a podložce konající rotační pohyb. Konstrukce tiskárny je jednoduchá, ale příprava modelu je náročnější. [1]



Obrázek 2.2.3 Polar tiskárna [1]

2.2.2. Rozdělení podle systému výrobce

Otevřený systém: Výrobce umožňuje zákazníkovi používat materiály jiných výrobců, bez nutnosti certifikací a různých omezení. Stejně je to s používáním softwaru na slicování. Je třeba brát na zřetel, že při použití materiálu nebo softwaru od jiného výrobce může dojít k nedokonalému tisku a k tvorbě zmetků. [3]

Uzavřený systém: Tiskárna pomocí systému cartridge s čipem načte typ vloženého materiálu a automaticky nastaví veškeré parametry. Není tedy možné použít materiál jiného výrobce. K tvorbě zmetků při uzavřeném systému dochází jen ve výjimečných případech. [3]

2.3. Komponenty tiskárny

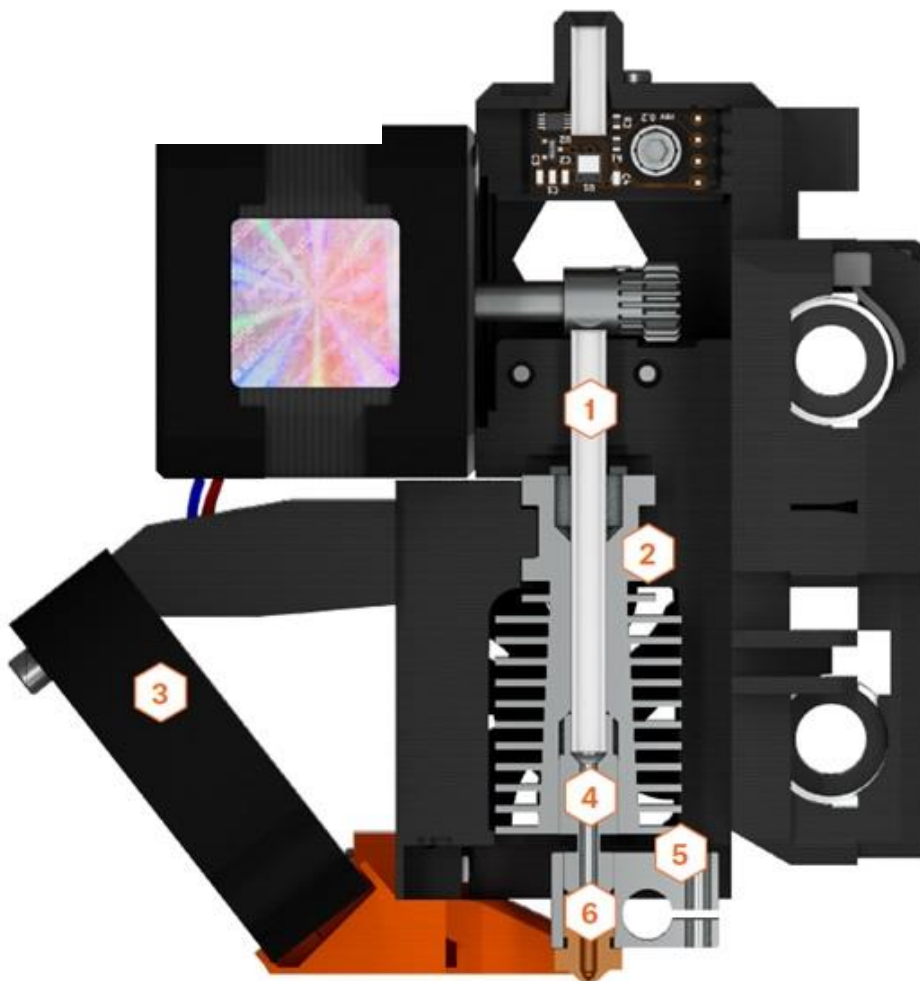
Následuje popis základních komponentů, které obsahuje každá FDM tiskárna, pokročilejší tiskárny mohou mít ještě komponenty zlepšující kvalitu tisku či zjednodušující obsluhu stroje: např. automatický zavaděč materiálu apod.

Extruder

Do extruderu neboli tiskové hlavy je dodáván materiál v pevném stavu ve formě tiskové struny teflonovou trubičkou. Struna dále prochází přes chladič, izolátor a ohříváč až do trysky. Chladič má za úkol co nejvíce zmenšit oblast mezi roztaveným a pevným filamentem. V ohříváči se materiál roztaví a je vytlačován přes trysku. Mezi ohříváčem a tryskou se nachází termistor pro zpětnou vazbu o teplotě roztaveného materiálu. [1]

Extruder

- 1 Teflonová (PTFE) trubička
- 2 Heatsink (chladič)
- 3 Tiskový ventilátor
- 4 Heat break (izolátor)
- 5 Heater block
- 6 Tryska



Obrázek 2.3.1 Extruder [1]

Tisková plocha

Nejčastěji je to vyhřívaná deska, která pomáhá při tisku z materiálu s výraznou tepelnou roztažností. Nedochází ke zkroucení. [1] Rozměry celkového tiskového prostoru se udávají ve formátu X/Y/Z. Nejmenší tiskárny mají stavební komoru od 120 x 120 x 120 mm. Nejběžnější tiskárny mají 250 x 250 x 250 mm, ale v produkční sféře existují i tiskárny s možností pohybu v jedné ose až 1000 mm. Velikost stavební komory má vliv na několik věcí. Tou hlavní je maximální velikost tištěného dílu, ale velmi důležitá je také správná orientace tisku, kterou tiskárna s malými rozměry stavební komory nemusí umožňovat. [3]



Obrázek 2.3.2 Tisková plocha [1]

Rám

Nosná konstrukce tiskárny. Pro vysokou kvalitu tisku je důležité, aby byl tuhý, co nejpevnější a tlumil vibrace. [1]



Obrázek 2.3.3 Rám [1]

Krokové motory.

O pohyb tiskové hlavy a podložky i podávání materiálu se starají krokové motory. [1]



Obrázek 2.3.4 Krokový motor [1]

Řídicí jednotka

Řídí pohyby všech motorů a topných těles v extruderu a na podložce zpracováním dodaného G-codu. [1]



Obrázek 2.3.5 Řídicí jednotka [1]

3. Materiály

Materiál pro tiskárny FDM/FFF je dodáván ve formě filamentu neboli tiskové struně namotané na špulce. Množství různých druhů materiálu je v dnešní době velké a stále probíhá vývoj materiálů nových. Jejich základní rozdělení je podle technologie tisku, požadovaných mechanických vlastností výsledného výrobku a v neposlední řadě barvy a vzhledu. Každý z materiálů vyžaduje specifické nastavení tisku. To záleží i na výrobcí, protože stejný typ materiálu od různých výrobců se může mírně lišit, má jiné vlastnosti a vyžaduje jiné nastavení. [1]

Mezi základní čisté polymery využívané pro 3D tisk patří PLA, ABS, PET, Nylon, TPU a PC. [4] Na následujících stranách si podrobněji popíšeme jejich vlastnosti. Dříve však zařazují krátkou kapitolu o možných vadách při tisku, které pak zmiňují u materiálů s tendencí tyto vady vykazovat.



Obrázek 2.3.1 Filamenty [5]

3.1. Vady materiálů při tisku

Ne všechny díly vyrobené aditivní technologií jsou bezchybné. Může dojít k několika vadám výrobků, daným buď nastavením tisku nebo vlastnostmi použitého materiálu. Pro přehlednost zde uvádím některé pojmy vyjadřující tyto vady, které v popisech jednotlivých materiálů používám. Jedná se o anglické pojmy, které nemají vypovídající český překlad.

Warping

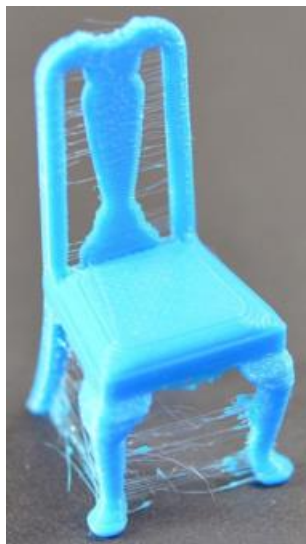
Jedná se o vadu převážně u velkých modelů. Na začátku tisku jsou první vrstvy přilnuté k tiskové podložce, jakmile se model začne ochlazovat, celý díl se bude smršťovat a vlnit. Toto vede k tomu, že část modelu se začne oddělovat od tiskové podložky. Může dojít k uvolnění celého modelu a tisk selže. [6]



Obrázek 3.1.1 Ukázka warping [6]

Stringing

Jde o velmi tenká vlákna materiálu v prostoru mezi dvěma místy modelu, ve kterém žádný materiál být nemá. Způsobené je to tím, že materiál vytéká z trysky při pohybu extruderu mezi těmito dvěma místy. [7]



Obrázek 3.1.2 Ukázka stringing [7]

3.2. PLA

Kyselina polymléčná neboli PLA je jedním z nejvíce používaných materiálů pro technologii FDM, jelikož je dostupný a levný. Tisk probíhá při nízké teplotě a není potřeba tisknout na vyhřívanou podložku. Zároveň je to jeden z nejekologičtějších materiálů, protože hlavní složky jsou získávány z rostlin jako kukuřice či cukrová třtina a z obilovin. Díky tomu je PLA biologicky rozložitelné. Vedlejším efektem rostlinného původu je nízká úroveň zápachu při tisku. [8]

Nastavení tisku

- Teplota tiskové hlavy: 190–220 °C
- Teplota vyhřívané podložky: 45–60 °C
- Chlazení vytištěné vrstvy: Ano

Běžné aplikace

- Zkušební a kalibrační prototypy
- Rozměrově přesné sestavy
- Dekorační díly

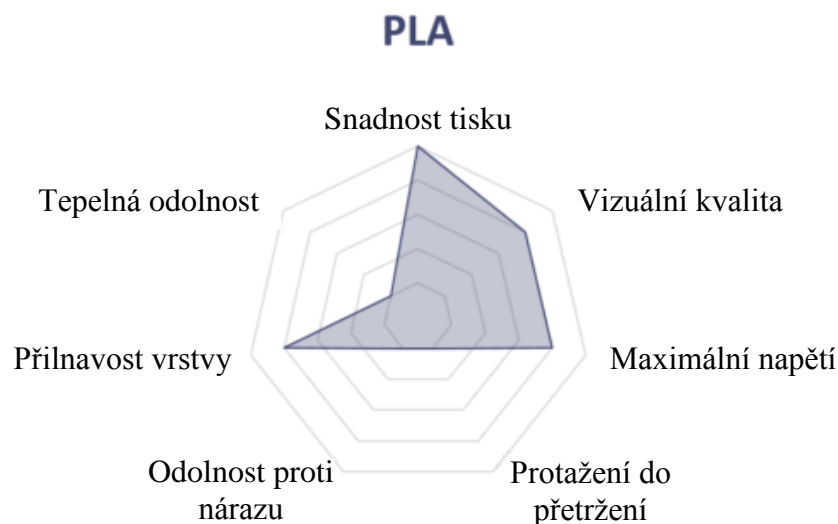
Výhody

- Nízké náklady
- Dobrá tuhost a pevnost
- Nízká tepelná roztažnost
- Rozměrová přesnost
- Skladovatelnost

Nevýhody

- Nízká tepelná odolnost (do 60 °C)
- Křehkost
- Nevhodné pro venkovní použití (sluneční záření a povětrnostní vlivy)
- Stringing

[8]



Obrázek 3.2.1 Profil materiálu PLA [4]

3.3. ABS

Akrylonitril-butadien-styren neboli ABS je levný materiál vhodný pro tisk odolných součástí, které mají vydržet vyšší teploty než v případě PLA. [1]

Je to jeden z prvních materiálů použitých pro průmyslový 3D tisk. Dnes je stále hojně využíván díky svým mechanickým vlastnostem a nízké pořizovací ceně. ABS má vysokou houževnatost a odolnost proti nárazu. Materiál je vysoce tepelně odolný. Velkou předností materiálu ABS je možnost vyhlazení vrstev pomocí acetonu. [9]

Nastavení tisku

- Teplota tiskové hlavy: 220–250 °C
- Teplota vyhřívané podložky: 95–110 °C
- Chlazení vytištěné vrstvy: Ne

Běžné aplikace

- Zkušební a kalibrační prototypy
- Funkční díly
- Dekorační díly

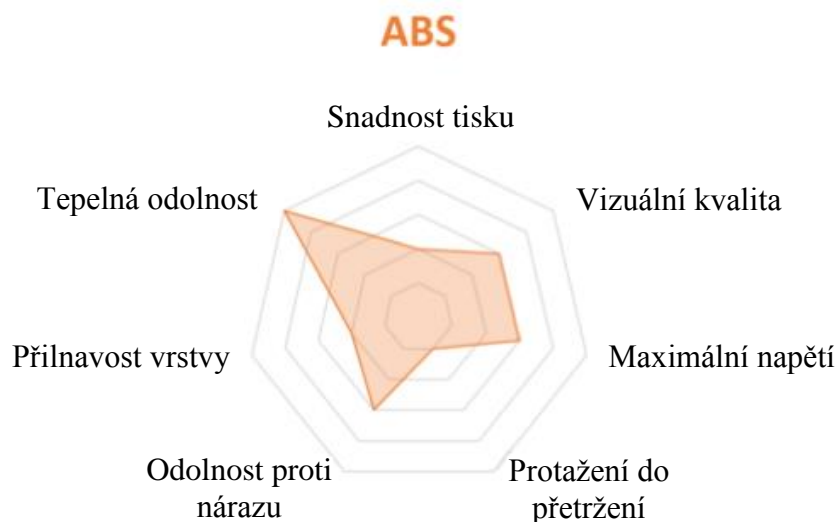
Výhody

- Nízké náklady
- Odolnost proti nárazu a opotřebení
- Nízká úroveň stringing
- Tepelná odolnost

Nevýhody

- Warping
- Zápach
- Díly se smršťují

[9]



Obrázek 3.3.1 Profil materiálu ABS [4]

3.4. PET/PETG

Polyetylen tereftalát zkráceně PET je materiál běžně využívaný pro výrobu plastových lahví na vodu. Je to polotuhý materiál s dobrou odolností proti nárazu, ale má horší odolnost proti opotřebení kvůli měkkému povrchu. PET má velice dobré tepelné charakteristiky a při ochlazení vytištěného dílu nedochází ke smršťování. Díly jsou proto rozměrově přesné. Tento materiál se vyskytuje v mnoha různých variantách. Nejrozšířenější je PETG, který je oproti PET modifikován glykolem. [10] Ten dodává materiálu větší pružnost. S tím souvisí i lepší odolnost proti nárazu. [11]

Nastavení tisku

- Teplota tiskové hlavy: 230–250 °C
- Teplota vyhřívání podložky: 75–90 °C
- Chlazení vytištěné vrstvy: Ano

Běžné aplikace

- Vodotěsné díly
- Funkční díly
- Rozměrově přesné sestavy

Výhody

- Hladký povrch
- Rozměrově přesný

Nevýhody

- Stringing
- Špatné překlenovací vlastnost

[10]



Obrázek 3.4.1 Profil materiálu PET [4]

3.5. Nylon

Nylon neboli polyamid je houževnatý a polopružný materiál. Má velmi dobrou odolnost proti nárazům a otěru. Hodí se pro tisk trvanlivých dílů. Je to materiál, který vyžaduje vyšší péči hlavně v oblasti skladování, protože jeho vlákna ve vysoké míře absorbují vlhkost ze svého okolí. To pak vede k problémům s kvalitou vyrobeného dílu. Většinou je pro tisk potřeba vysoká teplota extruderu, a to okolo 250 °C. Této teploty tiskové hlavy nedosahují všechny tiskárny. Existují i výrobci, kteří upravují chemické složení nylonu, a tím snižují teplotu při tisku na teplotu extruderu okolo 220 °C, která je pro většinu tiskáren dosažitelná. [12]

Nastavení tisku

- Teplota tiskové hlavy: 225–265 °C
- Teplota vyhřívání podložky: 70–90 °C
- Chlazení vytištěné vrstvy: Ne

Běžné aplikace

- Plastová ozubená kola
- Šrouby, matice, vruty
- Stahovací pásy

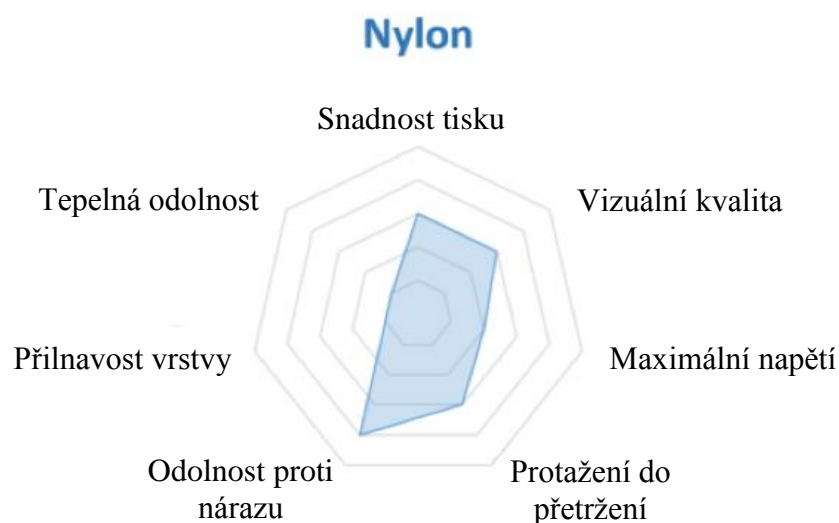
Výhody

- Tvrdý a částečně pružný materiál
- Vysoká odolnost proti nárazu
- Při tisku bez zápachu
- Dobrá odolnost proti otěru

Nevýhody

- Warping
- Vzduchotěsné skladování (vlhkost)
- Nesprávně vysušená vlákna způsobují vady
- Díly nejsou vhodné do vlhkého prostředí
- Energeticky náročný tisk

[12]



Obrázek 3.5.1 Profil materiálu NYLON [4]

3.6. TPU

Termoplastický polyuretan neboli TPU, je pružný termoplast s dobrou odolností proti otěru. Dále je odolný proti oleji a chemikáliím, to z něj dělá dobrou volbu pro průmyslové použití, například v automobilovém průmyslu. Díly vytištěné z TPU jsou odolné proti nízkým teplotám, takže se nestávají křehkými a nezhoršuje se práce s nimi. Jednou z hlavních předností je přilnavost jednotlivých vrstev při procesu 3D tisku. Díky ní nedochází ke zvlnění tištěného dílu. Jeho flexibilita závisí na nastavení sliceru. Při nastavení nízké výplně bude díl pružnější. [13]

Nastavení tisku

- Teplota tiskové hlavy: 220–250 °C
- Teplota vyhřívání podložky: max. 60 °C
- Chlazení vytištěné vrstvy: Ne

Běžné aplikace

- Sportovní náčiní např. obuv
- Automobilový průmysl (přístrojové panely, páky)

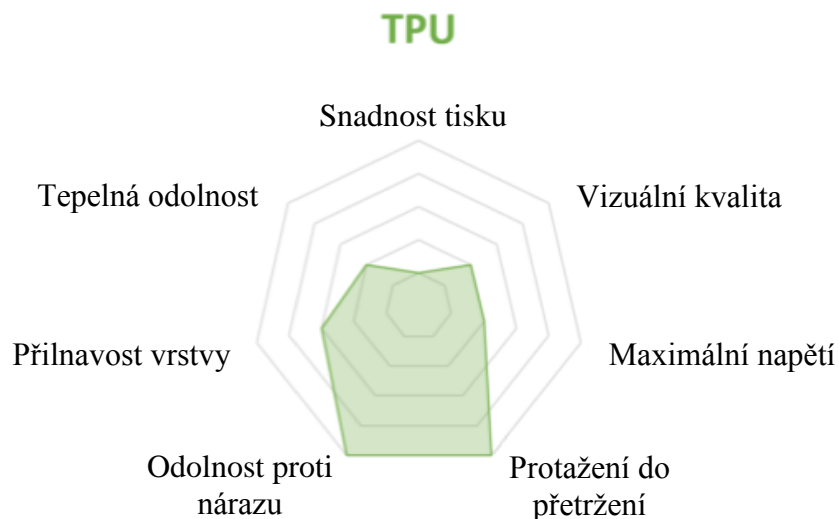
Výhody

- Flexibilita
- Odolnost proti teplotnímu šoku
- Odolnost proti otěru

Nevýhody

- Náročné pro extruder
- Energeticky náročný tisk

[13]



Obrázek 3.6.1 Profil materiálu TPU [4]

3.7. PC

Polykarbonát je vysoce pevný a houževnatý materiál vhodný pro náročné prostředí. Je velmi odolný proti teple a nárazu. Svou integrální strukturu si zachovává až do teploty 150 °C. Proto se používá ve vysokoteplotních aplikacích. PC ve vysoké míře absorbuje vlhkost ze vzduchu. To vede k obtížnějšímu tisku a zhoršení mechanických vlastností. Také vyžaduje při tisku velmi vysoké teploty tiskové hlavy a podložky. Ideálně by se díly z polykarbonátu měly tisknout na tiskárně s uzavřeným pracovním prostorem, aby nedocházelo k výkyvům teploty. Při nedodržení předepsané teploty nebo při nadměrném chlazení vytištěné vrstvy se jednotlivé vrstvy nedokonale spojí. [14]

Nastavení tisku

- Teplota tiskové hlavy: 260–310 °C
- Teplota vyhřívané podložky: 80–120 °C
- Chlazení vytištěné vrstvy: Ne

Běžné aplikace

- Vysokopevnostní díly
- Tepelně odolné díly
- Pouzdra pro elektroniku

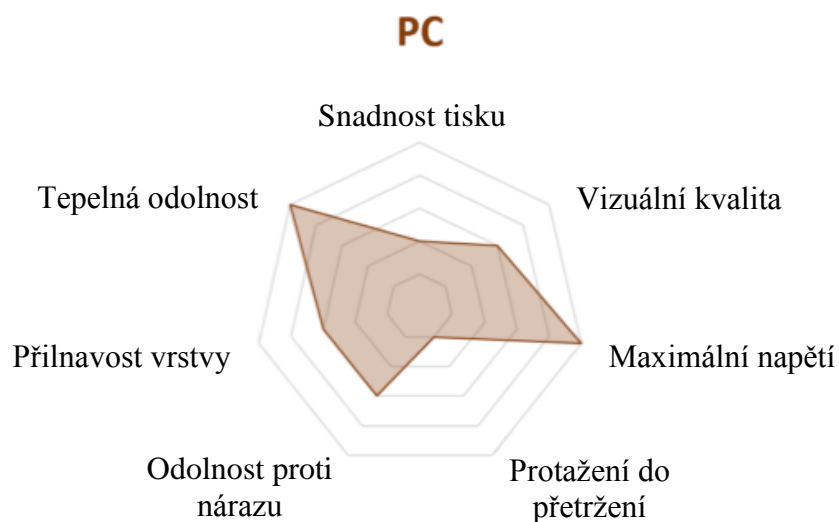
Výhody

- Odolnost proti nárazu, teplotě, otěru
- Možné ohýbat bez porušení
- Přirozená průhlednost

Nevýhody

- Vysoké teploty při tisku
- Warping
- Stringing
- Vzduchotěsné skladování, kvůli vlhkosti

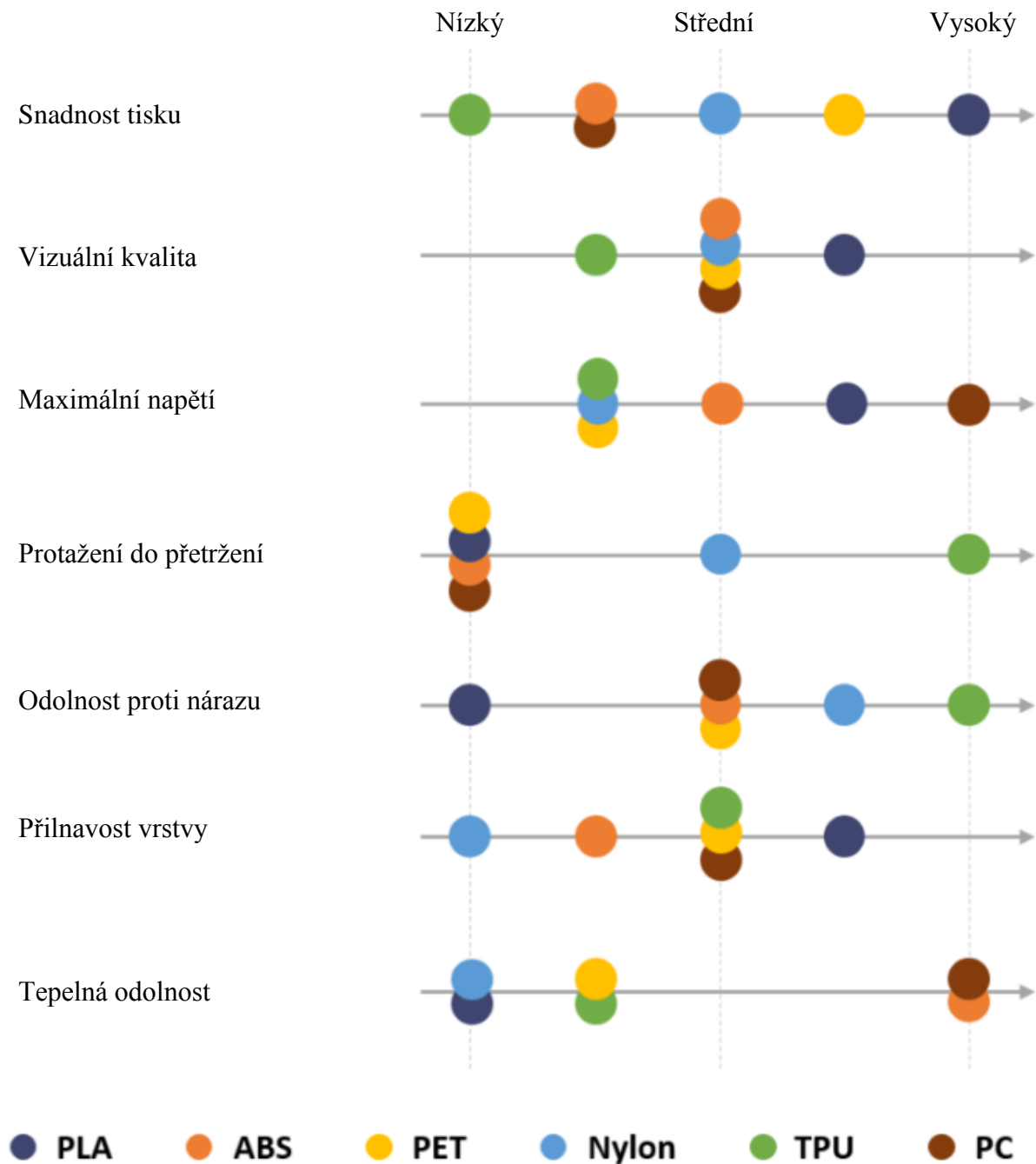
[14]



Obrázek 3.7.1 Profil materiálu PC [4]

3.8. Zhodnocení základních stavebních materiálů

Nejdříve je třeba si určit, jaké vlastnosti od vyráběného dílu požadujeme. Poté s ohledem na námi dostupnou tiskárnu a cenu, kterou jsme ochotni do výroby investovat, zvolíme materiál, který naše požadavky splní.



Obrázek 3.8.1 Porovnání vlastností materiálů [4]

4. Praktická část

V této části práce se zabývám porovnáním tahových vlastností 3D tištěných plastových dílů. Nejdříve zde představím zkušební vzorek, poté stroje a zařízení, na kterých se prováděl experiment. Nakonec vyhodnotím naměřená data.

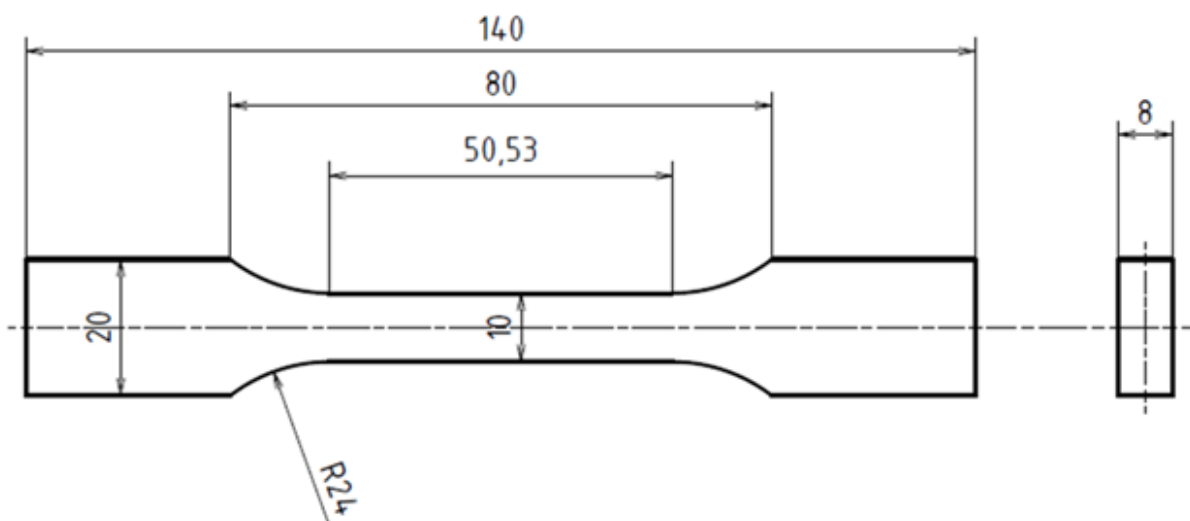
Předpokládám, že by z principu technologie 3D tisku měl mít největší odolnost vůči namáhání tahem vzorek s orientací tisku na bok, protože má nejvíce vláken ve směru namáhání. Vzorek s orientací tisku naplocho by z důvodu tvaru vzorku, kdy jeho tloušťku a šířku dělí pouze 2 mm, měl mít odolnost mírně menší. Nejmenší tahovou odolnost by měl mít vzorek s orientací tisku na výšku, protože má všechna vlákna v kolmém směru proti namáhání. Jeho odolnost tedy závisí hlavně na soudržnosti jednotlivých vrstev.

Na začátku bylo nutné vytvořit 3D model vzorku a vyexportovat ho ve formátu .stl. V tomto formátu byl nahrán do sliceru od firmy stratasys Grabcad. Ve sliceru jsme nastavili potřebné hodnoty a vygenerovali G-code. Následovala fáze tisku. Po vytištění jsem odstranil podpurný materiál, nalepil hliníkové plíšky na vzorky a označil je. Před tahovou zkouškou jsme proměřili rozměry všech vzorků, aby bylo možné je zadat do softwaru trhacího stroje.

4.1. Návrh zkušebního tělesa

Původní tvar a rozměry byly určeny podle normy ČSN EN ISO 527-2. [15] Tento vzorek nakonec nebylo možné použít ze dvou důvodů. Prvním důvodem byla tloušťka vzorku. S danými 4 mm nebylo možné nastavit, a dokonce ani vytvořit vnitřní výplň. Druhým důvodem pak byla celková délka vzorku. Po prvním testovacím tisku jsme zjistili, že při orientaci tisku na výšku dochází ve výšce přibližně 130 mm ke ztrátě stability a mírnému rozkmitání tělesa, a proto došlo ke špatné spojitosti mezi jednotlivými vrstvami.

Finální zkušební vzorek (Obr. 4.1.1) byl nakonec vytvořen kombinací dvou norem. Základní tvar byl převzat z normy ČSN EN ISO 527-2. Délka měřené části byla odvozena podle vzorce $L_0 = k \cdot \sqrt{S_0}$ z normy ČSN EN ISO 6892-1. [16] Kde L_0 je minimální měřená délka, k je součinitel proporcionality a S_0 je plocha konstantního průřezu v místě měření.

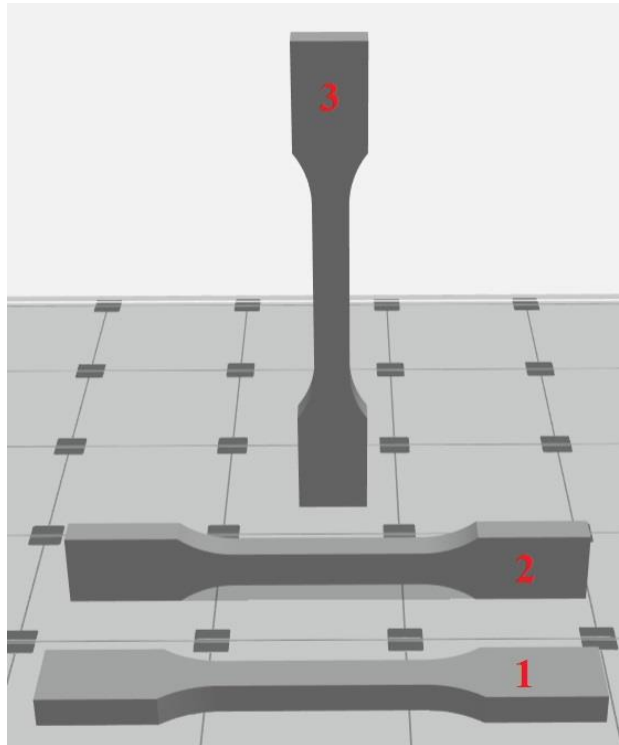


Obrázek 4.1.1 Výkres zkušebního vzorku

4.2. Varianty vzorků

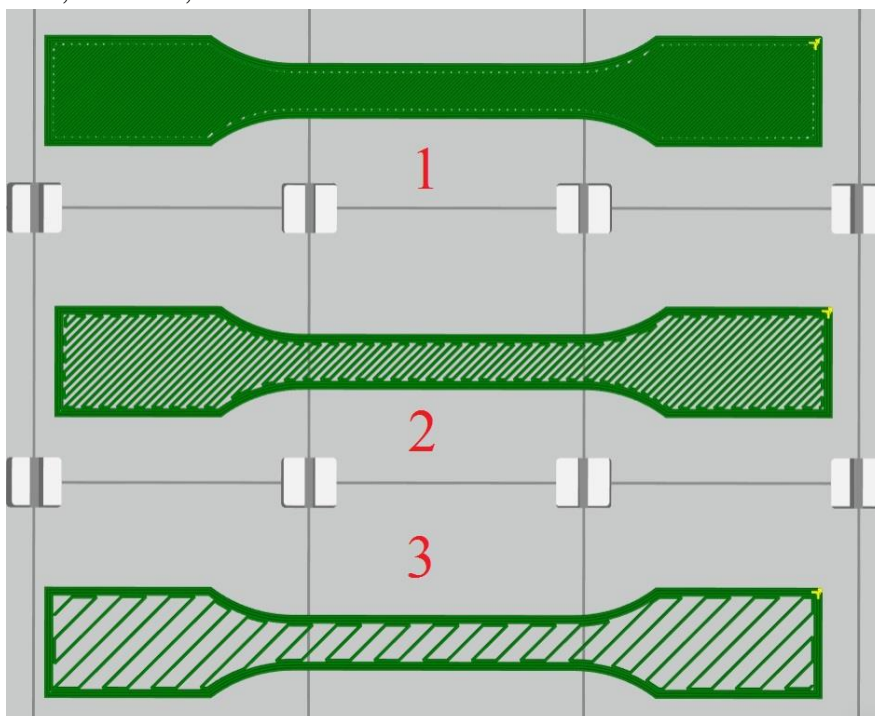
Pro tisk jsme zvolili tři varianty orientace tisku (Obr. 4.2.1) a tři varianty hustoty jednoho stylu výplně (Obr. 4.2.2).

Orientace tisku: 1 – Naplocho, 2 – Na bok, 3 – Na výšku



Obrázek 4.2.1 Vizualizace orientace tisku v softwaru Grabcad

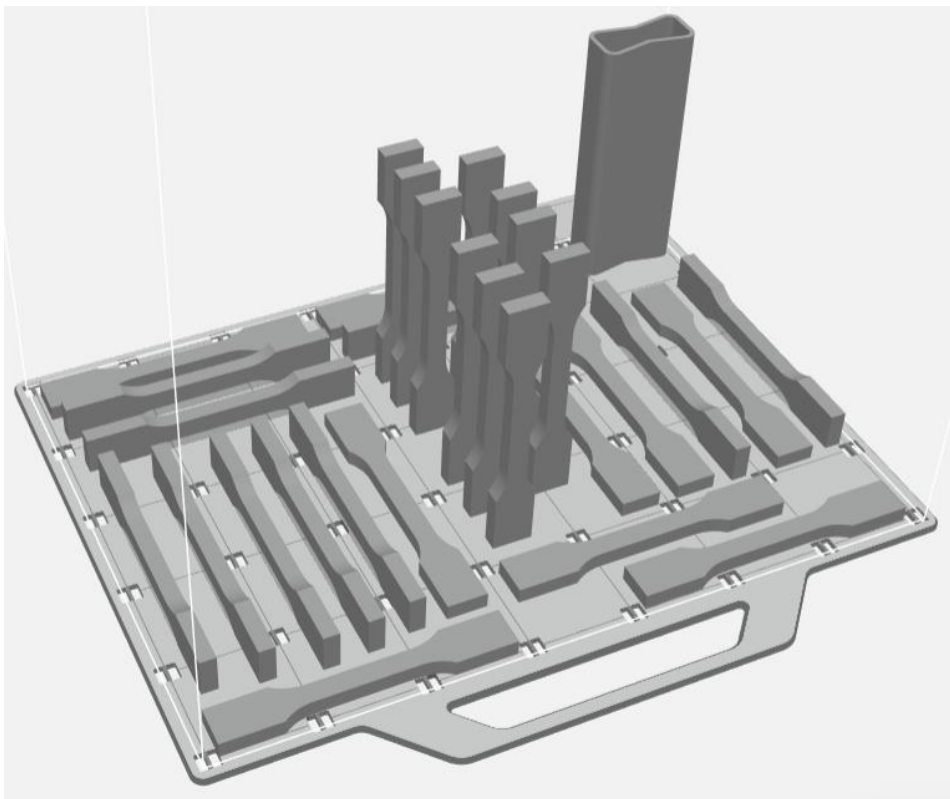
Výplň: 1 – 100%, 2 – 50%, 3 – 18%



Obrázek 4.2.2 Vizualizace hustoty výplně v softwaru Grabcad

4.3. Příprava tisku

Před samotným tiskem bylo potřeba připravený 3D model zkoušeného tělesa nahrát do softwaru Grabcad a nastavit všechny hodnoty. Tělesa byla vytištěná ve třech variantách orientace tisku a ve třech variantách vnitřní výplně. Pro každou kombinaci jsme vyrobili 3 vzorky, celkem 27, aby bylo možné stanovit průměrné hodnoty a případně směrodatné odchylky výsledků. Na obrázku 4.3.1 je vidět, že všech 27 vzorků + 2 vzorky navíc pro kalibraci trhacího stroje se vešly na tiskovou plochu, a proto bylo možné všechny vzorky vytisknout najednou. V pravém horním rohu tiskové plochy se nachází takzvaný artefakt. Tiskárna má dvě trysky. Jednu na stavební materiál a druhou na materiál podpůrný. Aby nedošlo k ucpání stále nahříváných trysek v případě, že se v dané vrstvě tiskne z trysky druhé, vytváří Grabcad tento artefakt, aby mohlo dojít k vytlačení materiálu i z trysky právě nepoužívané pro stavbu modelu. Na obrázku 4.3.1 je vidět artefakt v plné velikosti, ale ve skutečnosti jsme použili nastavení, při kterém se tryska na podpůrný materiál odpojí po poslední vrstvě hlavního modelu. Na obrázku 4.4.2 je tedy artefakt pouze nezbytně nutně vysoký.



Obrázek 4.3.1 Náhled tiskové plochy v softwaru Grabcad

Parametry tisku

Zde uvádím důležité parametry tisku. Některé z nich byly námi zvolené. Ostatní byly nastavené tiskárnou podle použitého materiálu (viz kap. 2.2.2. Uzavřený systém výroby).

- Výška jedné vrstvy: 0,25 mm
- Tloušťka stěny: 1,524 mm
- Styl výplně: „sparse“ (linkovaný, řídký)
- Úhel výplně: 45°
- Průměr trysky: 0,254 mm
- Teplota trysky: uzavřený systém (270–290 °C)
- Teplota komory: uzavřený systém (110–120 °C)

4.4. Tisk

Tisk vzorků pro zkoušku tahem byl proveden na tiskárně Stratasys F370. Tiskárna je ovládána přes dotykovou obrazovku a je možné ji ovládat i na dálku přes počítač.

Technické specifikace

- Výška vrstvy: 0,127/0,178/0,254/0,330
- Stavební prostor: 355 x 254 x 355 mm
- Přesnost tisku: $\pm 200 \mu\text{m}$ nebo $\pm 2 \mu\text{m}/\mu\text{m}$
- Rozměry: 864 x 711 x 1626 mm
- Hmotnost: 227 kg

[17]



Obrázek 4.4.1 Tiskárna Stratasys F370 [17]

Samotný tisk bez doby nutné k předehřátí komory trval 17 h 21 min při spotřebě 396 cm^3 stavebního materiálu.



Obrázek 4.4.2 Vzorky po dokončení tisku

4.5. Použitý materiál PC-ABS

PC-ABS je směsí dvou termoplastů. Polykarbonátu (PC) a akrylonitril butadien styrenu (ABS). Výsledkem je filament, který vykazuje velmi dobré vlastnosti jako pevnost, houževnatost a vysokou tepelnou odolnost.

Mechanické vlastnosti při technologii vstřikování

- Mez pevnosti v tahu [MPa]: 36–62
- Modul pružnosti [MPa]: 1750–2100
- Tažnost: 5–65 %

[18]

Mechanické vlastnosti při aditivní technologii od výrobce materiálu firmy Stratasys (Orientace na bok)

- Mez pevnosti v tahu [MPa]: 41
- Modul pružnosti [MPa]: 1900
- Tažnost: 6 %

[19]

4.6. Příprava na tahovou zkoušku

Před samotnou tahovou zkouškou bylo nutné vzorky včetně bílého podpůrného materiálu (Obr. 4.4.2) oddělit od tiskové podložky. Podpůrný materiál byl poté rozpuštěn v roztoku hydroxidu sodného. Následovalo nalepení hliníkových pásků dvousložkovým lepidlem UHU PLUS ENDFEST 300 do rozšířené neměřené části vzorků (Obr. 4.6.1), aby při sevření vzorku čelistmi trhacího stroje nedošlo k rozmačkání nebo jinému poškození plastových těles. Dále bylo nutné označit pořadí vzorků. Z jedné strany je pořadí a z druhé strany označení orientace tisku a objem výplně (Obr. 4.6.1). Posledním krokem bylo proměření průřezu všech vzorků a zadání hodnot do počítače.



Obrázek 4.6.1 Vzorky před tahovou zkouškou

Tabulka 4.1 Vysvětlení označení vzorků

Strana 1			Strana 2		
Horní pozice	100	výplň 100%	Horní pozice	1	pořadí vzorku
	50	výplň 50%		2	pořadí vzorku
	18	výplň 18%		3,...	pořadí vzorku
Dolní pozice	1	orientace tisku naplocho	Dolní pozice	1	pořadí vzorku
	2	orientace tisku na bok		2	pořadí vzorku
	3	orientace tisku na výšku		3,...	pořadí vzorku

4.7. Zkouška tahem

Tahová zkouška byla provedena na trhacím stroji LabTest Model 5.100SP1 (Obr. 4.7.1 a 4.7.2)

Parametry stroje

- Jmenovité zatížení [kN]: 100
- Max. zkušební rychlost [mm/min]: 600
- Přesnost řízení rychlosti [%]: $\pm 0,5$
- Rozlišení příčnicku [μm]: 1
- Tuhost rámu [mm/N]: $1,6 \times 10^{-6}$
- Rozpětí sil [kN]: 500–600
- Přesnost měření síly [%]: $\pm 0,3$ z hodnoty rozsahu
- Přesnost dráhy [μm]: 1 – ČSN EN ř513
- Přesnost měření napětí [%]: $\pm 0,5$ průtahoměru



Obrázek 4.7.1 Trhací stroj LabTest Model 5.100SP1

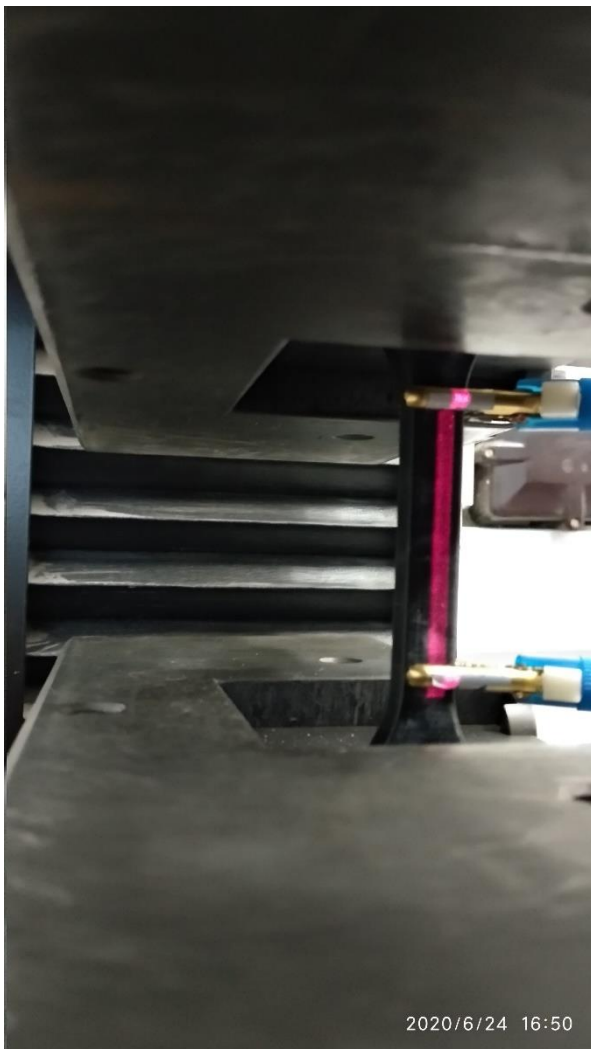


Obrázek 4.7.2 Štítek trhacího stroje

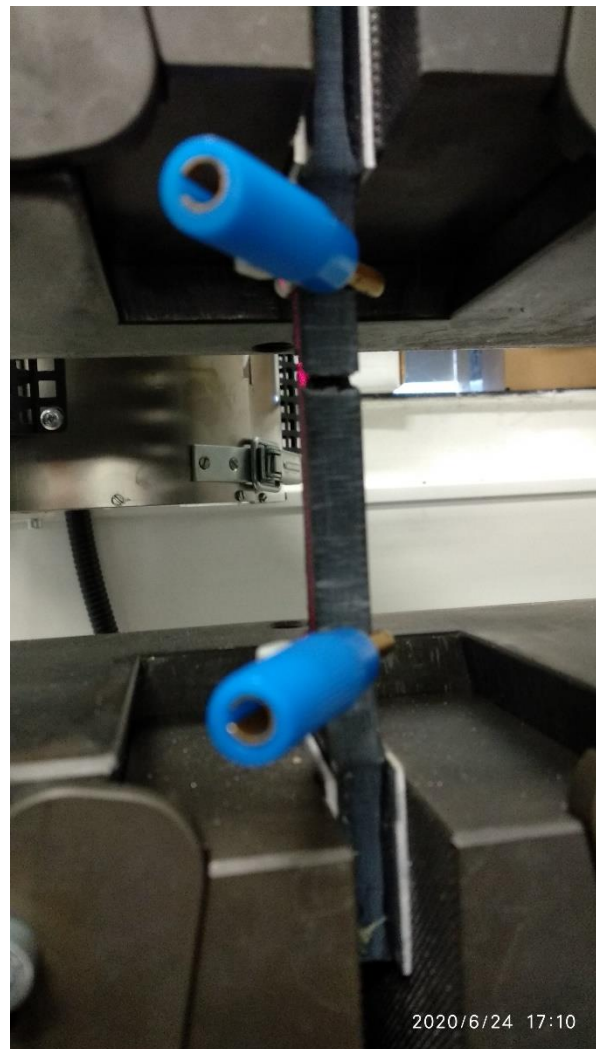
Parametry zkoušky

- Zkušební norma: Tahová zkouška kovu - ČSN EN ISO 6892-1
- Typ stroje: 48/17
- Snímač síly: 100 kN
- Průtahoměr: extenzome
- Upínací přípravek: ne
- Zkušební prostor: Spodní zkušební prostor
- Zkušební rychlosti: V0 = 1 mm/min; V1 = 1 mm/min
- Přepínací body: F0 = 100 N
- Kritérium ukončení zkoušky: Síla = 70000 N; dF = 50 %

Zde je vyobrazen průběh zkoušky. Konkrétně těsně před zahájením měření (Obr. 4.7.4) a po přetržení vzorku (Obr. 4.7.3).



Obrázek 4.7.4 Upnutý vzorek před zkouškou



Obrázek 4.7.3 Upnutý vzorek po přetržení

4.8. Výsledky

Vliv tvaru vzorku

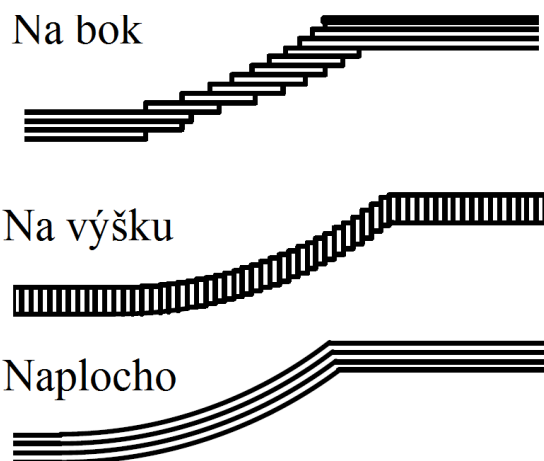
Všechny vzorky s orientací tisku na bok a některé s orientací tisku na výšku při tahové zkoušce praskly mimo měřenou oblast. Konkrétně v místě, kde začíná rádius (Obr. 4.8.1 a 4.8.2). Je to z toho důvodu, že vlákna v místě rádia v těchto orientacích tisku nejsou namáhána pouze tahem, ale také smykem. Pro představu, jak jsou z principu technologie jednotlivá vlákna v místě rádia navázaná, jsem vytvořil zjednodušené schéma (Obr. 4.8.3).



Obrázek 4.8.3 Přetržený vzorek 24



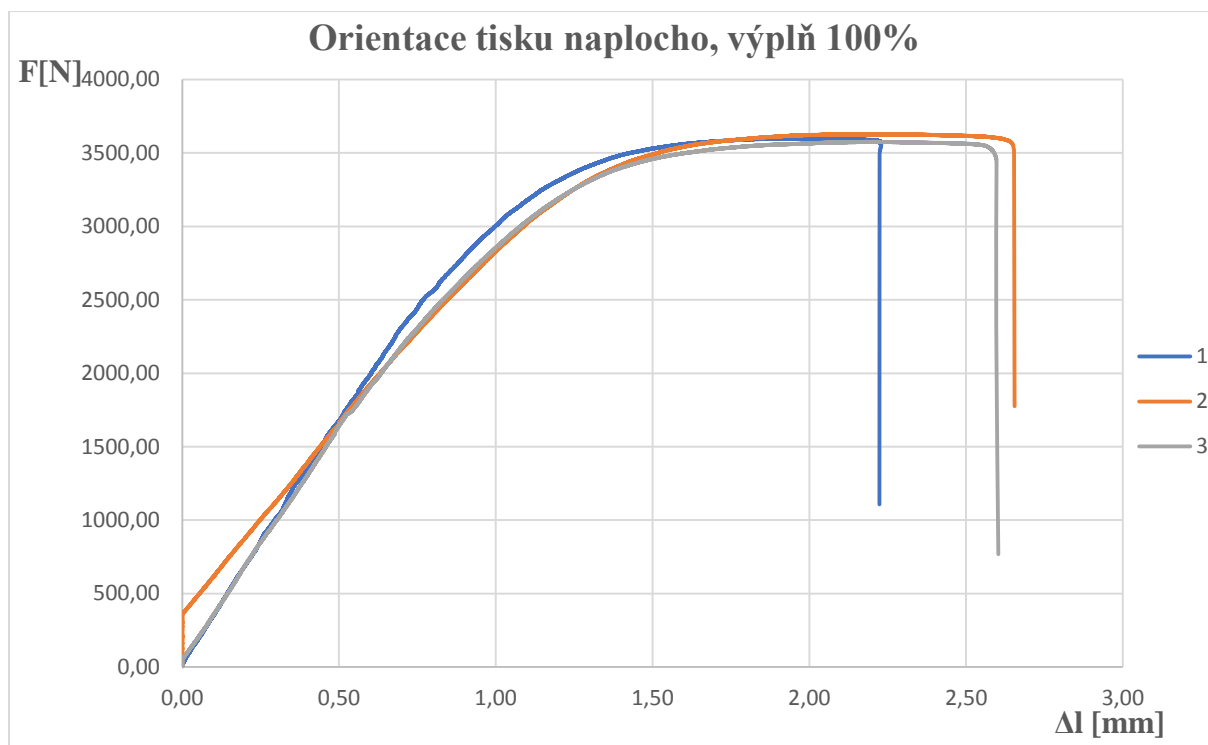
Obrázek 4.8.2 Přetržený vzorek 24 oddělený



Obrázek 4.8.1 Schéma vrstev v řezu vzorku

4.8.1. Orientace tisku naplocho při výplni 100 %

Zde je vyhodnocení jedné kombinace orientace tisku a hustoty výplně. Konkrétně jde o orientaci tisku naplocho a hustotu výplně 100 %. V grafu jsou 3 křivky každá reprezentující jeden vzorek. V tabulce se nachází hlavní měřené veličiny. Mez pevnosti R_m , smluvní mez pevnosti $R_{p0,2}$, tažnost A , síla na smluvní mezi kluzu $F_{p0,2}$ a síla na mezi pevnosti F_m . Z naměřených hodnot jsem vypočítal aritmetický průměr a směrodatnou odchylku. Z důvodu velkého počtu vzorků jsou zbývající grafy vzorků umístěny (4–27) v příloze A.



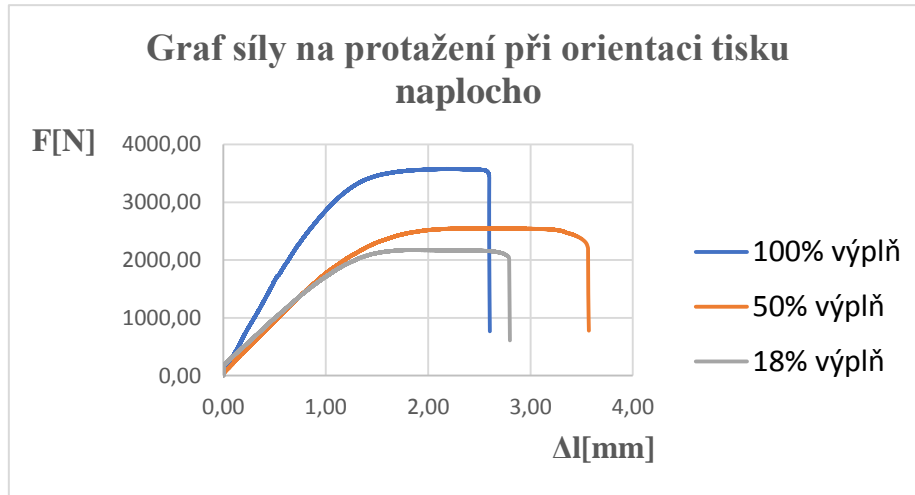
Graf 4.1 Závislost síly na protažení při orientaci tisku naplocho a výplni 100 %

Tabulka 4.2 Výsledky pro orientaci tisku naplocho a výplni 100 %

č. vzorku	R_m [MPa]	$R_{p0,2}$ [MPa]	A [%]	$F_{p0,2}$ [N]	F_m [N]
1	43	33	2,4	2760	3601
2	43	31	3,1	2590	3628
3	43	30	3,1	2506	3577
průměr	43	31,3	2,87	2618,7	3602,0
směrodatná odchylka	0	1,25	0,326	105,66	20,83

4.8.2. Srovnání výplně při stejné orientaci

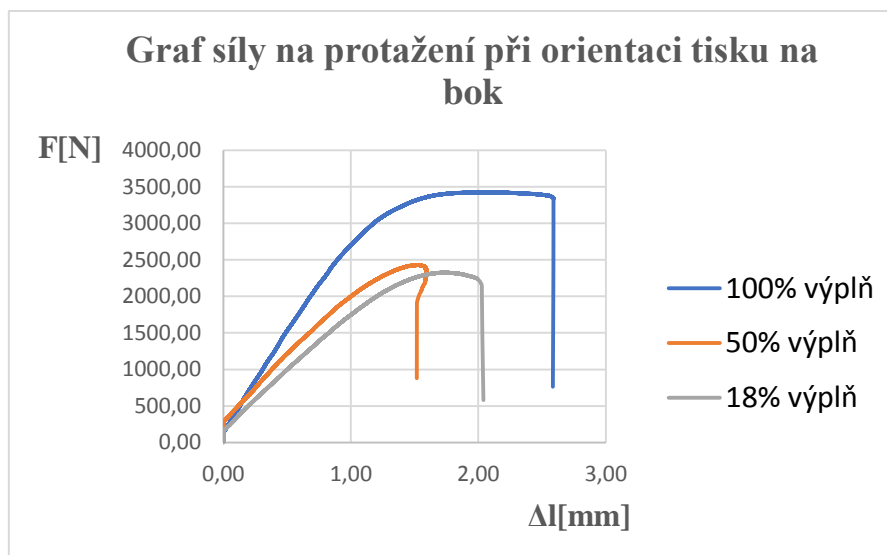
V grafu se nachází vždy pouze prostřední ze tří křivek jedné varianty orientace a výplně tisku. Jelikož přesná lomová plocha není známa, není možné přesně určit hodnoty napětí. V tabulce jsou červeně označené hodnoty dopočítané podle přibližně vypočítané plochy jednotlivých vzorků.



Graf 4.2 Závislost síly na protažení při orientaci tisku naplocho

Tabulka 4.3 Výsledky pro orientaci tisku naplocho

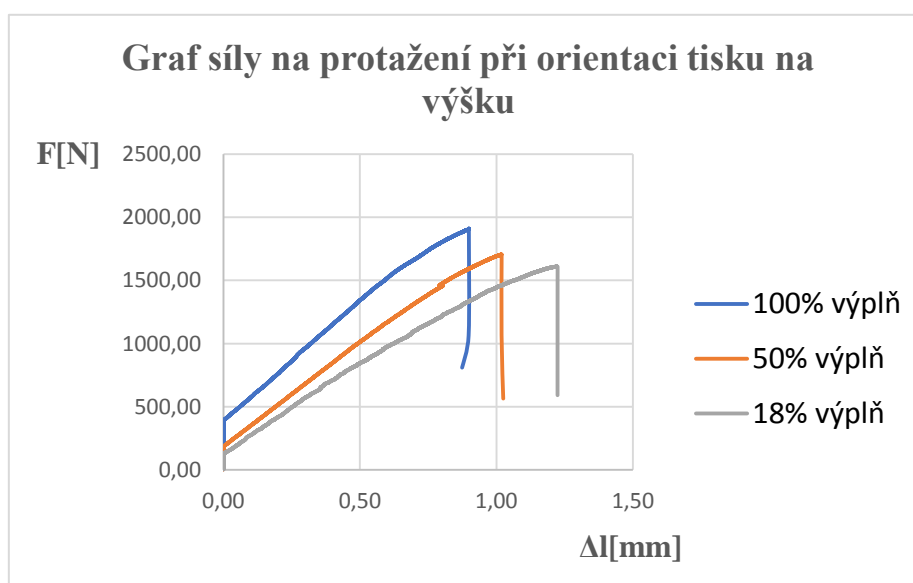
		R _m [MPa]	R _{p0,2} [MPa]	A [%]	F _{p0,2} [N]	F _m [N]
Naplocho	100%	43±0,0	31,3±1,25	2,87±0,326	2618,7±105,66	3602,0±20,83
	50%	38±0,4	14±5,5	5,82±0,340	898,0±360,16	2505,9±28,44
	18%	41±0,2	16±2,1	4,79±0,545	870,8±113,12	2188,9±10,41



Graf 4.3 Závislost síly na protažení při orientaci tisku na bok

Tabulka 4.4 Výsledky pro orientaci tisku na bok

		R_m [MPa]	$R_{p0,2}$ [MPa]	A [%]	$F_{p0,2}$ [N]	F_m [N]
Na bok	100%	41±0,0	28,7±1,70	3,26±0,316	2388,8±133,96	3431,1±28,74
	50%	38±2,0	16,2±4,21	1,52±0,422	1046,2±272,58	2481,5±124,76
	18%	43±0,0	16,1±2,52	2,21±0,601	861,3±134,80	2329,8±4,01

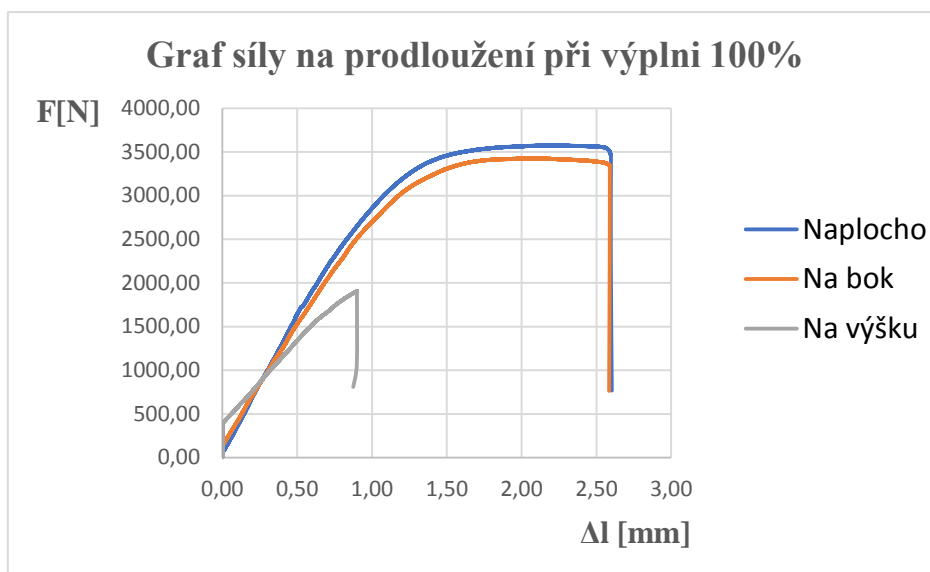


Graf 4.4 Závislost síly na protažení při orientaci tisku na výšku

Tabulka 4.5 Výsledky pro orientaci tisku na výšku

		R_m [MPa]	$R_{p0,2}$ [MPa]	A [%]	$F_{p0,2}$ [N]	F_m [N]
Na výšku	100%	23±1,4	17,3±1,25	0,55±0,120	1365,3±106,33	1851,7±111,70
	50%	27±1,3	13,2±2,22	1,03±0,369	844,4±142,05	1728,9±80,88
	18%	29±3,5	9,9±3,14	1,23±0,184	521,1±165,08	1525,8±180,35

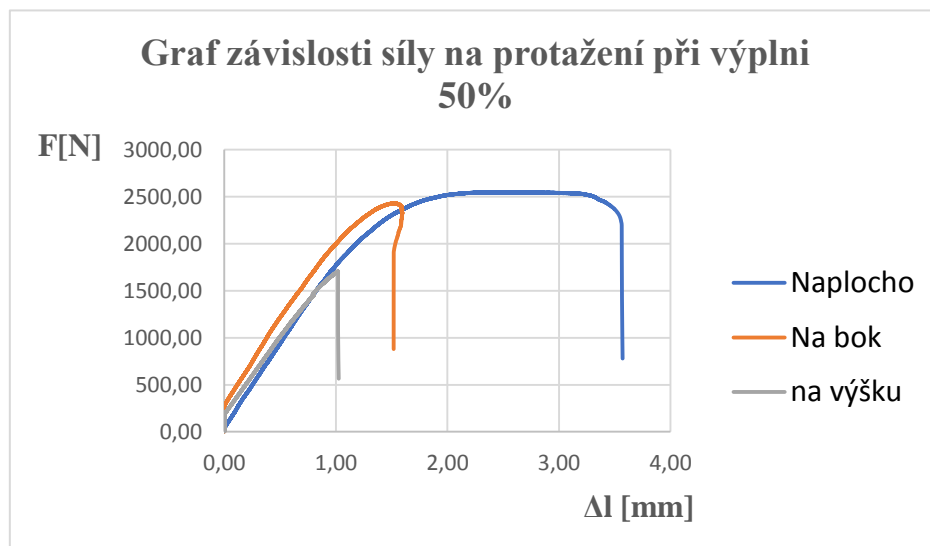
4.8.3. Srovnání orientace při stejné hustotě výplně



Graf 4.5 Závislost síly na protažení pro výplň 100 %

Tabulka 4.6 Výsledky pro výplň 100 %

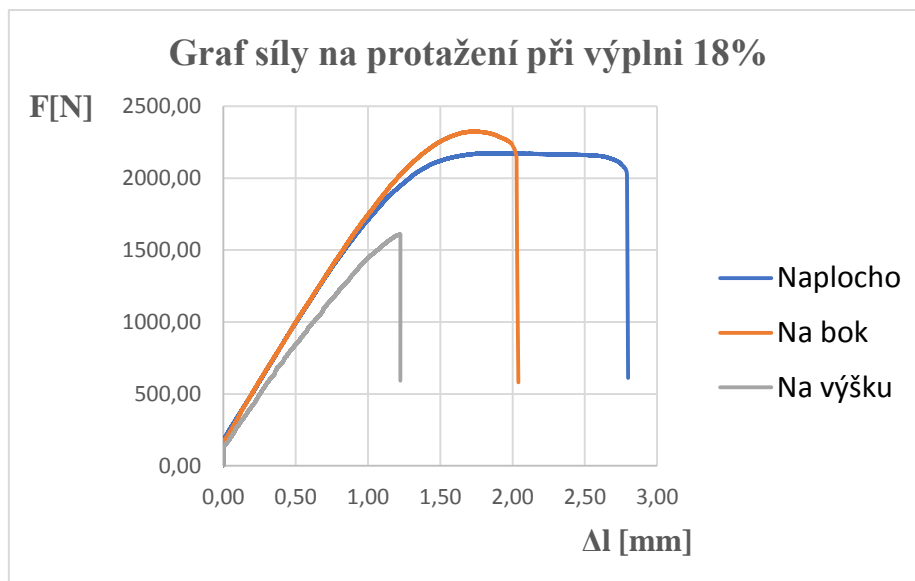
		R_m [MPa]	$R_{p0,2}$ [MPa]	A [%]	$F_{p0,2}$ [N]	F_m [N]
Naplocho	100%	43±0,0	31,3±1,25	2,87±0,326	2618,7±105,66	3602,0±20,83
Na bok	100%	41±0,0	28,7±1,70	3,26±0,316	2388,8±133,96	3431,1±28,74
Na výšku	100%	23±1,4	17,3±1,25	0,55±0,120	1365,3±106,33	1851,7±111,70



Graf 4.6 Závislost síly na protažení při výplni 50 %

Tabulka 4.7 Výsledky pro výplň 50 %

		R_m [MPa]	$R_{p0,2}$ [MPa]	A [%]	$F_{p0,2}$ [N]	F_m [N]
Naplocho	50%	38±0,4	14±5,5	5,82±0,340	898,0±360,16	2505,9±28,44
Na bok	50%	38±2,0	16,2±4,21	1,52±0,422	1046,2±272,58	2481,5±124,76
Na výšku	50%	27±1,3	13,2±2,22	1,03±0,369	844,4±142,05	1728,9±80,88



Graf 4.7 Závislost síly na protažení při výplni 18 %

Tabulka 4.8 Výsledky pro výplň 18 %

		R_m [MPa]	$R_{p0,2}$ [MPa]	A [%]	$F_{p0,2}$ [N]	F_m [N]
Naplocho	18%	41±0,2	16±2,1	4,79±0,545	870,8±113,12	2188,9±10,41
Na bok	18%	43±0,0	16,1±2,52	2,21±0,601	861,3±134,80	2329,8±4,01
Na výšku	18%	29±3,5	9,9±3,14	1,23±0,184	521,1±165,08	1525,8±180,35

5. Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo porovnat vliv hustoty výplně a orientace tisku na tahové vlastnosti zkoušeného dílu.

V této práci je nejdříve popsána technologie 3D tisku FDM. Jsou zde uvedeny možnosti rozdělení tiskáren a hlavní komponenty FDM tiskárny. V další kapitole je přehled základních materiálů využívaných v této technologii.

V praktické části je popsán samotný experiment. Nejdříve je představen zkušební vzorek, který byl vytvořen z kombinace norem ČSN EN ISO 527-2 a ČSN EN ISO 6892-1. Zkušební vzorky byly vyrobeny z kompozitního materiálu PC-ABS v devíti variantách hustoty výplně a orientace tisku na tiskárně Stratasys F370. Orientace tisku byly zvoleny vůči tiskové podložce naplocho, na bok a na výšku. Hustota výplně také ve třech možnostech. Plný vzorek, tedy výplň 100 %, výplň 50 % a poslední minimální možné nastavení výplně v softwaru Grabcad 18 %. Následovala zkouška tahem na trhacím stroji LabTest Model 5.100SP1, na kterém byly naměřeny tahové vlastnosti testovaných dílů. Ve výsledkové části jsou grafy závislostí sil na protažení a tabulky naměřených a vypočítaných hodnot pro jednotlivé orientace tisku a hustoty výplně vzorků.

Předpoklad, že díly tištěné na bok budou mít tahovou odolnost největší, díly tištěné naplocho mírně menší a vzorky tištěné na výšku nejmenší, nebylo možné plně prokázat, jelikož některé z testovaných vzorků praskly mimo měřenou oblast.

Výsledky z pohledu orientace tisku

Největší odolnost proti tahovému namáhání měly vzorky tištěné naplocho před vzorky tištěnými na bok. Nejmenší tahovou odolnost vykazovaly vzorky tištěné na výšku.

Výsledky z pohledu hustoty výplně

Hustota výplně měla podíl na velikost napětí R_m a $R_{p0,2}$ a na tažnost A . Největší vliv výplně byl u vzorků tištěných naplocho. Nejmenší vliv měla výplň u vzorků tištěných na výšku.

Konkrétní hodnoty výsledných veličin včetně teoretických hodnot materiálu a orientační graf výsledků jsou uvedeny na následující straně.

Orientace tisku a hustota výplně mají také vliv na dobu výroby a spotřebu materiálu. Níže vidíte přehled času výroby a spotřeby stavebního materiálu získaný ze softwaru Grabcad v případě, že by se tiskl pouze jeden vzorek.

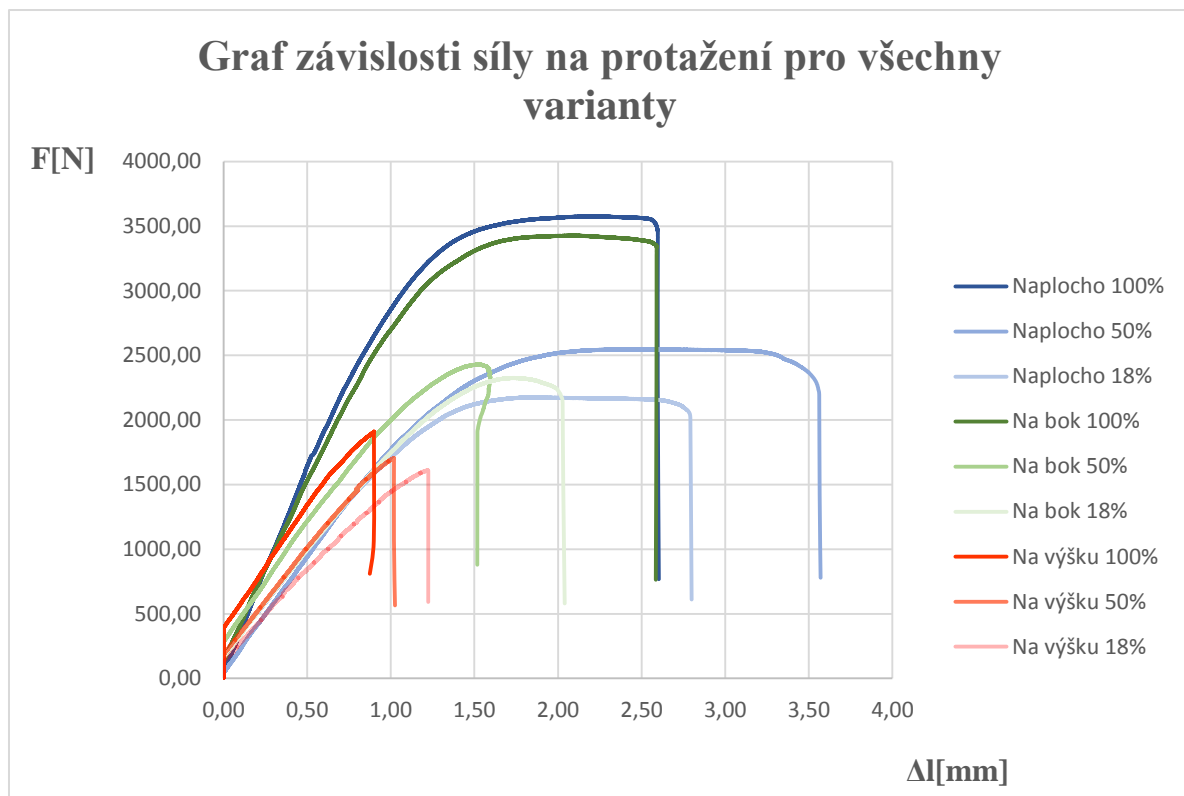
Tabulka 5.1 Doba tisku jednoho vzorku

Doba tisku v min			
Orientace/výplň	na výšku	na bok	naplocho
100 %	78	51	34
50 %	78	46	28
18 %	78	42	25

Tabulka 5.2 Spotřeba materiálu pro jeden vzorek

Spotřeba materiálu v cm ³			
Orientace/výplň	na výšku	na bok	naplocho
100 %	17,332	18,464	18,371
50 %	13,061	14,421	14,086
18 %	10,741	12,110	11,513

Na tahové vlastnosti plastových dílů vyrobených technologií FDM má vliv několik faktorů. Mezi ty hlavní patří orientace tisku, styl výplně, hustota výplně a v neposlední řadě tvar a konstrukce dílu.



Graf 5.1 Závislost síly na protažení pro všechny varianty vzorků

Tabulka 5.3 Výsledky pro všechny varianty vzorků

		R_m [MPa]	$R_{p0,2}$ [MPa]	A [%]	$F_{p0,2}$ [N]	F_m [N]
Teor. vstřík		36-62		5-65		
Teor. tisk		41		6,0		
Naplocho	100 %	43±0,0	31,3±1,25	2,87±0,326	2618,7±105,66	3602,0±20,83
	50 %	38±0,4	14±5,5	5,82±0,340	898,0±360,16	2505,9±28,44
	18 %	41±0,2	16±2,1	4,79±0,545	870,8±113,12	2188,9±10,41
Na bok	100 %	41±0,0	28,7±1,70	3,26±0,316	2388,8±133,96	3431,1±28,74
	50 %	38±2,0	16,2±4,21	1,52±0,422	1046,2±272,58	2481,5±124,76
	18 %	43±0,0	16,1±2,52	2,21±0,601	861,3±134,80	2329,8±4,01
Na výšku	100 %	23±1,4	17,3±1,25	0,55±0,120	1365,3±106,33	1851,7±111,70
	50 %	27±1,3	13,2±2,22	1,03±0,369	844,4±142,05	1728,9±80,88
	18 %	29±3,5	9,9±3,14	1,23±0,184	521,1±165,08	1525,8±180,35

Poznámka: Červeně jsou vyznačeny orientačně vypočítané hodnoty kvůli neznámé lomové ploše.

6. Seznam obrázků

Obrázek 2.1.1 Schéma vytlačování materiálu do vrstev [1].....	9
Obrázek 2.2.1 Kartézská tiskárna [1]	10
Obrázek 2.2.2 Delta tiskárna [1]	10
Obrázek 2.2.3 Polar tiskárna [1].....	11
Obrázek 2.3.1 Extruder [1].....	12
Obrázek 2.3.2 Tisková plocha [1]	13
Obrázek 2.3.3 Rám [1]	13
Obrázek 2.3.4 Krokový motor [1].....	14
Obrázek 2.3.5 Řídící jednotka [1]	14
Obrázek 2.3.1 Filamenty [5]	15
Obrázek 3.1.1 Ukázka warping [6]	16
Obrázek 3.1.2 Ukázka stringing [7]	16
Obrázek 3.2.1 Profil materiálu PLA [4].....	17
Obrázek 3.3.1 Profil materiálu ABS [4].....	18
Obrázek 3.4.1 Profil materiálu PET [4]	19
Obrázek 3.5.1 Profil materiálu NYLON [4].....	20
Obrázek 3.6.1 Profil materiálu TPU [4].....	21
Obrázek 3.7.1 Profil materiálu PC [4].....	22
Obrázek 3.8.1 Porovnání vlastností materiálů [4].....	23
Obrázek 4.1.1 Výkres zkušebního vzorku	24
Obrázek 4.2.1 Vizualizace orientace tisku v softwaru Grabcad.....	25
Obrázek 4.2.2 Vizualizace hustoty výplně v softwaru Grabcad	25
Obrázek 4.3.1 Náhled tiskové plochy v softwaru Grabcad.....	26
Obrázek 4.4.1 Tiskárna Stratasys F370 [15]	27
Obrázek 4.4.2 Vzorky po dokončení tisku	28
Obrázek 4.6.1 Vzorky před tahovou zkouškou	29
Obrázek 4.7.1 Štítek trhacího stroje	30
Obrázek 4.7.2 Trhací stroj LabTest Model 5.100SP1	30
Obrázek 4.7.3 Upnutý vzorek po přetržení	31
Obrázek 4.7.4 Upnutý vzorek před zkouškou	31
Obrázek 4.8.1 Přetržený vzorek 24 oddělený	32
Obrázek 4.8.2 Přetržený vzorek 24	32
Obrázek 4.8.3 Schéma vrstev v řezu vzorku.....	32

7. Seznam grafů a tabulek

Graf 4.1 Závislost síly na protažení při orientaci tisku naplocho a výplni 100 %	33
Graf 4.2 Závislost síly na protažení při orientaci tisku naplocho.....	34
Graf 4.3 Závislost síly na protažení při orientaci tisku na bok	35
Graf 4.4 Závislost síly na protažení při orientaci tisku na výšku	35
Graf 4.5 Závislost síly na protažení pro výplň 100%.....	36
Graf 4.6 Závislost síly na protažení při výplni 50 %	36
Graf 4.7 Závislost síly na protažení při výplni 18 %	37
Graf 5.1 Závislost síly na protažení pro všechny varianty vzorků.....	39
Tabulka 4.1 Vysvětlení označení vzorků	29
Tabulka 4.2 Výsledky pro orientaci tisku naplocho a výplni 100%	33
Tabulka 4.3 Výsledky pro orientaci tisku naplocho.....	34
Tabulka 4.4 Výsledky pro orientaci tisku na bok.....	35
Tabulka 4.5 Výsledky pro orientaci tisku na výšku	35
Tabulka 4.6 Výsledky pro výplň 100%.....	36
Tabulka 4.7 Výsledky pro výplň 50%.....	36
Tabulka 4.8 Výsledky pro výplň 18%.....	37
Tabulka 5.1 Doba tisku jednoho vzorku	38
Tabulka 5.2 Spotřeba materiálu pro jeden vzorek.....	38
Tabulka 5.3 Výsledky pro všechny varianty vzorků.....	39

8. Seznam použitých zdrojů

- [1] PRŮŠA, Josef. *Základy 3D tisku s Josefem Průšou* [online]. Praha: Prusa Research, 2019 [cit. 2020-05-16]. Dostupné z: <https://www.prusa3d.cz/kniha-zaklady-3d-tisku-josefa-prusi/>
- [2] *3D Printing Industry-The Authority on 3D Printing & Additive Manufacturing* [online]. Copyright © [cit. 05.07.2018]. Dostupné z: <http://3dprintingindustry.com/wp-content/uploads/2014/07/3D-Printing-Guide.pdf>
- [3] *JAK SI VYBRAT TISKÁRNU technologie fff* [online]. ABC3D. 2020 [cit. 2020-06-12]. Dostupné z: <https://www.abc3d.cz/o-3d-tisku-neprehlednete/jak-si-vybrat-tiskarnu-technologie-fff>
- [4] *FDM 3D printing materials compared* [online]. 3d Matter. 2020 [cit. 2020-06-29]. Dostupné z: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/fdm-3d-printing-materials-compared/>
- [5] *Filamenty* [online]. XPARI.cz. 2020 [cit. 2020-06-16]. Dostupné z: <https://www.xpari.cz/2019/07/filamenty.html>
- [6] *Warping*. [online]. Simplify3D Software. 2020 [cit. 2020-07-28]. Dostupné z: <https://www.simplify3d.com/support/print-quality-troubleshooting/warping/>
- [7] *Stringing or Oozing*. [online]. Simplify3D Software. 2020 [cit. 2020-07-28]. Dostupné z: <https://www.simplify3d.com/support/print-quality-troubleshooting/stringing-or-oozing/>
- [8] *Ultimate Materials Guide - Tips for 3D Printing with PLA* [online]. Simplify3D Software. [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: <https://www.simplify3d.com/support/materials-guide/pla/>
- [9] *Ultimate Materials Guide - Tips for 3D Printing with ABS* [online]. Simplify3D Software. [cit. 2020-06-27]. Dostupné z: <https://www.simplify3d.com/support/materials-guide/abs/>
- [10] *Ultimate Materials Guide - Tips for 3D Printing with PETG* [online]. Simplify3D Software. [cit. 2020-06-26]. Dostupné z: <https://www.simplify3d.com/support/materials-guide/petg/>
- [11] TOOR, Ravi. *PET vs PETg Filament - What's the Difference?* [online]. 2019 [cit. 2020-06-14]. Dostupné z: <https://www.filamentive.com/pet-vs-petg-filament-whats-the-difference/>
- [12] *Ultimate Materials Guide - 3D Printing with Nylon* [online]. Simplify3D Software. [cit. 2020-06-28]. Dostupné z: <https://www.simplify3d.com/support/materials-guide/nylon/>
- [13] *TPU filament - learn everything about the TPU material for 3D printing* [online]. [cit. 2020-06-05]. Dostupné z: <https://tractus3d.com/materials/tpu/>
- [14] *Ultimate Material Guide - 3D Printing with Polycarbonate* [online]. Simplify3D Software. [cit. 2020-06-28]. Dostupné z: <https://www.simplify3d.com/support/materials-guide/polycarbonate/>
- [15] ČSN EN ISO 527-2. *Plasty - Stanovení tahových vlastností: Část 2: Zkušební podmínky pro tvářené plasty*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012, 15 s. Třídící znak 64 0604
- [16] ČSN EN ISO 6892-1. *Kovové materiály - Zkoušení tahem - Část 1: Zkušební metoda za pokojové teploty*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2020, 92 s. Třídící znak 42 0310
- [17] *Stratasys F123 Series* [online]. MCAE. [cit. 2020-06-10]. Dostupné z: <https://www.mcae.cz/cs/produkty/stratasys-f123-series/>

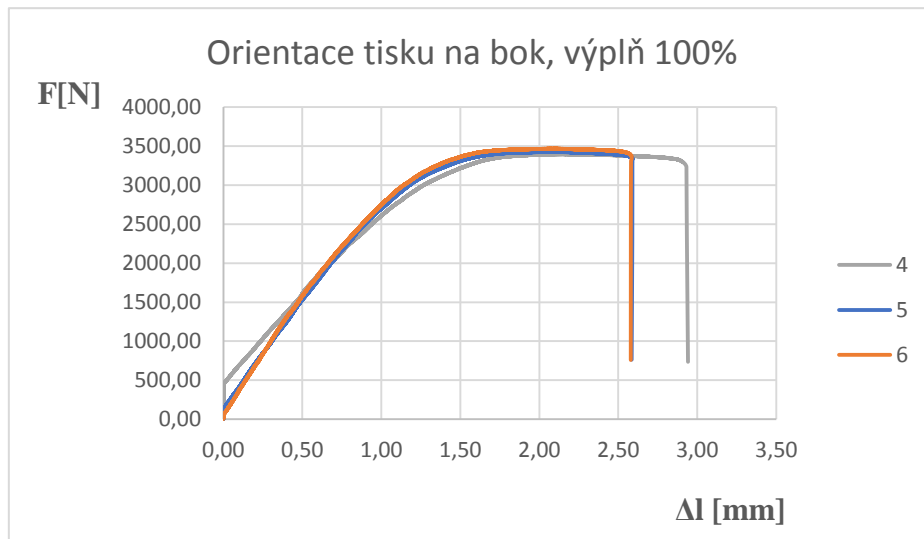
[18] HASSAN, Azman a Wong Yean JWU. *Mechanical Properties of High Impact ABS/PC Blends - Effect of Blend Ratio*. Symposium Polimer Kebangsaan Ke-V Hotel Residence [online]. Aug 2005, 65-76 [cit. 2020-07-28]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/237602272_MECHANICAL_PROPERTIES_OF_HIGH_IMPACT_ABSPC_BLENDS_-_EFFECT_OF_BLEND_RATIO

[19] *PC-ABS*. [online]. Stratasys. [cit. 2020-07-28]. Dostupné z: https://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:kDqh6P6xS3cJ:https://www.stratasys.com/-/media/files/material-spec-sheets/mss_fdm_pcabs_1217a.pdf+&cd=12&hl=cs&ct=clnk&gl=cz

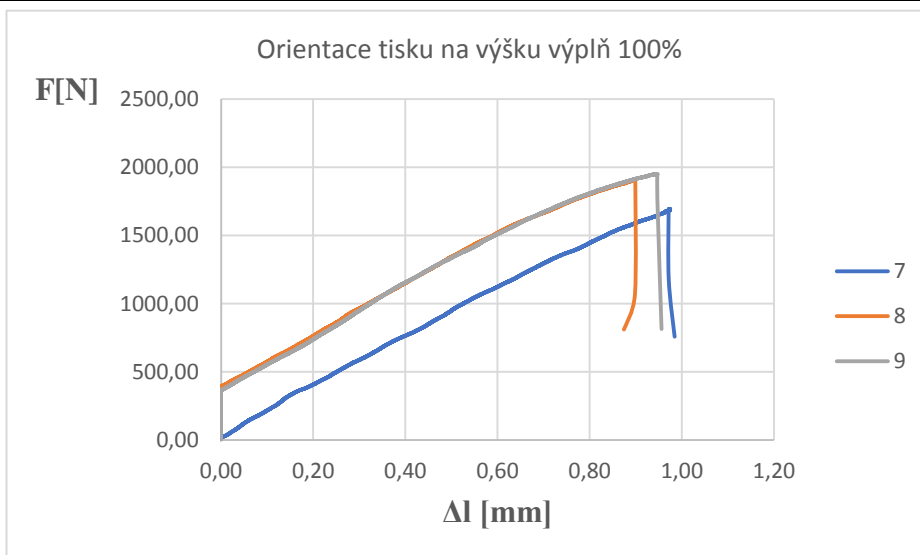
9. Seznam příloh

Příloha A: Grafy závislosti síly na protažení a tabulky veličin pro vzorky 4–27

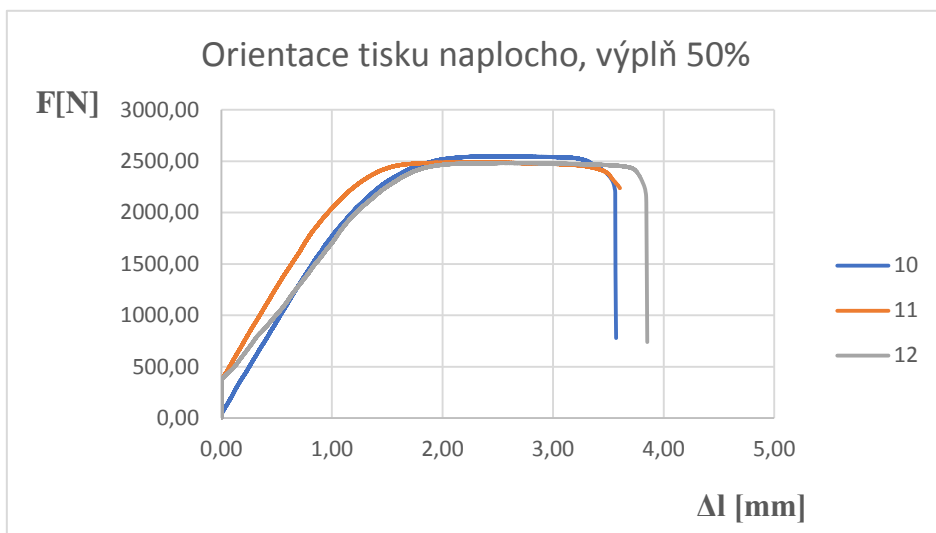
Příloha A



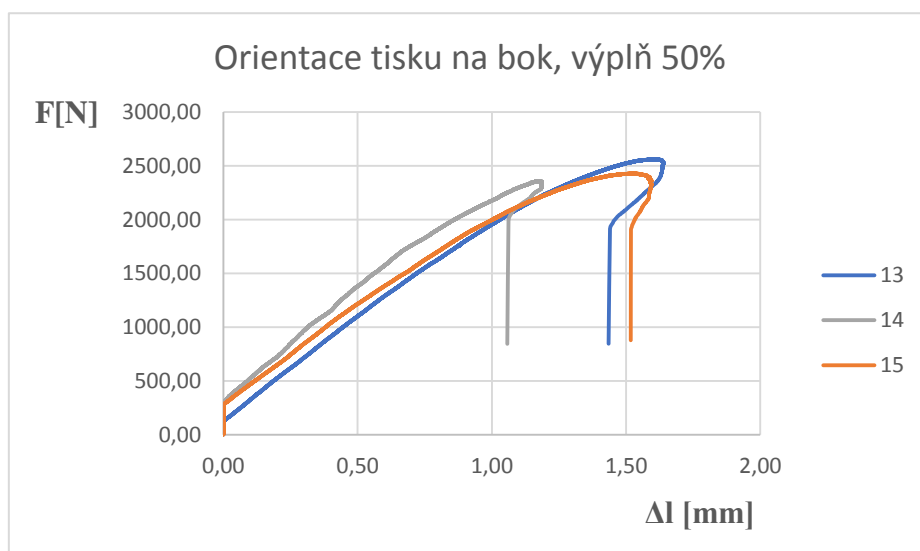
	R_m [MPa]	$R_{p0,2}$ [MPa]	A [%]	$F_{p0,2}$ [N]	F_m [N]
4	40	27	3,7	2261	3398
5	41	31	3,0	2574	3427
6	41	28	3,1	2332	3468
průměr	41	28,7	3,26	2388,8	3431,1
směrodatná odchylka	0	1,70	0,316	133,96	28,74



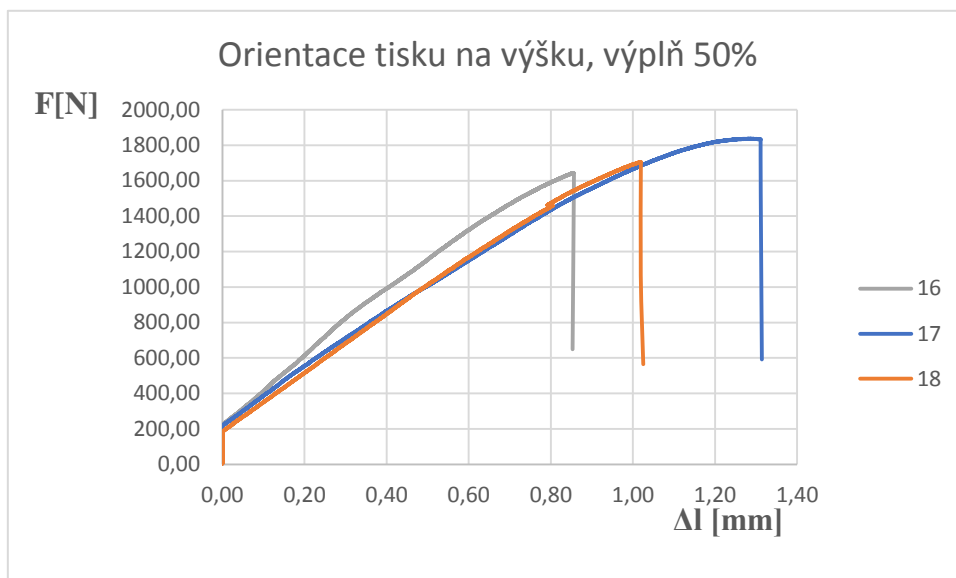
	R_m [MPa]	$R_{p0,2}$ [MPa]	A [%]	$F_{p0,2}$ [N]	F_m [N]
7	21	16	0,4	1250	1695
8	24	17	0,7	1340	1910
9	24	19	0,6	1507	1950
průměr	23	17,3	0,55	1365,3	1851,7
směrodatná odchylka	1,4	1,25	0,120	106,33	111,70



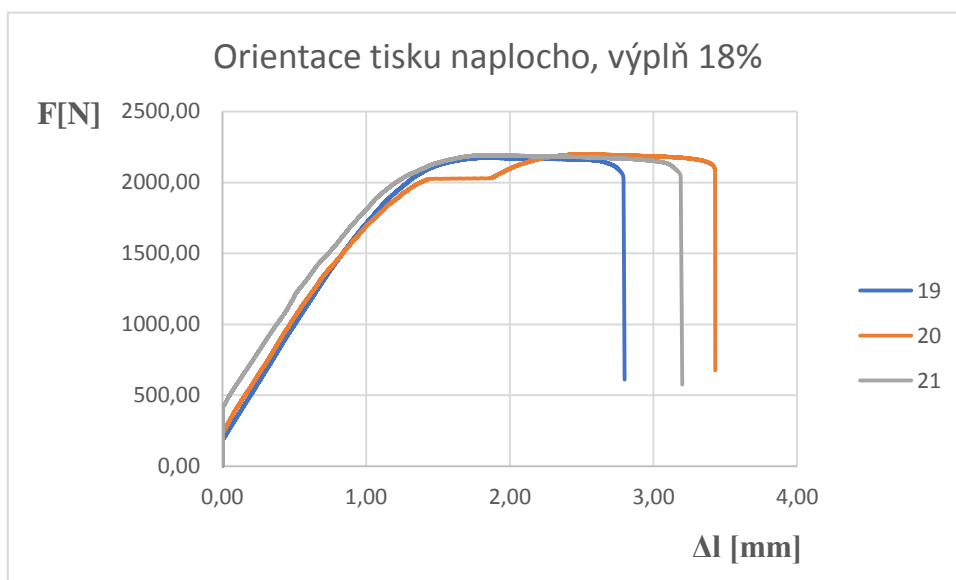
	R_m [MPa]	$R_{p0,2}$ [MPa]	A [%]	$F_{p0,2}$ [N]	F_m [N]
10	39	8	5,5	541	2546
11	38	21	5,7	1391	2489
12	38	12	6,3	762	2483
průměr	38	14	5,82	898,0	2505,9
směrodatná odchylka	0,4	5,5	0,340	360,16	28,44



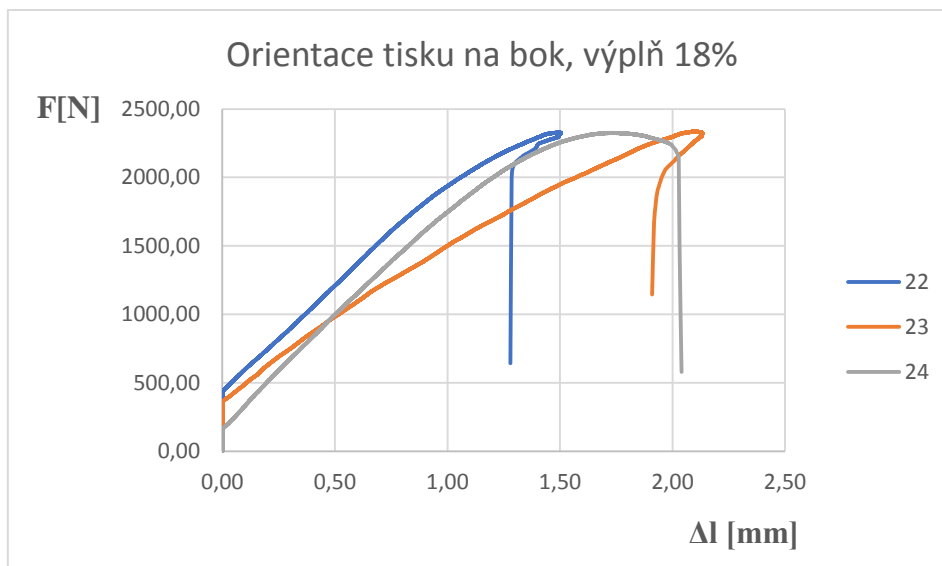
	R_m [MPa]	$R_{p0,2}$ [MPa]	A [%]	$F_{p0,2}$ [N]	F_m [N]
13	41	11	1,8	721	2653
14	37	22	0,9	1388	2361
15	37	16	1,9	1030	2430
průměr	38	16,2	1,52	1046,2	2481,5
směrodatná odchylka	2	4,21	0,422	272,58	124,76



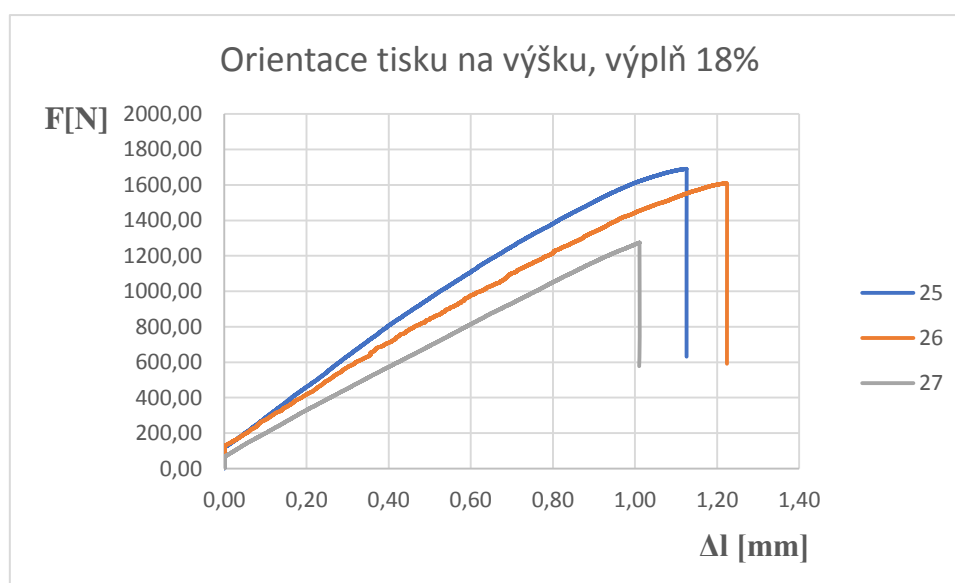
	R_m [MPa]	$R_{p0,2}$ [MPa]	A [%]	$F_{p0,2}$ [N]	F_m [N]
16	26	16	0,7	1044	1644
17	29	11	1,5	726	1838
18	27	12	0,9	763	1705
průměr	27	13,2	1,03	844,4	1728,9
směrodatná odchylka	1,3	2,22	0,369	142,05	80,88



	R_m [MPa]	$R_{p0,2}$ [MPa]	A [%]	$F_{p0,2}$ [N]	F_m [N]
19	40	14	4,1	761	2175
20	41	15	5,3	825	2200
21	41	19	5,0	1027	2192
průměr	41	16	4,79	870,8	2188,9
směrodatná odchylka	0,2	2,1	0,545	113,12	10,41



	R_m [MPa]	$R_{p0,2}$ [MPa]	A [%]	$F_{p0,2}$ [N]	F_m [N]
22	43	20	1,4	1051	2328
23	43	15	2,7	781	2335
24	43	14	2,6	752	2326
průměr	43	16,1	2,21	861,3	2329,8
směrodatná odchylka	0	2,52	0,601	134,80	4,01



	R_m [MPa]	$R_{p0,2}$ [MPa]	A [%]	$F_{p0,2}$ [N]	F_m [N]
25	32	14	1,0	742	1691
26	31	9	1,5	478	1611
27	24	7	1,2	344	1275
průměr	29	9,9	1,23	521,1	1525,8
směrodatná odchylka	3,5	3,14	0,184	165,08	180,35