



Pedagogická
fakulta
Faculty
of Education

Jihočeská univerzita
v Českých Budějovicích
University of South Bohemia
in České Budějovice

Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích

Pedagogická fakulta

Katedra aplikované fyziky a techniky

Bakalářská práce

Technické vlastnosti materiálů na 3D tisk

Vypracoval: Martin Mikuda

Vedoucí práce: Mgr. Pavel Černý, Ph.D.

České Budějovice 2023

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem autorem této kvalifikační práce a že jsem ji vypracoval pouze s použitím pramenů a literatury uvedených v seznamu použitých zdrojů.

V Českých Budějovicích 7. července 2023

Martin Mikuda

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce panu Mgr. Pavlovi Černému, Ph.D. za odborné vedení, trpělivost, vstřícný přístup, cenné rady a výbornou spolupráci. Rovněž bych chtěl poděkovat mé rodině, která mě v průběhu celého studia podporovala.

Abstrakt

Tato bakalářská práce pojednává o porovnání mechanických vlastností 3D tiskových materiálů PLA, vyráběných na území České republiky. Pro porovnání byly zvolené materiály výrobců Prusa, Filament PM a Aurapol. Porovnání materiálů probíhalo pomocí měření ovality a standardizovaných mechanických zkoušek. Během měření bylo zjištěno, že nejpřesnější filament dodává výrobce Prusa. U tohoto výrobce byla naměřena ovalita $0,21 \pm 0,02$ %. Z výsledků tahové zkoušky byl určen materiál s nejvyššími hodnotami pevnosti v tahu. Je to materiál Filament PM, který dosahoval hodnot $48,6 \pm 0,8$ MPa pro tisk pomocí perimetru a 33 ± 2 MPa pro tisk pomocí dvou perimetrů a 100% výplně. U zkoušky rázové houževnatosti bylo zjištěno, že podle zvolení orientace tiskové vrstvy můžeme dosáhnout dvojnásobné rázové houževnatosti. Z výsledků zkoušek bylo určeno, že pro tisk, kde je vyžadována u výrobku mechanická odolnost, je nejvhodnější zvolit materiál od výrobce Filament PM. Pro ostatní tisky je možné zvolit nejlevnější materiál od firmy Aurapol. Rozdíl mechanických vlastností není u nejdražšího materiálu Prusa a nejlevnějšího materiálu Aurapol nijak výrazný. U některých vlastností dosahoval materiál Aurapol lepších výsledků než Prusa.

Klíčová slova

3D tisk, materiál PLA, tahová zkouška, ovalita materiálu, rázová houževnatost

Abstract

This bachelor's thesis deals with the comparison of the mechanical properties of PLA 3D printing materials produced in the Czech Republic. Materials from the manufacturers Prusa, Filament PM and Aurapol were selected for comparison. Materials were compared using ovality measurements and standardized mechanical tests. During the measurement, it was found that the most accurate filament is supplied by the Prusa manufacturer. For this manufacturer, the ovality was 0.21 ± 0.02 %. From the results of the tensile test, the material with the highest tensile strength values was determined. It is a Filament PM material that reached values of 48.6 ± 0.8 MPa for printing using perimeters and 33 ± 2 MPa for printing using two perimeters and 100% filling. In the impact resistance test, it was found that depending on the orientation of the printing layer, we can achieve double the impact resistance. From the results of the tests, it was determined that for printing where mechanical resistance is required for the product, it is most appropriate to choose the material from the manufacturer of Filament PM. For other prints, it is possible to choose the cheapest material from Aurapol. The difference in mechanical properties is not significant for the most expensive Prusa material and the cheapest material Aurapol. For some properties, Aurapol material achieved better results than Prusa.

.

Key words

3D print, material PLA tensile testing, material roundness, impact resistance

Obsah

Úvod.....	8
1 Teoretická část	9
1.1 3D tisk	9
1.1.2 FFF.....	10
1.1.3 Popis tiskárny typu FFF	10
1.2 Popis tisku u FFF	11
1.2.1 Parametry ovlivňující výrobek.....	12
1.2.2 Perimetr a výplň.....	13
1.3 Tiskový materiál PLA	14
1.3 PLA fyzikální vlastnosti.....	15
1.3.1 PLA jako materiál pro 3D tisk	16
1.3.1.1 Vliv vlhkosti na kvalitu tisku.....	16
1.3.1.2 Vliv barev	17
2 Materiály a metody	18
2. 1 Použité materiály	18
2. 2 Použité metody.....	18
2. 2. 1 Měření pomocí mikrometru	18
2. 2. 2 Tisk pomocí FFF.....	18
2. 2. 3 Tahová zkouška.....	19
2. 2. 3 Rázová zkouška	19
3 Praktická část.....	20
3. 1 Ovalita filamentu	20
3. 1. 1 Výroba nástavce na mikrometr	20
3. 1. 2 Výsledky zkoušky ovality	21
3. 2 Pevnost v tahu	22
3. 2. 1 Výroba zkušebních vzorků.....	22

3. 2. 2 Výsledky tahové zkoušky	23
3. 2. 3 Porovnání výsledků tahové zkoušky pro tiskové konfigurace	24
3. 3 Rázová houževnatost.....	29
3. 3. 1 Výroba vzorků.....	29
3. 3. 1 Výsledky rázových zkoušek.....	30
3.4 Vliv barviv na mechanické vlastnosti	34
Diskuse	36
Závěr	40
Použitá literatura.....	41

Úvod

Výroba věcí pomocí 3D tisku se v dnešní době objevuje stále častěji. S touto technologií se můžeme setkávat v profesionální i amatérské sféře. 3D tisk se stále více začíná objevovat i ve školství. Zde se jeho pomocí dají vytvářet školní pomůcky, či je zařazen jako jedna z výrobních technik při hodinách.[1]

Nejčastěji se objevující 3D tisková technologie v této souvislosti je technologie FFF. Ta dosahuje velkého rozšíření díky cenové dostupnosti přístrojů, cenové dostupnosti materiálů pro tisk, nenáročnou obsluhu a schopnosti tisknout výrobky k přímému použití, tj. bez nutnosti dalších úprav. [2]

Nejčastější materiál využívaný pro tisk je v současné době PLA (kyselina polyléčná). Tento materiál si získal své místo díky svým tiskovým vlastnostem, které jsou podpořeny ekologickými aspekty, kdy není jako základní materiál pro výrobu ropa, jako je tomu u většiny polymerů, ale jako základní materiál je zde kukuřičný škrob. Materiál PLA je pro své tiskové vlastnosti udáván jako univerzální materiál pro tisk. [3]

Při nákupu tiskového materiálu se setkáváme s různými výrobci, kteří nabízí své produkty v různých cenových hladinách. Jedná se o různě velké výrobce, ze světa ale i z České republiky. Při pročítání jednotlivých nabízených filamentů jednoho materiálu, lze u všech nalézt totožné informace. [4, 5, 6]

Cílem práce je, u vybraných výrobců z České republiky, určit základní mechanické vlastnosti materiálů a porovnat tyto hodnoty mezi sebou. Na základě tohoto porovnání, do kterého bude zahrnuta i pořizovací cena materiálu, určit, který materiál je vhodný pro jaký tisk a od jakých výrobců by bylo nejvhodnější sestavit portfolio materiálů.

1 Teoretická část

1.1 3D tisk

V dnešní době existuje velké množství 3D tiskových technologií, se kterými se lze setkat. V současné době jsou nejpoužívanější technologie typu SLS, SLA a FFF, které se dostávají kromě průmyslové sféry, do vzdělávacích institucí i k domácím uživatelům. [1, 7]

SLA neboli Stereolitografie. Je metoda 3D tisku, při které dochází k nanášení celé vrstvy najednou. Využívají se fotochemické vlastnosti materiálů. Tiskový materiál zde tvoří pryskyřice citlivé na světlo, které jsou následně vytvrzovány pomocí UV záření vyvolané UV laserem, nebo pomocí speciálního displeje. Při tisku se pryskyřicí napustí speciální nádrže a nanese se na podložku, která je pevná nebo pohyblivá. U pevné podložky dochází k postupnému přidávání vrstev, tak, že po každé vytvrzené vrstvě je nanесena nová vrstva pryskyřice a pomocí laseru vytvrzena. U pohyblivé dochází k postupnému ponořování podložky do nádrže s pryskyřicí, a k vytvrzování dochází na dně nádrže, které je tvořeno UV displejem. Takto vyrobený model není přímo určen k dalšímu zpracování, kdy musí nejdříve dojít k sérii mytí a dalšího vytvrzení. Vlastnosti výrobků se liší podle zvoleného materiálu. Obecně se o této metodě dá říci, že je velice přesná a tím vhodná na výrobu detailních výrobků.[1, 7, 8]

Technologie SLS, z anglického Selective laser sintering, je selektivní laserové spékání. Jako výchozí materiál je zvolen polymer v práškové podobě. K tisku dochází postupem, kdy je na nanášena tenká vrstva práškového polymeru, která je spečena pomocí výkonného laseru. Výrobky, vyrobené touto metodou, se vyznačují vysokou přesností a pevností srovnatelnou se vstřikovou metodou výroby. Další velikou výhodou je možnost tisku složitých struktur bez podpěr, jelikož je výtisk podepíráný přebytečným práškem, který se na konci tisku recykluje a využije jako materiál k dalšímu použití. Lze tak tisknout složité vnitřní struktury, které by nešlo vyrobit jinou metodou. [1, 9]

1.1.2 FFF

V dnešní době je to nejrozšířenější metoda 3D tisku, která, díky své stále nižší finanční nákladnosti na pořízení přístroje a materiálu, získává stále vyšší zastoupení ve výrobě a prototypování, ale i v domácnostech jako hobby přístroj. [3]

Technologie FFF, z anglického Fused filament fabrication, je technologie 3D tisku, která využívá souvislý tenký pruh nataveného termoplastického polymeru. Materiál je nejčastěji dodáván v podobě struny navinuté na cívce. Častější pojmenování pro tiskovou strunu je filament. Přírůstek výrobku je realizován pomocí pohyblivé části zvané extruder, kde je materiál zahříván a dále je postupně vrstven.

[1, 10, 11]

1.1.3 Popis tiskárny typu FFF

3D tiskárna typu FFF má několik základních součástí, kdy každá z nich má svůj specifický úkol. Jaké součásti to jsou a jaké mají úkoly je vysvětleno v následující části. [11, 12]

Řídící jednotku můžeme označit za mozek celé tiskárny. Jejím úkolem je řídit provoz přístroje. Jedná se o mini počítač, který dokáže číst příkazový soubor a tím nastavovat a upravovat jednotlivé teploty, řídit pohyb tiskových os nebo pomocí senzorů reagovat na chyby vzniklé z vnějšího prostředí. [12,13,14]

Nosná konstrukce tiskárny, nazívaná též rám. Od jeho kvality se odvíjí celková podoba konečného výrobku. Rám musí pevně držet pohyblivé prvky a tlumit vibrace vzniklé chodem motorů. Dále musí být dostatečně těžký a robustní, aby nedocházelo k pohybu tiskárny změnou kinetické energie při pohybu extruderu. Velikost rámu je jeden z faktorů ovlivňující maximální velikost výrobku. [11, 12, 13]

Extruder je část tiskárny, kde dochází k přeměně surového materiálu do podoby vhodné k tisku. K tomu zde dochází vlivem zahřívání termoplastu do tvárné podoby. Extruder se skládá z několika částí. Při popisu zdola nahoru se jedná o tiskovou trysku, topné těleso, heat break a chladič. Chladič a heat break mají za úkol oddělit zbytek mechanismu přivádějící materiál od nadbytečného tepla, které je potřeba k přeměně materiálu. Chladič má podobu většího kovového bloku s žebrováním, často doplněný o chladicí větrák. Skrz chladič je přiváděna tisková struna do vyhřívané trysky. Tisková tryska je upevněná ve větší kovové součástce zvané heat block, který má za úkol kumulovat teplo vytvořené topným tělesem.

Hlavním parametrem pro tiskovou trysku je průměr otvoru, kterým vytéká roztavený materiál, tento průměr určuje šíři stopy tiskového materiálu. Heat block je připojen pomocí kovové trubičky k chladiči, aby nedocházelo k nadměrnému úniku tepla. Samotný tisk je pak prováděn tiskovou tryskou, do které je přiváděn filament skrz chladič a heat break. Přísun filamentu je zajištěn pomocí podavače, který je konstrukčně připevněný k extruderu nebo je připevněný k rámu a filament je k extruderu přiváděn pomocí bovdenového systému. [11, 12, 13, 14]

Tisková podložka tvoří základnu pro tiskový prostor. Na podložku se postupně vrství výrobek, který je na něj připevněný první vrstvou. Podložka bývá často vyhřívaná. U výrobků z materiálů s vyšší tepelnou roztažností, by docházelo k nerovnoměrnému chladnutí a vadám na konečném výrobku. [11, 12, 13]

Pohyb tiskárny je zajišťován pomocí krokových motorů, které jsou řízeny řídící jednotkou. Jedná se o pohyby jednotlivých os tiskárny a pohyb podavače filamentu. Motory jsou připevněné k rámu a pohyb je realizován pomocí ozubených kol a řemenů nebo závitových tyčí. [11, 12, 13, 14]

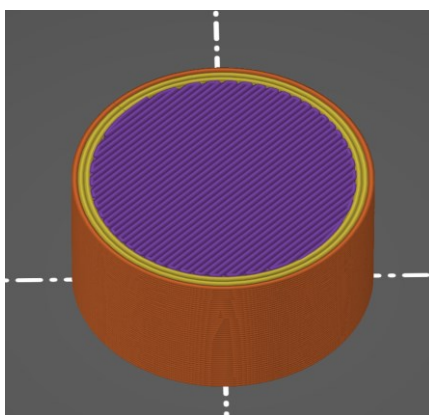
1.2 Popis tisku u FFF

V případě potřeby vytvoření výrobku pomocí 3D tisku má tato metoda několik základních kroků postupu. [1, 7]

Nejdříve je potřeba vytvořit CAD programů vytvořit 3D digitální model a ten je nutno upravit do podoby, se kterou dokáže pracovat 3D tiskárna. K tomuto účelu slouží programy zvané slicery. Jedná se o programy, které dokáží 3D model rozdělit do jednotlivých vrstev, z toho slicer, nebo-li plátkovač. Jedná se například o program Slic3r a od něj odvozený PrusaSlicer nebo UltiMaker Cura. Jednotlivé vrstvy jsou přepsány do textového kódu, ve kterém jsou zadány pohyby jednotlivých os, teploty a množství vkládaného materiálu. Tento soubor se nazývá Gcode. Gcode se předá do řídící jednotky, pomocí přímého datového propojení, nebo pomocí přenosného paměťového média. Proces samotného tisku je automatizovaný a řídící jednotka pomocí informací z Gcodu vytvoří požadovaný výrobek. Tento postup je univerzální pro veškeré 3D tiskárny. U některých typů tiskáren se místo pohybů jedné z os ukládají informace o rozsvícení UV diod na osvitové ploše. [1, 7, 8, 9]

FFF tisk je specifický svou postupnou výrobou vrstev a rozdílem způsobu tisku okraje a vnitřní části výrobku.[10, 11]

Na obrázku 1.1 je vidět postupná výroba pomocí kontinuálního vlákna materiálu. Ve vizualizaci můžeme vidět tři různé barvy. Oranžová vizualizuje vnější okraj výrobku. Žlutá barva zobrazuje vnitřní okraje výrobku. Počet vnitřních a vnějších okrajů nám udává tloušťku stěny. Ve světě 3D tisku se tyto okraje značí jako perimetry. Do stěny se dále připojuje výplň, zde znázorněna fialově. Výplň tvoří vnitřní tělo výrobku. Na obrázku je vidět 100% výplň, která může být pro úsporu materiálu obsahově snížena na požadovanou úroveň, čímž je možno vyrobit dutý výrobek. [11, 15]



Obrázek 1.1: Vizualizace 3D tisku v programu PrusaSlicer.

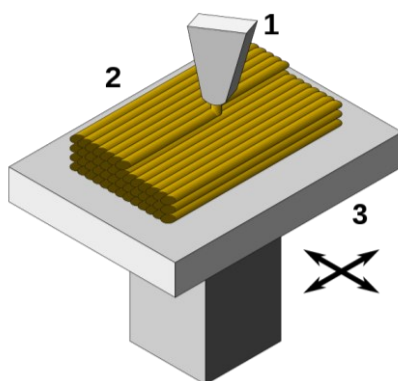
Při tisku vrstvy je nejdříve vytvořen obrys objektu a ten je postupně vyplněn pomocí vedle sebe kladených pruhů materiálu. Tento proces by se dal přirovnat k malování obrázku, kdy je nejdříve nakreslen obrys a ten je poté vybarvován souvislými rovnoběžnými tahy od okraje k okraji. [15, 16]

1.2.1 Parametry ovlivňující výrobek

Při výrobě pomocí 3D tisku je možné nastavovat v programu slicer mnoho parametrů. Parametry jsou zaprvé dány zvoleným materiálem. Zde se jedná hlavně o teplotu trysky a teplotu tiskové podložky. Dále nastavením ovlivňujícím konečný výrobek. Jedná se o počty perimetrů, množství výplně nebo výšku jednotlivých vrstev. Výška vrstvy je ovlivněna přesností krokového motoru a průměrem otvoru zvolené tiskové trysky. Čím větší průměr trysky, tím větší výšku jednotlivých vrstev můžeme zvolit a naopak, čím menší průměr, tím můžeme volit menší výšku jednotlivých vrstev. [11, 17]

1.2.2 Perimetr a výplň

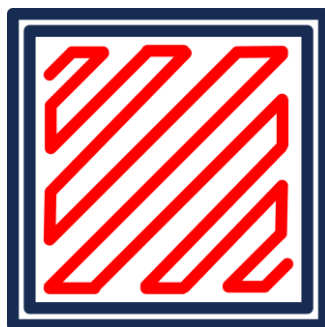
Dalším faktorem uvlivňujícím vlastnosti konečného výrobku je umístění jednotlivých tiskových pramenů. [18] Na obrázku 1.2 je vidět vizualizace technologie tisku FFF. Číslem 1 je označen extruder, číslem 2 je označen výrobek a číslem 3 je označena pohyblivá podložka. Na obrázku je vidět, jak při FFF tisku vzniká výrobek postupným pokládáním jednotlivých pramenů materiálu, které se k sobě natavují.



Obrázek 1.2: Vizualizace technologie FFF. [19]

Při pokládání tiskových pramenů je žádoucí jejich napojování na sebe. Vytváří se tak spoj mezi už položenými prameny a pramenem nově pokládaným. Pramen má díky trysce v základu kulatý tvar, který je při kladení na podložku či předchozí vrstvu mírně sploštěn. Můžou tak vznikat vzduchové mezery a tím docházet ke snížení pevnosti výrobku. [18, 20]

Na obrázku 1.3 je znázorněna vizualizace jedné vrstvy tisku. Konkrétně zde se jedná o tisk se dvěma perimetry a 100% výplní. Pro názornost jsou zde zvětšené mezery. Tmavě modrou jsou zobrazeny perimetry a červenou je zde vyznačena výplň. Bílá barva na obrázku znázorňuje možné vzduchové mezery. [20]



Obrázek 1.3: Vizualizace jedné vrstvy FFF tisku.

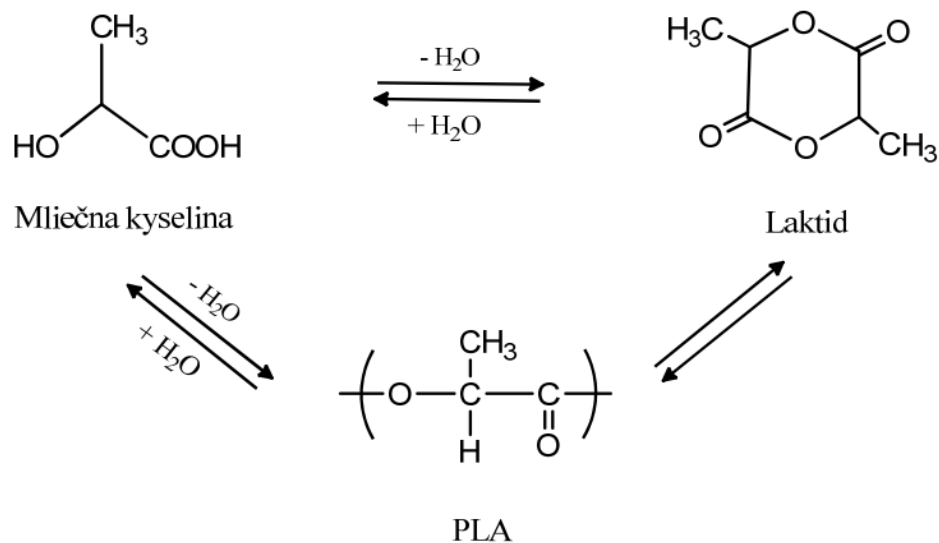
Dalším faktorem, ovlivňujícím konečnou pevnost výrobku, je výplň. Zde se nevíce uplatňují vzduchové mezery. Když jednotlivé prameny výplně v jedné vrstvě leží vedle sebe tak, že se dotýkají v celé své délce, nazýváme tuto výplň 100%. V případě kdy se nevyskytují mezi perimetry žádné prameny výplně, se tato výplň nazývá jako 0%. Přidáváním materiálu do výplně se zvyšuje procentuální zastoupení materiálu oproti vzduchu. Takto se při nastavování tiskových parametrů označuje výplň, jež se udává v procentech. [1, 20]

1.3 Tiskový materiál PLA

Polymléčná kyselina, anglicky polylactic acid PLA, je biodegradabilní polymer, vyráběný z kyseliny 2-hydroxypropanové, triviálním názvem kyselina mléčná. Kyselina mléčná je nejčastěji získávána ze škrobu kukuřice, brambor nebo cukrové třtiny pomocí fermentace. Tato kyselina je v přírodě velmi běžnou karboxylovou kyselinou. Díky jednomu chirálnímu uhlíku ve své struktuře, tvoří dva izomery kyselinu L – mléčnou a kyselinu D - mléčnou. [21, 22]

PLA díky této vlastnosti kyseliny mléčné může tvořit ve dvou modifikacích. Tvoří se semikrystalický nebo amorfní polymer. Semikrystalický se tvoří vždy pouze z jednoho izomeru L nebo D a vzniká poly L -mléčná kyselina (PLLA) nebo poly D -mléčná kyselina (PDLA). Tyto materiály vynikají svou optickou čistotou. Liší se pouze ve stáčení roviny polarizovaného světla. Teplota skelného přechodu i teplota tání se u PDLA a PLLA neliší. Dále může vznikat amorfní PLA, který ve své struktuře obsahuje oba izomery kyseliny mléčné v neuspořádaném pořadí, toto nazýváme ataktickým polyaktidem. [21, 23]

PLA se nejčastěji vyrábí pomocí dvou chemických procesů. Prvním je přímá polykondenzace kyseliny mléčné a druhým je otevírání laktidového cyklu. Kyselina mléčná vytváří cyklický laktid, který je pomocí katalyzátoru otevřen a vzniká monomer, ze kterého se následně pospojuje řetězec polymeru. Tato metoda je finančně nákladnější, ale je při ní snazší vytvářet dlouhé řetězce s vysokou molekulovou hmotností. Na obrázku 1.4 je pomocí vzorce vyjádřena přeměna kyseliny mléčné a laktidu na kyselinu polymléčnou.[23]



Obrázek 1.3: Přeměna kyseliny mléčné a laktidu na kyselinu polymléčnou. [24]

Proces polymerace kyseliny mléčné na PLA je obousměrný, tudíž je možné PLA znovu přeměnit na kyselinu mléčnou. Díky této vlastnosti si materiál PLA nachází své místo v oblasti medicíny. Vyrábí se z něj chirurgické nitě či podpůrné konstrukce kostí. PLA se v těle pomalu rozloží na kyselinu mléčnou. Kyselinu mléčnou lidské tělo dokáže samo produkovat a následně metabolizovat. [22, 23, 24, 26]

Díky svému zdroji, kterým není ropa, jako u většiny plastů, si nachází místo i v dalších odvětvích lidského života. Jedná se o materiál využívaný v místech, kde je důraz na přechod k ekologičtějším materiálům, kde nahrazuje běžné plasty vyrobené z ropy. Jedná se například o potravinářský průmysl, k výrobě obalových materiálů, jednorázově používaného nádobí a dalších. [25]

1.3 PLA fyzikální vlastnosti

V následující tabulce jsou uvedeny základní fyzikální a mechanické vlastnosti pro materiál PLA. Hodnoty byly stanoveny pro vzorky vyrobeny vstřikovou metodou.

Tabulka 1.1: Přehled základních fyzikálních a mechanických vlastností materiálu PLA [27]

Veličina	Hodnota
Hustota	1,27 g/mm ³
Teplota tání	150-190 °C
Teplota skelného přechodu	55-60 °C
Pevnost v tahu	59 MPa
Modul pružnosti v tahu	3.3 GPa
Rázová houževnatost	2 J/cm ²

1.3.1 PLA jako materiál pro 3D tisk

Díky fyzikálním a mechanickým vlastnostem se PLA stal jedním z nejpoužívanějších materiálů pro 3D tisk pomocí technologie FFF. Při tisku se uplatňuje nízká teplota tání, malá tepelná roztažnost, vysoká přilnavost k tiskové podložce. PLA se v tomto technickém odvětví označuje za univerzální materiál, který je vhodný pro všechny druhy tisku. Díky nízké tepelné roztažnosti je s ním možné tisknout velké objekty bez nutnosti úprav prostředí. Úpravou prostředí je myšleno vytvoření prostředí bez proudění vzduchu a o stálé teplotě. Například uzavřená tisková skříň s termostatem. PLA je vhodný i na tisk drobných dílů. [1, 4, 5, 6]

Ke koncovému uživateli je materiál PLA nejčastěji dodáván ve formě struny navinuté na cívce o hmotnosti jeden nebo dva kilogramy. Dnes je mezi uživateli nejčastěji používaná struna o průměru 1,75 mm, ale dodává se i v průměru 2,85 mm. Větší průměr je určen pro zařízení s větším průměrem tiskové trysky. [1, 4, 5, 6]

1.3.1.1 Vliv vlhkosti na kvalitu tisku

Kyselina polymléčná tvoří svojí strukturou nepolární molekulu. Je rozpustná v organických rozpouštědlech. Má nízkou smáčivost. Je schopna degradovat pomocí hydrolýzy a tím štěpit molekulu na kratší oligomery. To může ovlivnit

teplotu tání i teplotu skelného přechodu. Může tedy docházet k nerovnoměrnému tavení materiálu. [22,24]

Při nákupu materiálu pro 3D tisk je obecně prodejci doporučováno skladovat materiál v suchém prostředí. Materiál PLA je nasákavý ze vzdušné vlhkosti. Pokud je materiál nesprávně skladovaný, dojde k navlhnutí materiálu. Při tisku se tato skutečnost projevuje tak, že díky vysoké teplotě trysky dojde k zahřívání vody a její přeměnu na páru. To způsobuje zvukový projev při tisku a vznik kvalitativních chyb na povrchu tisku. Pára se navíc může uzavřít mezi tiskové prameny a tím způsobit nedokonalé prolepení jednotlivých tiskových pramenů. [1, 4, 5, 6]

1.3.1.2 Vliv barev

Materiál PLA, díky své nízké smáčivosti, není vhodný pro následné barvení pomocí nátěrových hmot. Pokud je pro tisk vyžadována barva, je vhodné zvolit rovnou materiál obarvený z výroby. Pokud prodejce nabízí materiál, který je označený jako neutrální barva, není v popisech vlastností materiálu žádný rozdíl mezi ním a barevným. Výrobce deklaruje stejné vlastnosti u všech materiálů nezávisle na barvě filamentu. [1, 4, 5, 6]

2 Materiály a metody

2. 1 Použité materiály

Pro testy mechanických vlastností byly získány vzorky filamentů materiálu PLA. Byly zvoleny filameny od českých výrobců. Aurapol PLA filament Machgeine blue, dále označován jako Aurapol, o udávaném průměru $1,75 \pm 0,02$ mm, doporučená teplota tisku $210 - 230$ °C, teplota podložky $40 - 60$ °C, doporučená prodejní cena 405 Kč. Filament PM PLA – Stříbrná, dále označován jako PM, o udávaném průměru $1,75 \pm 0,05$ mm, doporučená teplota tisku $200 - 220$ °C, teplota podložky 60 °C, doporučená prodejní cena 550 Kč. Prusament PLA Prusa Orange, dále označován jako Prusa, o udávaném průměru $1,75 \pm 0,02$ mm, doporučená teplota tisku 215 °C, teplota podložky 60 °C, doporučená prodejní cena 699 Kč. Pro závěrečné porovnání byl získán filament neutrální barvy od firmy Aurapol o udávaném průměru $1,75 \pm 0,02$ mm, doporučená teplota tisku $210 - 230$ °C, teplota podložky $40 - 60$ °C, doporučená prodejní cena 405 Kč.

2. 2 Použité metody

2. 2. 1 Měření pomocí mikrometru

Základní měření odmotávaného filamentu bylo realizováno pomocí analogového mikrometru značky XTline s rozsahem měření $0 - 25$ mm a přesností $0,01$ mm. Filament byl navléknut do připraveného nástavce, který zaručil měření rozměrů průřezu filamentu ve vzájemné poloze 90 °. Nástavec byl posunut o 1 metr po navlečeném filamentu a byly změřeny rozměry. Měření bylo opakováno 30 krát. Výsledné hodnoty byly zaneseny do tabulky a z nich byly vypočteny hodnoty odchylky ovality a relativní obsah filamentu oproti ideálnímu, tvořenému pravidelným dokonalým kruhovým průřezem o průměru $1,75$ mm.

2. 2. 2 Tisk pomocí FFF

Pro tisk vzorků určených pro testování mechanických vlastností byla zvolena 3D tiskárna Original Prusa MINI+. Parametry tisku byly nastaveny pomocí předpřipraveného tiskového profilu Prusament PLA. Teplota tisku 215 °C, teplota podložky 60 °C, rychlost tisku 40 mm/s. Tisk byl prováděn pomocí trysky o průměru $0,4$ mm. Výška jedné vrstvy byla nastavena na $0,2$ mm. Pro každý materiál se byly vytištěny 2 tiskové konfigurace. Pro první byl zvolen běžný tisk

při 100% výplni a dvou perimetrech a pro druhou tisk pouze pomocí perimetrů, kde byl zvolen počet 22. 100% výplň byla zvolena pro možné porovnání s tabulkovými hodnotami pro homogenní vzorek. Zkušební tělesa pro tahovou zkoušku byla v sériích tisknuta po pěti kusech. Tělesa pro rázovou zkoušku byla tisknuta všechna najednou, pro každou konfiguraci materiálu a rozložení vrstev. Tisk probíhal na podložce s hladkým PEI povrchem, kde nebyl použit žádný další adhezni materiál. Podložka byla po každé tiskové sérii očištěna pomocí izopropylalkoholu. Tisk probíhal v samostatné, vytápěné místnosti, vždy z nově oevřené cívky materiálu. Vytisknutá zkušební tělesa byla označena a umístěna do uzavíratelného boxu, ve kterém se nacházely sáčky se silikagelem.

2. 2. 3 Tahová zkouška

Tahová zkouška byla prováděna na stroji Autograph AGS-X 50 kN. Vyhodnocování probíhalo pomocí programu Trapezium lite a Microsoft Excel. V programu Trapezium byl nastaven program pro měření tahové zkoušky. Byly zadány rozměry zkušebního tělesa. Zkušební rychlost byla nastavena na 1 mm/min. Po upevnění zkušebního tělesa do čelistí byl přístroj nastaven do základní polohy. Vzorek byl přednapnut. Na stroji byly vynulované počáteční hodnoty prodloužení a byl zpuštěn test. Výsledný záznam zkoušky byl uložen pod názvem čísla vzorku. Výsledky zkoušek byly zapsány do tabulky a z grafu zaznamenané zkoušky byl dopočítán modul pružnosti v tahu.

2. 2. 3 Rázová zkouška

Pomocí FFF tisku bylo připraveno sedm vzorků pro každou konfiguraci. Vzorky byly vytisknuty ve dvou polohách. V jedné na ležato, kdy základnu tvořila stěna o rozměrech 10x65 mm a ve druhé na stojato, kdy základnu tvořila stěna o rozměru 10x10 mm. Tělesa byla podrobena zkoušce na Charpyho kladivu výrobce AWPMA o maximální nárazové energii 5 kPm (asi 49 J). Postupně byly provedeny zkoušky u všech vzorků. Výsledky byly převedeny z kilopondmetrů do joulů pomocí vztahu $1 \text{ kPm} = 9,80665 \text{ J}$, zaneseny do tabulky a byl vytvořen slupcový graf.

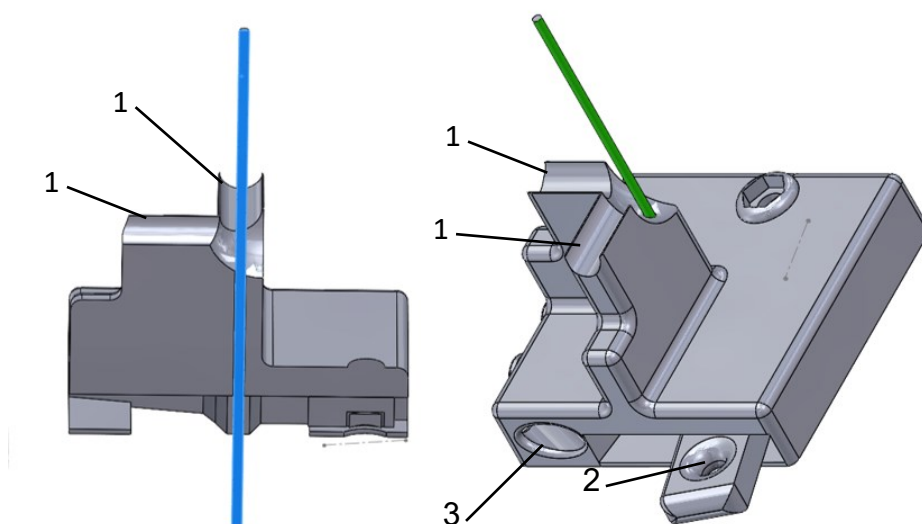
3 Praktická část

3.1 Ovalita filamentu

Pro základní zhodnocení kvality výroby byl zvolen parametr nazývaný ovalita, který vyjadřuje odchylku oproti ideálnímu kruhu.

3.1.1 Výroba nástavce na mikrometr

Pro měření ovality je zapotřebí zajistit měření průměrů, které na sebe navazují v úhlu 90° . Pro toto byl navrhnut a vyroben držák filamentu s podporou pro umístění mikrometru. Úkolem držáku bylo zajistit uchycení filamentu bez způsobení další deformace a jeho zajištění proti rotaci. Návrh držáku vytvořeného pomocí programu SolidWorks je na obrázku 3.1.



Obrázek 3.1: Vizualizace držáku filamentu.

Na obrázku je zeleně a modře znázorněn provlečený filament. V levo je umístěn řez držákem, vpravo vizualizace celého držáku s provlečeným filamentem. Na obrázku jsou pod číslem 1 označena místa s půlkruhovým výřezem pro umístění mikrometru. Tyto zářezy svírají úhel 90° . Číslem 2 je označena páka zajišťující filament proti posuvu a rotaci. Přítlačná síla byla zajištěna pomocí gumičky zajištěné v otvoru páky a provlečené a zajištěné otvorem označeným na obrázku číslem 3. Pro posunutí filamentu je vždy nutné odtlačit páku pro povolení sevření.

Postupným posuvem filamentu byly zajištěny body pro měření jednotlivých kolmých os v rovině řezu filamentem.

3. 1. 2 Výsledky zkoušky ovality

U filamentů byly měřeny vždy dva průměry. Z měření byl vypočítán průměr hodnoty pomocí upraveného vzorce pro ovalitu:

$$O = \frac{2|(a - b)|}{a + b}$$

Kde a a b vyjadřují naměřené průměry. Byla přidána absolutní hodnota, pro zajištění kladného výsledku. [27]

V původním vzorci platila podmínka: a je větší z naměřených průměrů. Z naměřených rozměrů byl vypočítán obsah elipsy, který byl porovnán s obsahem pravidelného kruhu o průměru 1,75 mm ($S = 2,405 \text{ mm}^2$) a byl stanoven relativní obsah filamentu proti této hodnotě. Výsledné hodnoty i s odchylkami měření byly zapsány do tabulky 3.1.

Tabulka 3.1: Výsledky měření ovality filamentů a z nich vypočtená ovalita a relativní obsah vůči ideálnímu filamentu. Hodnoty včetně odchylky měření.

Výrobce	Průměr a (mm) Průměr b (mm)	Ovalita (%)	Obsah elipsy (mm^2)	Relativní obsah (%)
Aurapol	$1,7413 \pm 0,0007$	$0,31 \pm$	$2,381 \pm$	$98,99 \pm$
	$1,7410 \pm 0,0010$	0,03	0,003	0,09
PM	$1,7480 \pm 0,0010$	$1,10 \pm$	$2,420 \pm$	$100,40 \pm$
	$1,7590 \pm 0,0080$	0,40	0,020	0,50
Prusa	$1,7473 \pm 0,0005$	$0,21 \pm$	$2,398 \pm$	$99,70 \pm$
	$1,7473 \pm 0,0006$	0,02	0,001	0,05

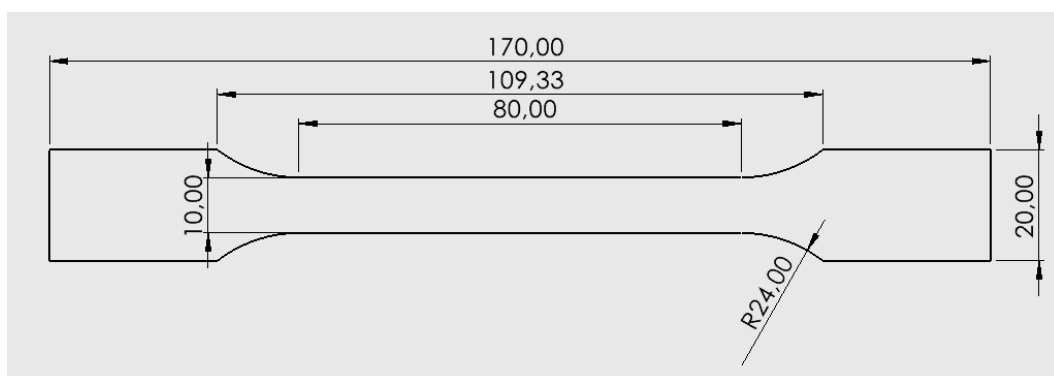
Vzorek Aurapol vykazoval ovalitu $0,31 \pm 0,03$ %. Tato hodnota se příliš neliší od materiálu Prusa, který dosahoval ovalitu $0,21 \pm 0,02$ %. Materiál Prusa dosahoval nejpravidelnějšího tvaru. Nejvyšší ovality dosahoval materiál PM, který dosahoval ovality $1,1 \pm 0,4$ %. Materiál Aurapol dosahoval průměrného průřezového obsahu $2,381 \pm 0,003 \text{ mm}^2$, to představuje $98,99 \pm 0,09$ % průřezu ideálního kruhu o průměru 1,75 mm, do tiskové trysky se dostává méně materiálu, než kolik je udáno

v tiskovém programu. Průřezový obsah materiálu Prusa je průměrně $2,398 \pm 0,001 \text{ mm}^2$, jeho relativní obsah tvořil $99,70 \pm 0,05 \%$ ideálního filamentu. Při tisku je trysce dodáváno méně materiálu, než kolik je vypočteno programem. U materiálu PM je průměrný průřezový obsah filamentu $2,42 \pm 0,02 \text{ mm}^2$. Při přepočtu na relativní obsah oproti ideálnímu filamentu dosahuje hodnota $100,4 \pm 0,5 \%$, do tisku je dodáváno více materiálu, než kolik je vypočteno tiskovým programem.

3. 2 Pevnost v tahu

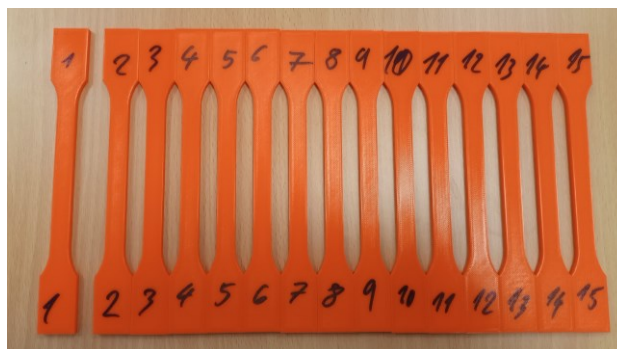
3. 2. 1 Výroba zkušebních vzorků

Pro tahovou zkoušku byla pomocí CAD programu vymodelována a následně pomocí 3D tiskárny vytisknuta zkušební tělesa dle normy ČSN EN ISO 527- 1. Na obrázku 3.2 je náčrt zkušebního tělesa podle normy. Rozměry jsou udávány v milimetrech. Tloušťka zkušebního tělesa je 4 mm.



Obrázek 3.2: Schéma zkušebního tělesa včetně rozměrů v mm.

Bylo zhotoveno 15 zkušebních vzorků pro každou kombinaci materiálu a tiskových parametrů výplně. Byly zvoleny 2 tiskové konfigurace. Vzorky byly tisknuté na ležato, pomocí 22 perimetrů, dále zvané jako konfigurace perimetr, nebo pomocí dvou perimetrů a 100% příčné výplně, dále zvané jen jako konfigurace výplň. Celkem bylo vyrobeno 90 zkušebních těles. Na obrázku 3.3 se nachází jedna testovací sada materiálu Prusa. Vzorky jsou očíslovány.



Obrázek 3.3: Vzorky pro tahovou zkoušku materiál Prusament.

Při testování byly porovnávány jednotlivé materiály a vliv způsobu tisku na výslednou pevnost.

3. 2. 2 Výsledky tahové zkoušky

Vytisknuté vzorky všech materiálů byly podrobeny tahové zkoušce. Při zkoušce byla zkoumána pevnost v tahu, tažnost a modul pružnosti v tahu. Výsledné hodnoty jsou uvedeny v tabulce 3.2 a tabulce 3.3.

Tabulka 3.2: Perimetr: Hodnoty meze pevnosti (σ), tažnosti (ε) a modulu pružnosti v tahu (E), včetně odchylek měření.

Výrobce	σ (MPa)	E (GPa)	ε (%)
Aurapol	$35,0 \pm 0,9$	$2,17 \pm 0,01$	$1,95 \pm 0,05$
PM	$48,6 \pm 0,8$	$2,50 \pm 0,02$	$2,49 \pm 0,04$
Prusa	$26,0 \pm 1,0$	$2,26 \pm 0,04$	$1,46 \pm 0,09$

Filament PM při měření vykazuje pevnost v tahu $48,6 \pm 0,8$ MPa, tato hodnota se nejvíce blíží tabulkové hodnotě (59 MPa). Jako druhý nejpevnější se jeví Aurapol, který dosahuje pevnosti v tahu $35,0 \pm 0,9$ MPa. Při testech dosahoval nejnižší pevnosti v tahu materiál Prusa, který dosahoval pevnosti v průměru pouze 26 ± 1 MPa. U všech měřených vzorků byla hodnota modulu pružnosti výrazně nižší než je tabulková hodnota (3,5 GPa). Nejvyšší modul pružnosti byl zjištěn u materiálu PM ($2,50 \pm 0,02$ GPa). Druhé a třetí pořadí je oproti pevnosti v tahu opačné, kdy jako druhý nejvyšší modul pružnosti byl zjištěn u materiálu Prusa ($2,26 \pm 0,4$ GPa). Nejnižší hodnota modulu pružnosti byla zjištěna u materiálu

Aurapol ($2,17 \pm 0,01$ GPa). U tažnosti pozorujeme stejné pořadí jako u pevnosti. Nejvyšší tažnosti dosahovaly vzorky vyrobené z materiálu PM.

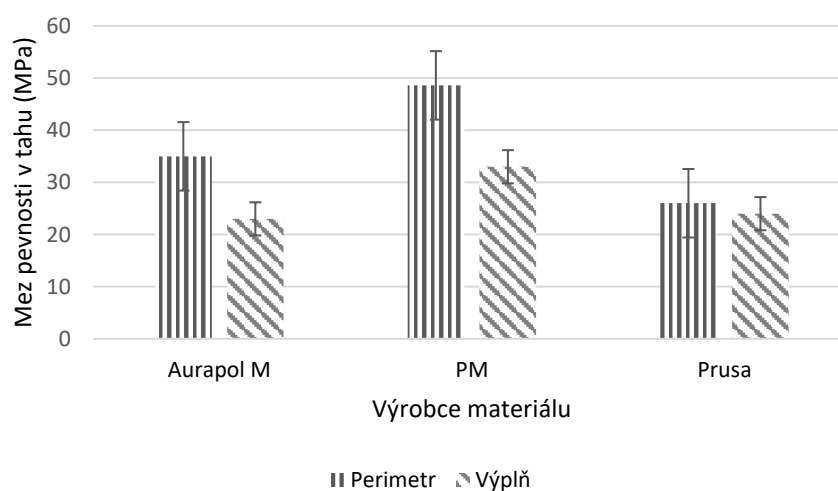
Tabulka 3.3: Výplň: Hodnoty meze pevnosti (σ), modulu pružnosti v tahu (E) a tažnosti (ε) a včetně odchylek měření.

Výrobce	σ (MPa)	E (GPa)	ε (%)
Aurapol	23 ± 1	$2,17 \pm 0,02$	$4,90 \pm 0,10$
PM	33 ± 2	$2,64 \pm 0,02$	$2,90 \pm 0,10$
Prusa	24 ± 1	$2,26 \pm 0,03$	$3,79 \pm 0,07$

Nejvyšší hodnoty dosahoval opět materiál PM, jehož pevnost v tahu byla 33 ± 2 MPa. Na druhém a třetím místě byla zaznamenána zněna, kdy jako druhý je filament Prusa (24 ± 1 MPa) a jako třetí skončil filament Aurapol, který dosáhl pevnosti v tahu (23 ± 1 MPa). Naměřené hodnoty meze pevnosti v tahu a modulu pružnosti jsou nižší, než tabulkové hodnoty. U vypočtených hodnot modulu pružnosti pro jednotlivé materiály je shodný výsledek pro obě tiskové konfigurace u materiálu Aurapol a u materiálu Prusa. U materiálu PM se vypočtené hodnoty modulu pružnosti u tiskových konfigurací liší.

3. 2. 3 Porovnání výsledků tahové zkoušky pro tiskové konfigurace

Z naměřených hodnot pevnosti v tahu, pro konfigurace tisku výplně a perimetru, byl sestrojen sloupkový graf.



Graf 3.1: Graf meze pevnosti v tahu v závislosti na výrobci a tiskové konfiguraci.

Z grafu je vyplývá, že vzorky vytisknuté konfigurací perimetr bylo dosaženo vyšší meze pevnosti. U výrobce Aurapol byla naměřena pevnost v tahu pro tisk výplně 66% oproti tisku pomocí perimetrů. U výrobce PM byla pevnost v tahu u výplně 67%. U materiálu Prusa se meze pevnosti u konfigurace perimetr a výplň výrazně neliší. Konfigurace výplně zde dosahuje 92 % pevnosti konfigurace perimetr.

Při pohledu na graf 3.1 je možné vidět výrazný rozdíl v pevnosti mezi materiálem PM a materiálem Prusa. Při testování materiálu Prusa v konfiguraci perimetr docházelo k jevu narušujícímu měření. Při tahové zkoušce docházelo k oddělování jednotlivých perimetrů a k přetržení vzorku nedocházelo ve zúžené části.

Na obrázcích 3.4 a 3.5 jsou fotografie vzorků po tahové zkoušce, na kterých je možno pozorovat obvyklé místo přetržení, které se nachází na zúžené části. Na obrázku 3.6 jsou vyfoceny vzorky materiálu Prusa konfigurace perimetr. U těchto vzorků bylo během zkoušky pozorováno oddělování jednotlivých perimetrů, které je vidět na obrázcích 3.7 a 3.8. Na obrázku 3.7 jsou patrné jednotlivé praskliny a vzniklé mezery mezi perimetry. Na obrázku 3.8 je vidět lomová struktura typická pro vzorky materiálu Prusa při tiskové konfiguraci perimetr.



Obrázek 3.4: Vzorky konfigurace výplň po tahové zkoušce.



Obrázek 3.5: Vzorky konfigurace perimetr, materiál Aurapol po tahové zkoušce.



Obrázek 3.6: Vzorky konfigurace perimetr, materiál Prusa po tahové zkoušce.

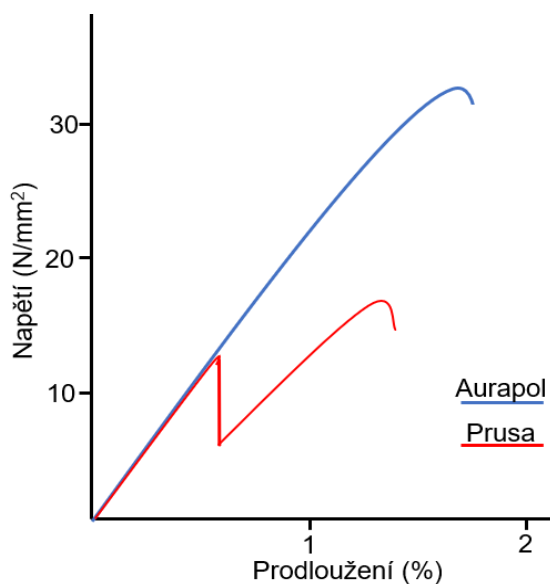


Obrázek 3.7: Přiblížený vzorek 14 z obrázku 3.4.



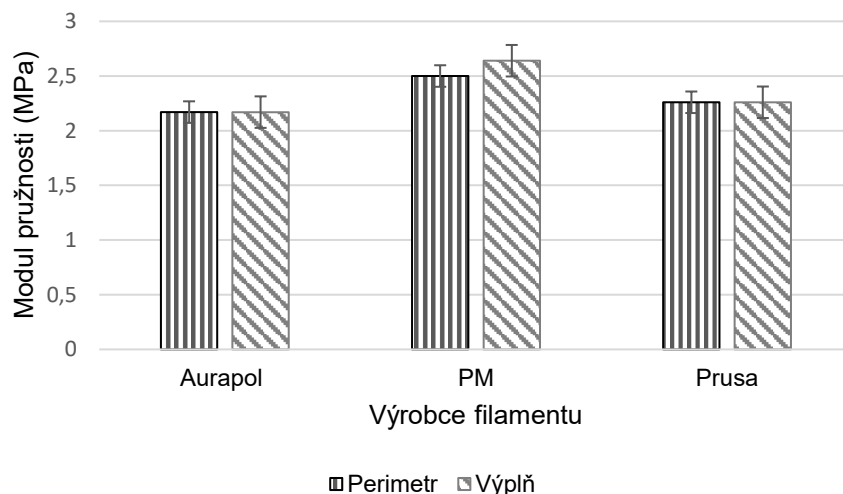
Obrázek 3.8: Přibližný vzorek 10 z obrázku 3.4.

Toto chování bylo patrné i na grafu tahové zkoušky, který byl překreslen do grafu 3.2. V tomto grafu jsou vyobrazeny průběhy tahových zkoušek pro vzorky tiskové konfigurace perimetr. Jedná se o zkoušky vzorků číslo 5 materiálu Aurapol a vzorku číslo 10 materiálu Prusa. U materiálu prusa je vidět náhlý pokles hodnoty napětí podobný kluzu. K tomuto došlo ve chvíli oddělení perimetrů.



Graf 3.2: Průběh tahové zkoušky materiálu Prusa a Aurapol.

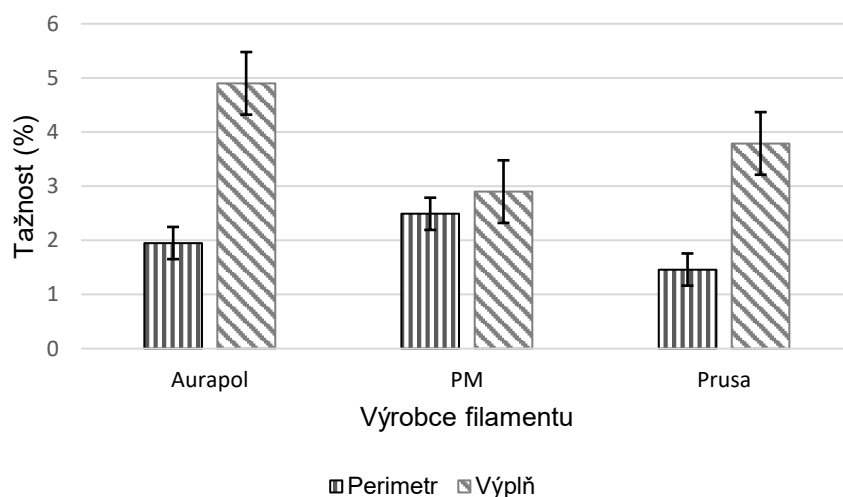
Z hodnot modulu pružnosti pro jednotlivé výrobce, pro konfigurace tisku výplně a perimetru, byl sestrojen sloupcový graf 3.2.



Graf 3.3: Graf modulu pružnosti v závislosti na výrobci a tiskové konfiguraci.

Z výsledků v tabulkách 3.3 a 3.4 a grafu modulu pružnosti je modul pružnosti u výrobců Aurapol a Prusa stejný u obou tiskových konfigurací. U materiálu PM je vidět mírný nárůst u konfigurace výplň oproti konfiguraci perimetr. Byl pozorován 6% nárůst.

Z naměřených hodnot pevnosti v tahu, pro konfigurace tisku výplně a perimetru, byl sestrojen sloupcový graf.



Graf 3.4: Graf pevnosti v závislosti na výrobci a tiskové konfiguraci.

Z grafu je možné vyčíst, že vzorky vytisknuté konfigurací výplň bylo dosaženo vyšší tažnosti. U výrobce Aurapol byla naměřena tažnost konfigurace perimetr 40%

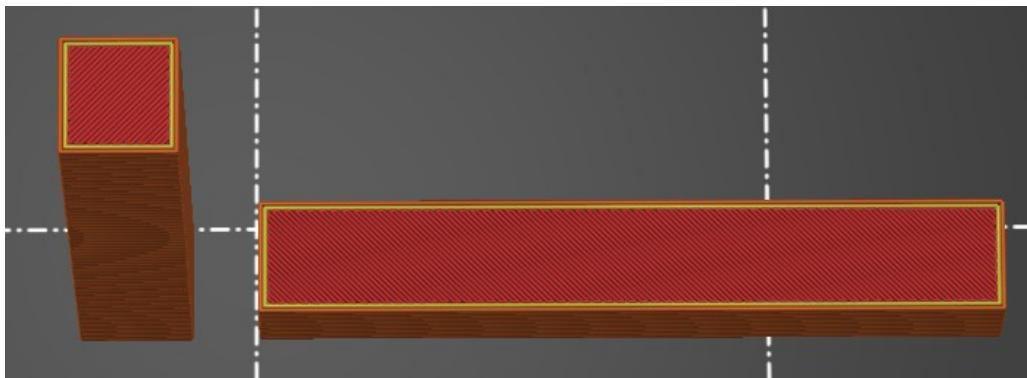
oproti tisku konfigurací výplň. U výrobce PM byla naměřena tažnost u perimetru 85% oproti výplni. U materiálu Prusa byla tažnost konfigurace perimetr naměřena 39% oproti výplni.

V grafu 3.4 jsou vidět největší rozdíly mezi výrobcí a konfiguracemi. Rozdíl mezi nejvyšší naměřenou hodnotou u Aurapolu tisknutého pomocí konfigurave výplň a nejnižší hodnoty konfigurace perimere pro materiál Prusa je možné pozorovat víc, než 60% pokles tažnosti.

3. 3 Rázová houževnatost

3. 3. 1 Výroba vzorků

Pro zkoušku rázové houževnatosti byly podle normy ČSN EN ISO 179-2 vymodelovány a následně pomocí 3D tisku vyrobeny vzorky. Vzorky měly podobu hranolů bez vrubu o rozměrech 10x10x65 mm. Byly zvoleny 2 konfigurace tisku. U obou byl zvolen tisk pomocí dvou perimetrů a 100% příčné výplně. Výška vrstvy byla zvolena 0,2 mm. Rozdíl byl v umístění stěny hranolu na podložce. Názorně ukázáno na obrázku 3.9.



Obrázek 3.9: Konfigurace vzorků pro rázovou zkoušku.

Na obrázku je vidět vizualizace před tiskem, kde žlutá a oranžová znázorňují perimetry a červená znázorňuje výplň. Rozdíl mezi jednotlivými konfiguracemi je velikost jedné vrstvy. U stojatého tisku je velikost jedné vrstvy 10x10x0,2 mm a síla při zkoušce působí mezi jednotlivé vrstvy. U ležatého tisku je rozměr jedné vrstvy 10x65x0,2 mm a síla při zkoušce bude působit skrz všechny vrstvy. Ležatý vzorek byl při zkoušce v Charpyho kladivu umístěn ve stejné poloze, ve které byl tisknut.

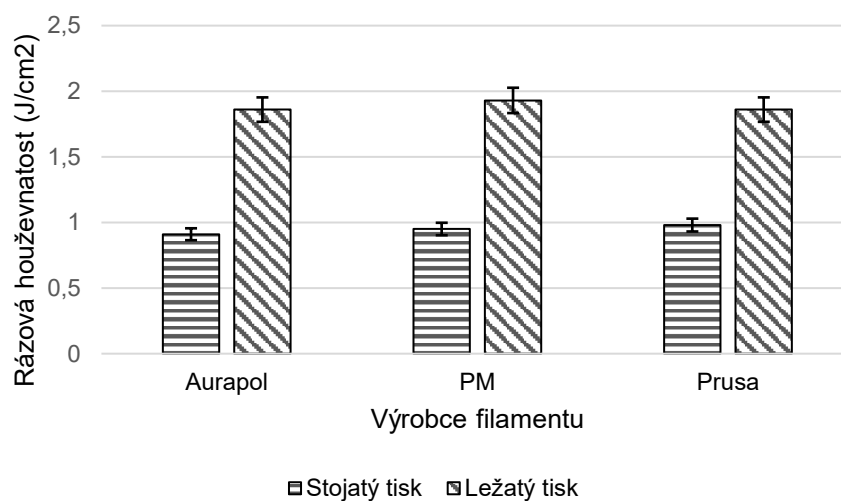
3. 3. 1 výsledky rázových zkoušek

U všech vzorků byla provedena rázová zkouška a výsledné hodnoty byly zaneseny to tabulky 3.4.

Tabulka 3.4: Výsledky zkoušek rázové houževnatosti.

Výrobce	Stojatý tisk (J/cm ²)	Ležatý tisk (J/cm ²)
Aurapol	0,91 ± 0,02	1,86 ± 0,02
PM	0,95 ± 0,03	1,93 ± 0,04
Prusa	0,98 ± 0,03	1,86 ± 0,03

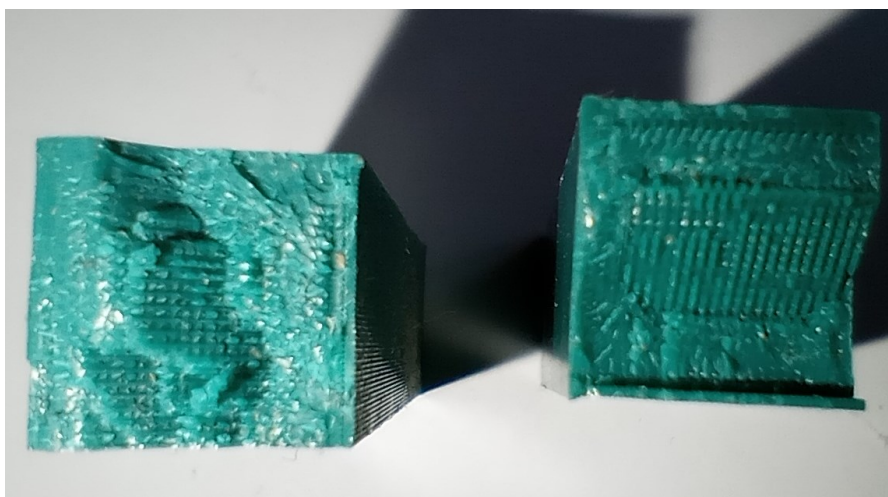
U stojatého tisku u materiálu Prusa byly naměřeny nejvyšší hodnoty rázové houževnatosti ($0,98 \pm 0,03 \text{ J/cm}^2$), u ležatého tisku byla naměřena průměrná hodnota rázové houževnatosti $1,86 \pm 0,03 \text{ J/cm}^2$. U vzorku Aurapol byly nameřeny nejnižší hodnoty rázové houževnatosti. Byla naměřená průměrná hodnota u stojatého tisku $0,91 \pm 0,02 \text{ J/cm}^2$ a u ležatého tisku byla naměřena hodnota $1,86 \pm 0,02 \text{ J/cm}^2$. Tato hodnota je stejná jako u výrobce Prusa. U výrobce PM byla naměřená hodnota druhá nejvyšší u stojatého tisku ($0,95 \pm 0,03 \text{ J/cm}^2$) a u ležatého tisku byly naměřené hodnoty nejvyšší ($1,93 \pm 0,04 \text{ J/cm}^2$). Z těchto hodnot byl pro další porovnání sestrojen graf 3.5.



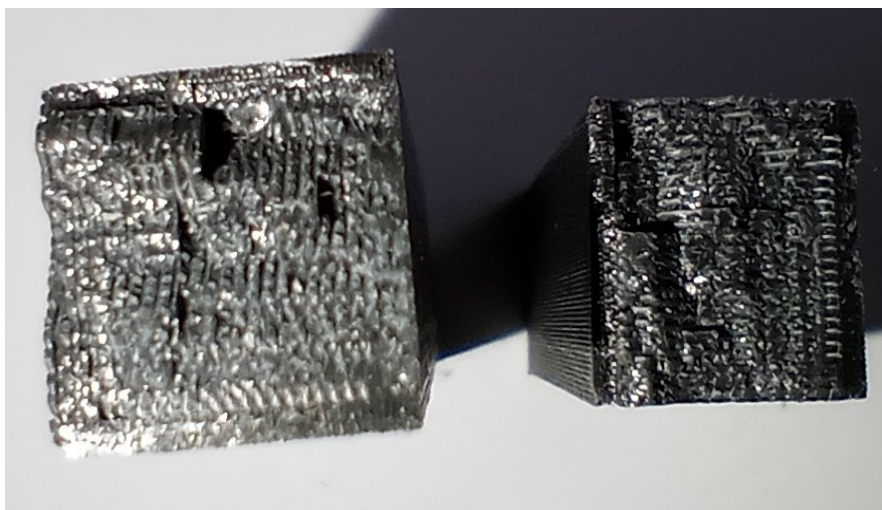
Graf 3.5: Graf pevnosti v závislosti na výrobci a tiskové konfiguraci.

Z grafu lze vyčíst podobnost mezi hodnotami jednotlivých měření. Z grafického srovnání není u stojatých tisků vidět znatelný rozdíl. Ten není na první pohled viditelný u jednotlivých ležatých tisků. U výrobce Aurapol je naměřená průměrná hodnota rázové houževnatosti u stojatého nižší o 49 % oproti ležatému tisku. U výrobce PM byla naměřena hodnota rázové houževnatosti nižší u stojatého tisku oproti ležatému o 51 %. U výrobce Prusa byla naměřená hodnota u stojatého tisku nižší o 47 % než u ležatého tisku.

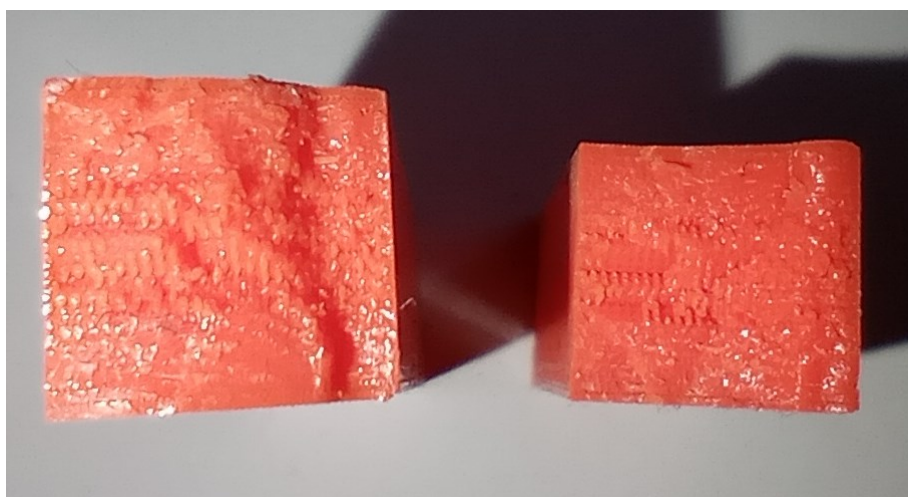
U jednotlivých materiálů byly zkoumané lomové struktury, které jsou vyfotografované na obrázcích 3.10, 3.11, 3.12, 3.13 a 3.14. Na obrázcích 3.10, 3.11 a 3.12 se nachází lomové struktury ležatých tisků materiálů Aurapol (modrý), PM (šedivý) a Prusa (oranžový). U všech materiálů pozorujeme podobné chování a vzhled lomové struktury. Lom je nepravidelný, není v jedné rovině, a jsou na něm viditelné jednotlivé tiskové vrstvy.



Obrázek 3.10: Lomová struktura materiálu Aurapol, ležatý tisk.



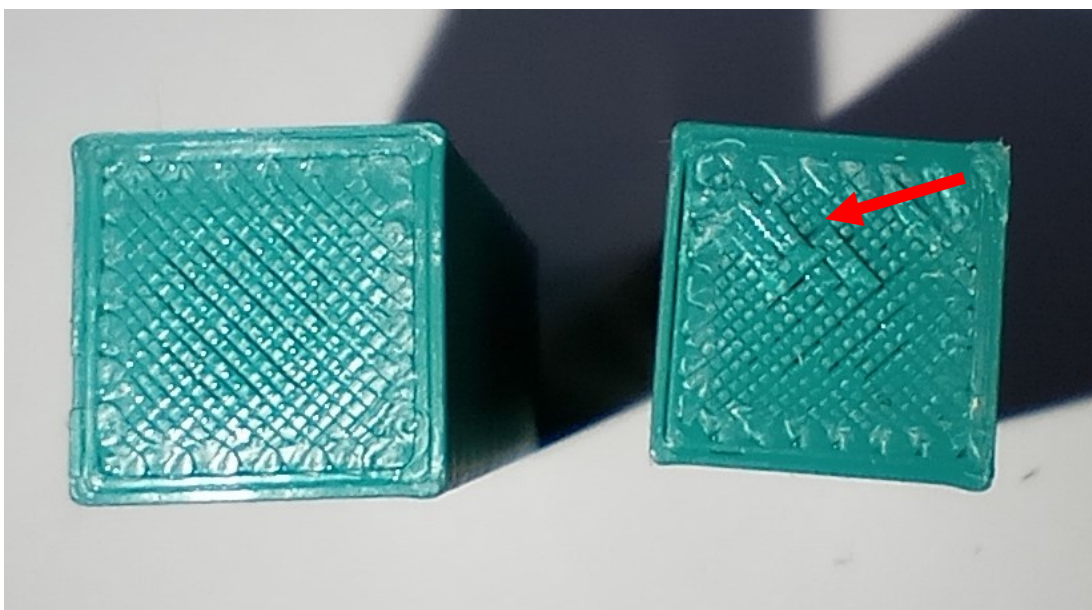
Obrázek 3.11: Lomová struktura materiálu PM, ležatý tisk.



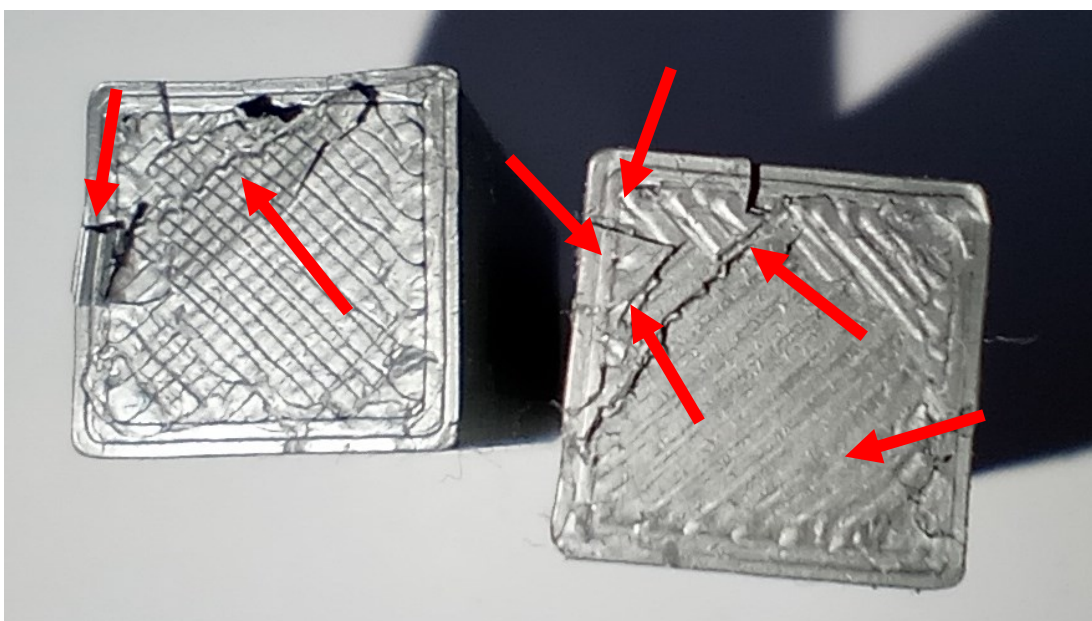
Obrázek 3.12: Lomová struktura materiálu PM, ležatý tisk.

Na obrázcích 3.13 a 3.14 jsou vyfocené lomové struktury u materiálu Aurapol a materiálu PM. Materiál Aurapol zde prezentuje lomové struktury pro materiály Aurapol a Prusa, které vykazovaly stejné chování v lomové struktrě ve vrstvě. U materiálu Aurapol je vidět hladká lomová struktura v jedné tiskové vrstvě. Vyjíměčně se vyskytovaly drobné úlomky, které náležely další tiskové vrstvě. Na obrázku 3.13 jsou tyto úlomky zvýrazněné červenou šipkou. Na fotografii je na levém vzorku vidět struktura připomínající síť. Ta je způsobena vzniklými vzduchovými mezerami. U materiálu PM bylo u stojatého tisku pozorované odlišné chování lomové struktury ve vrstvě. U lomových struktur se vyskytovaly zbytky dalších vrstev, ale v jiné podobě než u výrobců Aurapola a Prusa. U výrobce PM nevznikala hladká lomová struktura, vedena přes jednu tiskovou vrstvu. Na

struktuře je patrné, že lom procházel skrz více tiskových vrstev najednou. Na obrázku 3.14 jsou pomocí červených šipek zvýrazněny jednotlivé vrstvy. Na vzorku vlevo jsou vyznačeny pomocí šipek odloupnuté části tiskové vrstvy, které jsou stále připojené ke zbytku vrstvy. Na pravém vzorku jsou pomocí šipek zvýrazněny jednotlivé tiskové vrstvy v lomové struktuře. Na vzorku je vyznačeno pět tiskových vrstev.



Obrázek 3.13: Lomová struktura materiálu Aurapol, stojatý tisk.



Obrázek 3.14: Lomová struktura materiálu PM, stojatý tisk.

3.4 Vliv barviv na mechanické vlastnosti

Na závěr byl získán filament od firmy Aurapol v neutrální barvě, to je materiál do kterého nebyly přidány žádné další barevné složky. Z materiálu byly provedeny všechny zkoušky, které byly prováděny na všech barevných filamentech. Byly provedeny zkoušky ovality, tahové zkoušky a zkoušky rázové houževnatosti. Zkoušky byly provedeny za stejných podmínek. Výsledky zkoušek byly následně porovnávány s výsledky filamentu Aurapom Machine blue. Výsledky pro všechny zkoušky byly zaneseny do tabulky 3.5.

Tabulka 3.5: Porovnání výsledků zkoušek materiálu výrobce Aurapol

Zkouška	Aurapol Modrý	Aurapol Neutrální
Průměr A (mm)	$1,7413 \pm 0,0007$	$1,7417 \pm 0,0007$
Průměr B (mm)	$1,741 \pm 0,001$	$1,7402 \pm 0,0009$
Ovalita (%)	$0,31 \pm 0,03$	$0,43 \pm 0,04$
Obsah elipsy (mm ²)	$2,381 \pm 0,003$	$2,380 \pm 0,002$
Relativní obsah (%)	$98,99 \pm 0,09$	$98,96 \pm 0,07$
Pevnost v tahu (perimetr) (MPa)	$35,0 \pm 0,9$	31 ± 1
Pevnost v tahu (výplň) (MPa)	23 ± 1	29 ± 1
Modul pružnosti (perimetr) (GPa)	$2,17 \pm 0,01$	$2,34 \pm 0,02$
Modul pružnosti (výplň) (GPa)	$2,17 \pm 0,02$	$2,28 \pm 0,02$
Tažnost (perimetr) (%)	$1,95 \pm 0,05$	$1,52 \pm 0,06$
Tažnost (výplň) (%)	$4,9 \pm 0,1$	$3,57 \pm 0,10$
Rázová houževnatost (stojatý tisk) (J/cm ²)	$0,91 \pm 0,02$	$0,91 \pm 0,3$
Rázová houževnatost (ležatý tisk) (J/cm ²)	$1,86 \pm 0,02$	$1,82 \pm 0,2$

Materiál od firmy Aurapol v neutrální barvě dosahoval ovality $0,43 \pm 0,04$ což představovalo nárůst oproti modrému vzorku o 39%. Průřezový obsah elipsy byl průměrně $2,380 \pm 0,002 \text{ mm}^2$, z toho vypočtený relativní obsah oproti filamentu ideálního kruhového průřezu byl $98,96 \pm 0,07 \%$, průřez a obsah byl oproti

modrému vzorku nižší o 0,04 %. Pevnost v tahu byla u konfigurace perimetr 31 ± 1 MPa, to představuje 11% pokles pevnosti oproti modrému vzorku. Pevnost u konfigurace výplň byla naměřena pevnost v tahu v průměru 29 ± 1 což představuje 26% nárůst. Modul pružnosti byl pro tiskovou konfiguraci perimetr naměřen $2,34 \pm 0,02$ GPa, to představuje nárůst 7,8 % oproti modrému vzorku. U konfigurace výplň byla naměřena hodnota modulu pružnosti $2,28 \pm 0,02$ GPa, to představuje 5% nárůst oproti modrému vzorku. Tažnost u vzorků neutrální barvy byla u konfigurace perimetr naměřena $1,52 \pm 0,06$ %, to představuje 23% pokles hodnoty oproti modrému vzorku. U konfigurace výplň byla naměřena tažnost $3,57 \pm 0,10$ %, to představuje 28% pokles hodnoty. Při zkoušce rázové houževnatosti byla naměřena pro konfiguraci stojatý tisk hodnota $0,91 \pm 0,3$ J/cm², tato hodnota je stejná jako pro modrý vzorek. Pro konfiguraci tisk v leže byla naměřena hodnota rázové houževnatosti $1,82 \pm 0,2$ J/cm², to představuje 2% pokles hodnoty naměřené pro modrý vzorek.

Diskuse

V tabulce 3.1 jsou zapsány výsledky měření ovality. Nejvyšší hodnoty dosahoval materiál PM ($1,1 \pm 0,4 \%$), který vykazoval během měření nejvyšší odchylky v maximálních hodnotách. Naopak nejmenší ovality dosahoval materiál Prusa ($0,21 \pm 0,02 \%$). Ovalita je nenulová, přestože v tabulce jsou pro oba průměry stejné hodnoty. Konečný výsledek ovality, zapsaný do tabulky 3.1, je aritmetickým průměrem všech vypočtených ovalit na měřených rozměrech a a b, které se nacházely vždy v jedné rovině řezu. U materiálu Aurapol byla naměřena ovalita $0,31 \pm 0,03 \%$, tato hodnota se výrazně neliší od materiálu Prusa. Při výpočtu, kolik materiálu se dostává do tiskové trysky, bylo pro dodané vzorky materiálu zjištěno, že u vzorků Aurapol a Prusa je do tisku dodáváno méně materiálu, než je naprogramováno v řídicí jednotce a u materiálu PM je dodáváno více materiálu než je naprogramováno. Jedná se o množství, které by se u malého tisku dalo zanedbat, ale při tiscích o větším celkovém objemu by toto množství mohlo způsobovat nevyžádané chyby tisku. U materiálu Prusa by mohlo docházet ke vzniku vzduchových mezer mezi tiskovými prameny a k jejich slabšímu prolepení. U materiálu PM by ke vzniku takových vzduchových mezer nemuselo docházet v takové míře. Mohl by vzniknout problém při plánování tisku větších rozměrů, kdy by bylo z cívky použito více materiálu, než je vypočteno pomocí programu slicer. Dalším problémem vyskytujícím se při tisku, by mohl být rozměr konečného výrobku, kdy by při tisku, kde je požadována vysoká přesnost rozměru, byl výrobek větší. Naopak pozitivní vliv by mohl být na mechanické vlastnosti, kdy by mohlo docházet k lepšímu vzájemnému prolepení jednotlivých tiskových pramenů.

Problémem u této zkoušky by mohl být nedostatek dat. Pro přesné určení bylo potřeba sestavit průřez filamentem a z něj určit kolmice na kterých by se odečetly hodnoty průměrů.

Při realizaci tahové zkoušky bylo nejdříve potřeba navrhnout a vyrobit zkušební tělesa. Tělesa byla rozměrově navržena podle příslušné normy. Pro tisk vzorků byla vybrána jedna školní tiskárna, na které se tiskly všechny vzorky. Byl zvolen jeden tiskový profil pro všechny vzorky. Teploty přednastaveného tiskového profilu, který byl naprogramován výrobcem tiskárky, splňovaly teplotní rozmezí všech filamentů. Na podložku bylo naprogramováno pět vzorků a připravené Gcode, zvláště pro konfigurace perimetr a výplň, byly umístěny na flash disc. Tisk

vzorků se opakoval za použití stejného tiskového programu. Po dokončení všech vzorků z jednoho materiálu byl materiál vyměněn za další. Mezi tisky byla podložka vždy očištěna izopropylalkoholem, pro správnou přilnavost první vrstvy tisku. Při tisku bylo pozorováno zvláštní chování materiálů Prusa a Aurapol. Při přípravě vzorků v tiskové konfiguraci perimetr docházelo k viditelným chybám tisku. Kdy byly mezi jednotlivými perimetry pozorovatelné vzduchové mezery, které se u ostatních vzorků nevyskytovaly. Pro zachování podmínek pro testy se tiskový program dále nijak neupravoval.

Výsledky tahových zkoušek byly zapsány do tabulek 3.2 a 3.3. z výsledků je patrné, že nejvyšší pevnosti v tahu pro obě tiskové konfigurace dosahoval materiál PM. Žádný ze zkoušených materiálů nedosahoval tabulkových hodnot. U zkoušky pevnosti v tahu nebyl pozorován u tiskové konfigurace výplň výrazný rozdíl mezi materiály Prusa a Aurapol. Výraznější rozdíl hodnoty pevnosti v tahu byl pozorován u konfigurace perimetr, kdy materiál Prusa měl výrazně nejnižší hodnotu pevnosti v tahu i proti vzorku Aurapol, se kterým má velice podobnou pevnost v tahu pro konfiguraci výplň. Bylo by možné předpokládat, že by oba výrobci měli mít i další hodnoty podobné.

Během tahové zkoušky docházelo ke standardnímu chování u většiny materiálů i konfigurací. Nestandardní chování, při zkoušce tahem, vykazovaly vzorky materiálu Prusa v tiskové konfiguraci perimetr. Při umísťování do čelistí zkušebního přístroje bylo nutné dbát zvýšené opatrnosti. U některých vzorků docházelo k oddělení prvních perimetrů už při kalibraci přístroje. Při samotné zkoušce se projevilo oddělování a praskání jednotlivých perimetrů. Na grafu průběhu zkoušky se toto chování projevilo jako kluz. Materiál Aurapol vykazoval během tisku stejné chyby, ale při tahové zkoušce se choval standardně. Podobná chyba tisku by mohla vycházet z dříve zmíněné ovality a množství materiálu dodávaného do tiskové trysky, kdy nemuselo dojít tak pevnému prolepení jako u materiálu PM. Dodání vadné cívky ze strany výrobce Prusa, bylo vzhledem k jeho výstupní kontrole a dodávání rozměrové dokumentace průměru měřené pomocí laserového měření, vyloučeno.

Při výrobě vzorků pro rázovou zkoušku nebyl patrný žádný rozdíl v chování jednotlivých filamentů. Pro zjednodušení výpočtů byl zvolen základní rozměr vzorků 10x10 mm. Výsledky rázové zkoušky byly zaneseny do tabulky 3.4.

Vzorky, které se tiskly na ležato vykazovaly asi dvojnásobnou hodnotu rázové houževnatosti. Z toho vyplývá, že oddělit jednotlivé vrstvy je jednodušší, než se snažit lom provést skrze více vrstev najednou.

Vzorky byly po rázové zkoušce dále zkoumány. Byla zkoumána lomová struktura u jednotlivých vzorků. U ležatého tisku byl úder veden postupně skrz dva perimetry, 100% výplň pomocí příčných pramenů a nakonec dvěma perimetry. Lomové struktury byly u všech výrobců totožné. Rozdílná podoba lomových struktur se vyskytovala u tisku zkušebních vzorků tisknutých na výšku. U vzorků Prusa a Aurapol docházelo u většiny vzorků ke vzniku hladké lomové struktury. Vyjimečně se zde vyskytovaly drobné úlomky z další tiskové vrstvy. U materiálu PM bylo u většiny vzorků v lomové struktuře pozorováno oddělování více vrstev. Tato skutečnost by mohla být způsobena lepším prolepením samotných tiskových pramenů a následně i lepším prolepením jednotlivých vrstev. Měření by se mohlo zopakovat na přesnějším Charpyho kladivu, které by svým rozsahem bylo vhodnější pro testování plastů.

Z chování při zkoušce tahem a rázové zkoušce vyplývá, že pevnost výrobku nezávisí jen na zvoleném materiálu, ale velikou roli hraje zvolená konfigurace tisku. Při plánování tisku by se mělo dbát na předpokládaný směr namáhání a podle toho zvolit vhodnou tiskovou konfiguraci.

Při porovnání s materiálem bez dalšího dobarvování nedocházelo k přílišným odchylkám. Většina parametrů se od barveného materiálu příliš nelišila a některé hodnoty pro neutrálně barvený vzorek Aurapol se shodovaly se vzorkem Prusa. Z těchto výsledků se dá usuzovat, že barvení filamentu má malý vliv na vlastnosti materiálu. Lze tudíž porovnávat materiály různých barev mezi sebou.

Tabulkových hodnot uvedených v tabulce 1.1. se nepodařilo dosáhnout u žádného z testovaných vzorků. Hlavním rozdílem je zde metoda výroby zkušebních těles, kdy tabulkové hodnoty byly stanoveny pomocí vstřikové metody a vznikly tak homogenní vzorky. U tisku pomocí FFF byly vzorky vyrobeny pomocí postupného lepení tiskových pramenů. Vznikaly tak nehomogenní vzorky, které nemohly dosahovat požadované kvality, jaká vzniká pomocí vstřikolisu.

Při porovnání ceny materiálu nejdražší vzorek Prusa vykazoval nejvyšší kvalitu výroby, kdy měl nejvyšší přesnost rozměrů a nejnižší hodnotu ovality. Nejlevnější materiál od výrobce Aurapol vykazoval podobné mechanické vlastnosti jako nejdražší materiál Prusa, kdy se od sebe příliš nelišila kvalita výroby, měřená

pomocí rozměrů a ovality. Nejlepší mechanické vlastnosti vykazoval materiál PM, který dosahoval nejvyšších výsledků ve všech mechanických testech. Materiál vykazoval nejnižší kvalitu výroby díky nepřesnostem rozměrů a následně nejvyšší ovalitou. Z měření vyplývá, že s vyšší cenou materiálu nemusí přímo souviset kvalita a lepší mechanické vlastnosti.

Závěr

- Byly získány vzorky tiskového materiálu PLA od výrobců Aurapol a Plasty Mladeč a zakoupen vzorek od firmy Prusa research.
- Byla zhodnocena kvalita výroby jednotlivých filamentů měřením ovality.
 - K tomuto účelu byl navržen a sestaven speciální přípravek umožňující provést měření s konzistentní přesností pro všechny vzorky.
 - Nejmenší ovality dosahoval vzorek Prusa research ($0,21 \pm 0,02$ %).
- Byly provedeny zkoušky meze pevnosti v tahu u jednotlivých filamentů.
 - Nejvyšší hodnoty meze pevnosti v tahu dosahovaly vzorky od výrobce Plasty Mladeč. Materiál dosahoval hodnoty $48,6 \pm 0,8$ MPa pro tisk perimetru a 33 ± 2 MPa pro tisk výplně.
 - U filamentu prusa bylo pozorováno oddělování jednotlivých perimetrů při tahové zkoušce.
- Byly provedeny testy pomocí rázové zkoušky.
 - U ležatého tisku byla zjištěna dvojnásobná hodnota rázové houževnatosti oproti stojatému.
 - U stojatého tisku byla pozorována struktura lomu pro materiály Prusa a Aurapol v jedné tiskové vrstvě a pro materiál PM byla pozorována lomová struktura přes několik vrstev.
 - V lomové struktuře vzorků Aurapol a Prusa byly pozorovány vzduchové mezery mezi tiskovými prameny.
- Bylo provedeno porovnání výsledků zkoušek s filamentem neutrální barvy.
 - Výsledky testů měnily statisticky významné rozdíly.
 - Různě barevné filameny lze mezi sebou porovnávat.
- Pro využití ve školství lze konstatovat následující doporučení.
 - Pro běžný tisk je nejvhodnější i z hlediska ceny materiál Aurapol.
 - Pro tisk, u kterého bude vyžadována vyšší pevnost je vhodný materiál PM.
 - Při tisku je nutné zvažovat směr sil působících na výrobek a podle toho zvolit vhodnou tiskovou konfiguraci.

Použitá literatura

- [1] STRÍSESKÝ, Ondřej. Základy 3D tisku s Josefem Průšou. Praha: Prusa Research, 2019.
- [2] PLACEK, Martin. Which 3D printing technologies do you use?. Statista [online]. New York: Statista, 2023 [cit. 2023-07-06]. Dostupné z: <https://www.statista.com/statistics/560304/worldwide-survey-3d-printing-top-technologies/>
- [3] HOMOLA, Jan. Průzkum odhalil, jaké filamenty jsou mezi uživateli 3D tiskáren nejoblíbenější. 3D-tisk.cz [online]. Praha: Nová média, 2018 [cit. 2023-07-06]. Dostupné z: <https://www.3d-tisk.cz/pruzkum-odhalil-jake-filamenty-jsou-mezi-uzivateli-3d-tiskaren-nejoblibenejsi/>
- [4] Prusament PLA. PRUSAMENT [online]. Praha: Prusa Polymers, 2023 [cit. 2023-07-06]. Dostupné z: <https://prusament.com/cs/materials/prusament-pla/>
- [5] PLA - Stříbrná (1,75 mm; 1 kg). Filament PM [online]. Haňovice: Plasty Mladeč, 2023 [cit. 2023-07-06]. Dostupné z: <https://www.filament-pm.cz/pla-stribrna-1-75-mm-1-kg/p78>
- [6] AURAPOL PLA 3D Filament Machine Blue 1 kg 1,75 mm. AURAPOL 3D filament [online]. Šumná: AURAPOL, 2023 [cit. 2023-07-06]. Dostupné z: <https://www.aurapol.com/p/pla-3d-filament-machine-blue-1-kg-1-75-mm-aurapol>
- [7] PHILLIPS, Brennan T., Josh ALLDER, Grady BOLAN, et al. Additive manufacturing aboard a moving vessel at sea using passively stabilized stereolithography (SLA) 3D printing. Additive Manufacturing. 2020, 31. ISSN 22148604. Dostupné z: doi:10.1016/j.addma.2019.100969
- [8] SLA. ČVUT Fakulta strojní [online]. Praha: ČVUT FS, 2014 [cit. 2023-07-06]. Dostupné z: <https://www.fs.cvut.cz/ostatni/sekce-3dtisk/3dtisk/moznosti-3dtisk/rozdeleni-technologie-3dtisk/sla-3dtisk/>
- [9] SLS. ČVUT Fakulta strojní [online]. Praha: ČVUT FS, 2014 [cit. 2023-07-06]. Dostupné z: <https://www.fs.cvut.cz/ostatni/sekce-3dtisk/3dtisk/moznosti-3dtisk/rozdeleni-technologie-3dtisk/sls-3dtisk/>

- [10] FDM. *ČVUT Fakulta strojní* [online]. Praha: ČVUT FS, 2014 [cit. 2023-07-06]. Dostupné z: <https://www.fs.cvut.cz/ostatni/sekce-3dtisk/3dtisk/moznosti-3dtisk/rozdeleni-technologie-3dtisk/fdm-3dtisk/>
- [11] JONES, Rhys, Patrick HAUFÉ, Edward SELLS, Pejman IRAVANI, Vik OLLIVER, Chris PALMER a Adrian BOWYER. RepRap – the replicating rapid prototyper. *Robotica*. 2011, 29(1), 177-191. ISSN 0263-5747. Dostupné z: doi:10.1017/S026357471000069X
- [12] KUN, Krisztián. Reconstruction and Development of a 3D Printer Using FDM Technology. *Procedia Engineering*. 2016, 149, 203-211. ISSN 18777058. Dostupné z: doi:10.1016/j.proeng.2016.06.657
- [13] DESAI, Ashish A., Sagar DNYANDEV PATIL, Pravin H. YADAV a Abhijeet KEKARE. Design, Analysis, and Development of Additive Manufacturing by using FDM Technique with Dual Nozzle Assembly. *Materials Today: Proceedings*. 2023, 77, 619-626. ISSN 22147853. Dostupné z: doi:10.1016/j.matpr.2022.11.010
- [14] ALI, Md. Hazrat, Syuhei KUROKAWA, Essam SHEHAB a Muslim MUKHTARKHANOV. Development of a large-scale multi-extrusion FDM printer, and its challenges. *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*. 2023, 6(2), 198-213. ISSN 25888404. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijlmm.2022.10.001
- [15] MULCAHY, Niall, Kevin J. O'SULLIVAN, Aidan O'SULLIVAN a Leonard O'SULLIVAN. Preliminary assessment on the effects of line width, layer height and orientation on strength and print time for FDM printing of total contact casts for the treatment of diabetic foot ulcers. *Annals of 3D Printed Medicine*. 2023, 11. ISSN 26669641. Dostupné z: doi:10.1016/j.stlm.2023.100115
- [16] MARŞAVINA, Liviu, Cristina VĂLEAN, Mihai MĂRGHITAŞ, Emanoil LINUL, Nima RAZAVI, Filippo BERTO a Roberto BRIGHENTI. Effect of the manufacturing parameters on the tensile and fracture properties of FDM 3D-printed PLA specimens. *Engineering Fracture Mechanics*. 2022, 274. ISSN 00137944. Dostupné z: doi:10.1016/j.engfracmech.2022.108766

- [17] ZHAO, Xuchuan, Wenjie MA, Wurikaixi AIYITI, Ayiguli KASIMU a Ru JIA. Investigation of influence of printing modes on the quality of 6-PSS FDM 3D printed thin-walled parts. Results in Engineering. 2023, 17. ISSN 25901230. Dostupné z: doi:10.1016/j.rineng.2023.100926
- [18] MAURYA, Shreesh, Bharatveer MALIK, Praduman SHARMA, Ajay SINGH a Rupesh CHALISGAONKAR. Investigation of different parameters of cube printed using PLA by FDM 3D printer. Materials Today: Proceedings. 2022, 64, 1217-1222. ISSN 22147853. Dostupné z: doi:10.1016/j.matpr.2022.03.700
- [19] FDM printing diagram.svg. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2018 [cit. 2023-07-06]. Dostupné z: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:FDM_printing_diagram.svg
- [20] MOHAMED, Omar A., Syed H. MASOOD a Jahar L. BHOWMIK. Optimization of fused deposition modeling process parameters: a review of current research and future prospects. Advances in Manufacturing. 2015, 3(1), 42-53. ISSN 2095-3127. Dostupné z: doi:10.1007/s40436-014-0097-7
- [21] CHENG, Yanling, Shaobo DENG, Paul CHEN a Roger RUAN. Polylactic acid (PLA) synthesis and modifications: a review. Frontiers of Chemistry in China. 2009, 4(3), 259-264. ISSN 1673-3495. Dostupné z: doi:10.1007/s11458-009-0092-x
- [22] WU, Xiao, Yunxiao LIU, Haipeng WU, Yongxin DUAN a Jianming ZHANG. Melt-processed poly (L-lactic acid) / cellulose nanocrystals biocomposites for 3D printing: Improved melt processibility and inter-fuse adhesion. Composites Science and Technology. 2022, 218. ISSN 02663538. Dostupné z: doi:10.1016/j.compscitech.2021.109135
- [23] Biodegradable Poly(Lactic Acid): Synthesis, Modification, Processing and Applications. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2010. ISBN 978-3-642-17595-4. Dostupné také z: https://link.springer.com/10.1007/978-3-642-17596-1_3

- [24] BORSKÁ, Katarína, Martin DANKO, a Jaroslav MOSNÁČEK. Fotodegradácia a fotochemické siet'ovanie polylaktidu, Chemické listy, 2014, 108(11), s. 1030–1039. Dostupné z: <http://ww-w.chemicke-listy.cz/ojs3/index.php/chemicke-listy/article/view/434>
- [25] MIDDLETON, John C a Arthur J TIPTON. Synthetic biodegradable polymers as orthopedic devices. Biomaterials. 2000, 21(23), 2335-2346. ISSN 01429612. Dostupné z: doi:10.1016/S0142-9612(00)00101-0
- [26] CHEN, Ye, Tingting LU, Luyao LI, Huiying ZHANG, Huaping WANG a Fuyou KE. Fully biodegradable PLA composite with improved mechanical properties via 3D printing. Materials Letters. 2023, 331. ISSN 0167577X. Dostupné z: doi:10.1016/j.matlet.2022.133543
- [27] LIU, Yafei a Daxin E. Effects of Cross-Sectional Ovalization on Springback and Strain Distribution of Circular Tubes Under Bending. Journal of Materials Engineering and Performance. 2011, 20(9), 1591-1599. ISSN 1059-9495. Dostupné z: doi:10.1007/s11665-010-9813-z