



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

MOŽNOSTI RECYKLACE PLA MATERIÁLU PRO ÚČELY 3D TISKU A VLIV NA MECHANICKÉ VLASTNOSTI

POSSIBILITIES OF PLA MATERIAL RECYCLING FOR 3D PRINTING PURPOSES AND INFLUENCE ON
MECHANICAL PROPERTIES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Vojtěch Sedláček

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Tomáš Koutecký, Ph.D.

BRNO 2020

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav konstruování
Student: **Vojtěch Sedláček**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Tomáš Koutecký, Ph.D.**
Akademický rok: 2019/20

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Možnosti recyklace PLA materiálu pro účely 3D tisku a vliv na mechanické vlastnosti

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

PLA materiál je jeden z nejpoužívanějších materiálů pro 3D tisk, zejména u FFF tiskáren používaných i u koncových uživatelů. Vzhledem k tomu, že u 3D tisku vzniká nemalé množství odpadního materiálu (nepovedené tisky, podpory) a i když je materiál PLA uváděn jako 100 % biodegradabilní, většina odpadu stejně končí na skládkách nebo ve spalovnách spolu s běžným odpadem. Řešením by tedy byla recyklace takového odpadu a jeho znovupoužití pro 3D tisk výrobou filamentu. Otázkou je, jak se mění mechanické vlastnosti materiálu s recyklačními cykly.

Typ práce: výzkumná

Cíle bakalářské práce:

Hlavním cílem práce je posoudit vliv recyklačních cyklů na mechanické vlastnosti za běžných a zvýšených teplot a tisknutelnost dílů vyráběných z materiálu PLA. K výrobě filamentu bude použit extruder NEXT od firmy 3devo.

Dílčí cíle bakalářské práce:

- identifikace stěžejních parametrů ovlivňujících výsledné vlastnosti dílů,
- návrh vzorků pro výrobu a návrh experimentů,
- výroba vzorků a realizace experimentů,
- analýza získaných výsledků, jejich vyhodnocení a vyvození závěrů.

Požadované výstupy: průvodní zpráva.

Rozsah práce: cca 27 000 znaků (15 – 20 stran textu bez obrázků).

Časový plán, struktura práce a šablona průvodní zprávy jsou závazné:

<http://ustavkonstruovani.cz/texty/bakalarske–studium–ukonceni/>

Seznam doporučené literatury:

GEBHARDT, Andreas a Jan-Steffen HOTTER. Additive manufacturing: 3D printing for prototyping and manufacturing. Cincinnati: Hanser Publications, [2016]. ISBN 978-1-56990-582-1.

ANDERSON, Isabelle. Mechanical Properties of Specimens 3D Printed with Virgin and Recycled Polylactic Acid. 3D Printing and Additive Manufacturing [online]. 2017, 4(2), 110-115 [cit. 2019-10-25].

DOI: 10.1089/3dp.2016.0054. ISSN 2329-7662. Dostupné z:

<http://www.liebertpub.com/doi/10.1089/3dp.2016.0054>

PAKKANEN, Jukka, Diego MANFREDI, Paolo MINETOLA a Luca IULIANO. About the Use of Recycled or Biodegradable Filaments for Sustainability of 3D Printing. Sustainable Design and Manufacturing 2017 [online]. Cham: Springer International Publishing, 2017, 2017-04-26, 68, 776-785 [cit. 2019-10-25]. Smart Innovation, Systems and Technologies. DOI: 10.1007/978-3-319-57078-5_73.

ISBN 978-3-319-57077-8. Dostupné z: http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-57078-5_73

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2019/20

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.

ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.

děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá porovnáním mechanických vlastností 3D výtisků PLA v průběhu recyklace. Recyklační cyklus probíhal následovně: vytištěná zkušební tělesa technologii FDM z PLA byla nadrcena a znovu extrudována na filament. Tento proces se třikrát opakoval. V každém cyklu byly otestovány zkušební tělesa. Proběhly tahové zkoušky za pokojové i zvýšené teploty. Zvýsledků je patrné že došlo k mírnému zvýšení pevnosti. Měření indexu toku taveniny prokázalo degradaci materiálu a jeho depolymerizaci.

KLÍČOVÁ SLOVA

3D tisk, recyklace, PLA, tahová zkouška, index toku taveniny

ABSTRACT

This bachelor thesis deals with the comparison of mechanical properties of 3D PLA prints during recycling. The recycling cycle proceeded as follows: the printed FDM test specimens from the PLA were pulverised and re-extruded into a filament. This process was repeated three times. Test specimens were tested in each cycle. Tensile tests were performed at room and elevated temperatures. The results show that there was a slight increase in strength. Measurement of the melt flow index showed degradation of the material and its depolymerization.

KEYWORDS

3D print, recylation, PLA, tensile test, index flow rate

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

SEDLÁČEK, Vojtěch. Možnosti recyklace PLA materiálu pro účely 3D tisku a vliv na mechanické vlastnosti [online]. Brno, 2020 [cit. 2020-06-26]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/124912>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování. Vedoucí práce Tomáš Koutecký.

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucímu práce Ing. Tomáši Kouteckému, Ph.D., Ing. Liboru Válkovi CSc. za provedení tahových zkoušek, Ing. Miroslavu Černému Ph.D. za měření indexu toku taveniny, České geologické službě za zapůjčení drtiče a v neposlední řadě rodině.

PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE

Prohlašuji, že diplomovou práci jsem vypracovala samostatně, pod odborným vedením Ing. Tomáše Kouteckého, Ph.D. Současně prohlašuji, že všechny zdroje obrazových a textových informací, ze kterých jsem čerpala, jsou řádně citovány v seznamu použitých zdrojů.

.....

Podpis autora

OBSAH

1	ÚVOD	11
2	PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ	12
2.1	3D tisk	12
2.2	PLA	14
2.2.1	Struktura a zdroje PLA	14
2.2.2	Biodegradabilita PLA	14
2.2.3	Recyklace	15
2.2.4	Vliv recyklace na mechanické vlastnosti	15
2.2.5	Termická degradace	16
2.2.6	Doporučená tisková nastavení pro PLA	16
2.2.7	Limity 3D výtisků z PLA	16
3	ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE	17
4	MATERIÁL A METODY	18
4.1	Vstupní materiál	18
4.2	Průběh experimentu	18
4.2.2	3D tisk	20
4.2.3	Drcení	21
4.3	Metody vyhodnocení	22
4.3.1	Tahová zkouška	22
4.3.2	Index toku taveniny	22
5	VÝSLEDKY	24
5.1	Recyklační cykly	24
5.2	Extruze	24
5.3	Tahová zkouška	26
5.3.1	Testování při pokojové teplotě	26
5.3.2	Testování za zvýšené teploty	28
5.4	Index toku taveniny	31
6	DISKUZE	33
6.1	Zhodnocení průběhu výroby zkušebních těles	33
6.2	Vizuální porovnání zkušebních těles	35

6.2 Lomové plochy zkušebních těles	36
7 ZÁVĚR	39
8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	40
9 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN	42
10 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ	43
11 SEZNAM TABULEK	45
12 SEZNAM PŘÍLOH	46

1 ÚVOD

3D tisk se v posledních letech stal široce rozšířenou technologií výroby. Jeho nejčastější variantou je FDM (Fused deposition modeling), která umožňuje tisk objektů z termoplastů. Při této technologii vzniká významné množství odpadu, jako jsou tiskové podpory a nepovedené výtisky. Mezi nejpoužívanější materiály při FDM 3D tisku patří bezesporu PLA (polylaktid nebo také kyselina polymlečná).

Výhodou PLA je jeho nízká cena, dobré mechanické, tiskové vlastnosti a v neposlední řadě 100% biodegradabilita. Díky ohledům na životní prostředí se biodegradabilní materiály používají stále častěji a mají širší použití. To je případ i PLA které se krom 3D tisku prosazuje i u výroby obalových materiálů. Biodegradabilní materiály je ale nutné zpracovávat v průmyslových kompostárnách, proto se jako lepší alternativa jeví recyklace.

Tato práce se zabývá právě procesem recyklace 3D výtisků z PLA. Hlavním cílem práce je posoudit vliv jednotlivých recyklačních cyklů na mechanické vlastnosti. Posouzení je provedeno na základě tahové zkoušky za pokojové i zvýšené teploty a na měření indexu toku taveniny.

2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

2.1 3D tisk

3D tisk nebo také technologie rapid prototyping, slouží k rychlé výrobě prototypových těles a složitých výrobků i kusovým [1]. Technologie spočívá v přímém uplatnění 3D modelů z CAD (Computer aided design) programů [2]. Tato technologie patří mezi aditivní technologie, které narozdíl od konvenčního odebrání materiálu vytvářejí objekty přidáváním materiálu [3].

Mezi nejčastější technologie 3D tisku patří [5]:

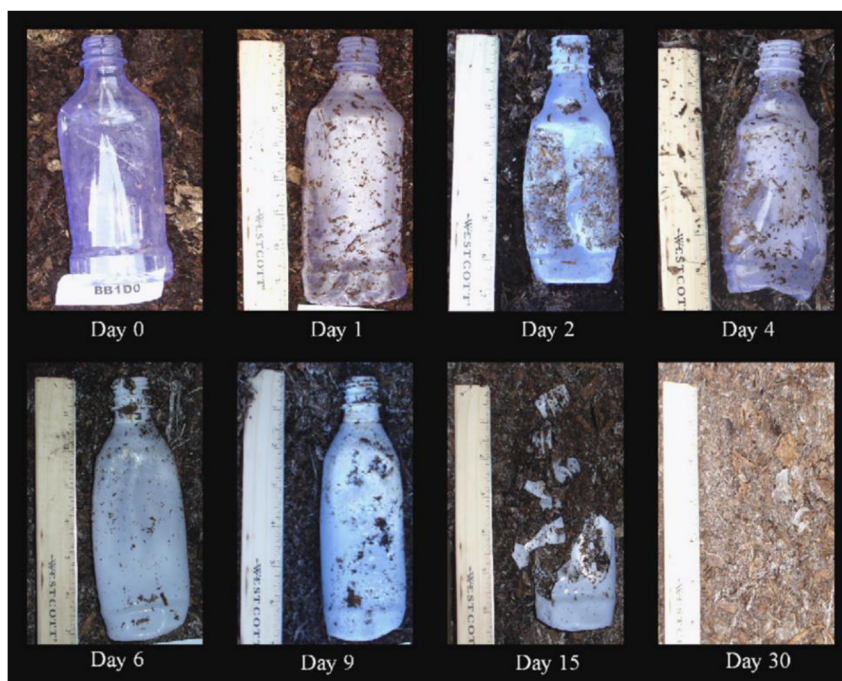
Obr. 2-1 Schéma technologie FDM [7]

Materiály používané v FDM tiskárnách [8] [9] [10]:

2.2 PLA

2.2.1 Struktura a zdroje PLA

PLA, kyselina polymlečná (Obr. 2-2) nebo také polylaktid je označení pro polymer s chemickým označením $(C_3H_6O_3)_n$ [11] [12]. Jedná se o termoplast, jehož význam i využití v posledních letech nabývá na významu, a to především díky biodegradabilitě a možnosti využití obnovitelných zdrojů [13]. Z biomasy bohaté na cukry (kukuřice, cukrová třtina, cukrová řepa, brambory, obilí) se kvašením získává kyselina mléčná ze které se vyrábí polymerizací PLA [14].



Obr. 2-3 Degradace PLA lahve [15]

2.2.3 Recyklace

Je tedy zřejmé, že kompostování je realizovatelné, ovšem k úplnému rozložení materiálu je třeba delšího času i zvýšené teploty. Proces tedy vyžaduje přísun energie [14]. Tato negativa kompostování prodražují, a proto se recyklace jeví jako lepší varianta.

2.2.4 Vliv recyklace na mechanické vlastnosti

3D výtisky z PLA mají dobré mechanické vlastnosti. V důsledku recyklace dochází mezi první a pátou recyklací jen k mírnému poklesu meze pevnosti v tahu a prodloužení, a k mírnému nárůstu Youngova modulu pružnosti [16], Tab. 2-1.

	R_m	A	E
	MPa	%	MPa
PLA	49,1–65,5	1, –5,0	2800–3600
1x recyklované PLA	51	1,88	3093 ± 194
5x recyklované PLA	48,8	1,68	3491 ± 98

Tab. 2-1 Parametry recyklovaného PLA [16]

2.2.5 Termická degradace

Termická degradace je důvodem proč při recyklaci dochází ke změně mechanických vlastností. Teplo působí jak při výrobě filamentu, tak při 3D tisku samotném. V důsledku působení tepla dochází k chemickým i fyzikálním změnám. Při nižších teplotách se nejmarkantnější jeví depolymerizace neboli krácení řetězců polymeru [17].

2.2.6 Doporučená tisková nastavení pro PLA

PLA od každého výrobce se při tisku na různých tiskárnách chová jinak a vyžaduje jiné teploty, proto mají doporučená nastavení teplot tisku určitý rozsah. Nezanedbatelný vliv mají také požadované vlastnosti tištěného objektu. Pro objekty plnící dekorativní funkci je vhodné použít nižších teplot, naopak pro pevnostní díly je vhodné použití teplot vyšších.

Pro 3D tisk PLA je vhodné použít vyhřívanou podložku o teplotě 55 až 70 °C. Doporučená tisková teplota je 180 až 220 °C. Je vhodné zabránit přístupu studeného vzduchu či průvanu [18].

2.2.7 Limity 3D výtisků z PLA

3D výtisky z PLA se nehodí pro aplikace se zvýšenou teplotou díky nízké teplotě tání. Jako maximální doporučená teplota použití se obvykle uvádí teplota skelného přechodu kolem 60 °C, od které dochází k měknutí materiálu [19].

3 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

Hlavním cílem práce je posoudit vliv recyklačních cyklů na mechanické vlastnosti za běžných a zvýšených teplot a dále tisknutelnost dílů vyráběných z materiálu PLA.

K výrobě filamentu bude použit extruder NEXT od firmy 3devo.

Dílčí cíle bakalářské práce:

4 MATERIÁL A METODY

4.1 Vstupní materiál

Jako vstupní materiál byl zvolen PLA granulát od firmy Plasty Mladeč. Z důvodu problematického čištění extrudéru při užití různobarevných variant, byla zvolena béžová barva. Tuto barevnou variantu lze poměrně odlišit od materiálů, které se používají k čištění extrudéru jako je Devoclean a HDPE. Ukázalo se však, že béžový PLA granulát se při extruzi spojuje do hrudek, které ucpávají extrudér. Toto chování nebylo pozorováno u žádného dalšího granulátu od firmy Plasty Mladeč. Patrně se jedná o výrobní vadu použité šarže granulátu.

Alternativně byl zvolen PLA filament od firmy Devil design hliníkové barvy. PLA Devil byl použit již při optimalizaci drcení, a proto bylo známo jeho bezproblémové chování. PLA hliníkové barvy lze snadno odlišit od čistících materiálů a čištění extrudéru je rovněž bezproblémové.

4.2 Průběh experimentu

Zvolený experiment má tři fáze: extruzi, 3D tisk a drcení. Jednotlivé fáze procesu znázorňuje Obr. 4-1.

Extruze:

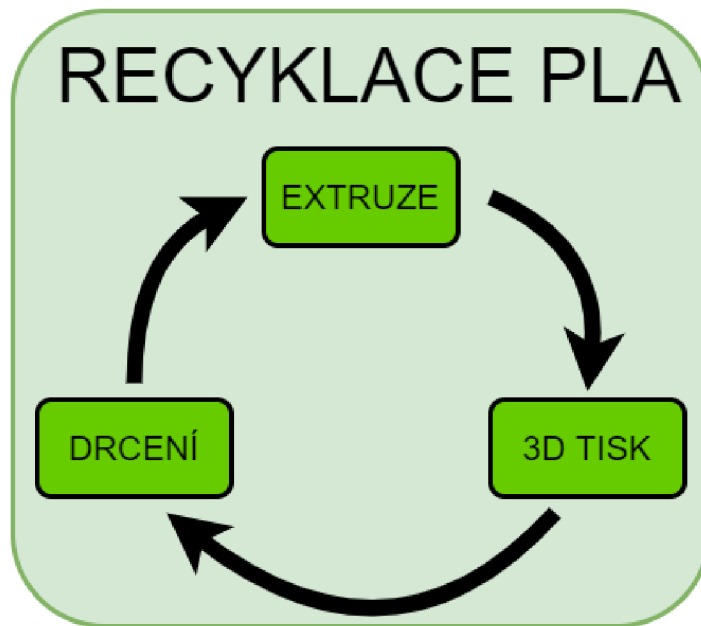
První výrobní fáze slouží k výrobě tiskové struny neboli filamentu. K tomu se využívá extrudér.

3D tisk:

V této fázi je cílem vytisknout na 3D tiskárně zkušební tělesa pro tahovou zkoušku a tělesa která se budou následně drit.

Drcení:

Cílem této fáze je nadrcení vytištěných těles na velikost částic vhodnou pro extrudér. Materiál byl mezi jednotlivými fázemi uchováván v uzavíratelném sáčku v přítomnosti silikagelu.



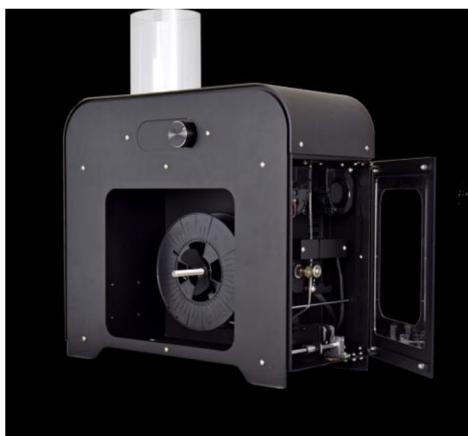
Obr. 4-1 Schéma recyklačního procesu

4.2.1 Extruze

Extruze filamentu z nadrceného PLA probíhala na extrudéru typového označení **3devo NEXT 1.0 Advanced** (Obr. 4-2). Data z extrudéru byla zaznamenávána pomocí programu **Arduino IDE**. Cílený průměr filamentu byl 1,75 mm. K extruzi bylo použito upravené doporučené nastavení pro PLA. Toto nastavení je vhodné jak pro recyklovaný materiál sušený i nesušený, tak pro recyklaci nesušené PLA. Nastavení extrudéru uvádí tabulka 4-1. Změny vůči doporučenému nastavení (uvedeno kurzívou) byly provedeny vzhledem k rozdílnému průměru finálního filamentu.

Tab. 4-1 Nastavení extrudéru [20]

Φfilamentu 1,75 mm	Heater 1	Heater 2	Heater 3	Heater 4
Nastavená teplota	180 °C	190 °C	185 °C	174 °C
Otáčky šneku	<i>3,5 ot./min</i>	-	-	-
Rychlost ventilátoru	<i>75 %</i>	-	-	-



Obr. 4-2 Extrudér 3devo NEXT 1.0 Advanced

4.2.2 3D tisk

K výrobě zkušebních těles pro tahovou zkoušku i těles pro drcení byla použita tiskárna **Original Prusa i3 MK3** (Obr. 4-3). Aby se snížilo riziko ucpávání byla použita tryska o průměru 0,6 mm. K tvorbě g-kódu byl použit **PrusaSlicer 2.2.0**. Výška vrstvy byla 0,3 mm. Teploty byly nastaveny následovně: teplota trysky 218 °C, teplota tiskové podložky 62 °C. Výplň byla zvolena Přímochará 100 % s úhlem 45°. Ostatní nastavení zůstala nezměněna vůči defaultnímu nastavení pro PLA.



Obr. 4-3 Tiskárna Original Prusa i3 MK3

4.2.3 Drcení

K drcení byl použit mlýnek **IKA MF 10 basic** (Obr. 4-4) vybavený mlecí – sekací hlavou MF 10.1. Drcení probíhalo po menších dávkách (10 až 15 g) a zároveň s ohledem na riziko natavování bylo prováděno na nejnižších možných otáčkách. Nadrcený materiál byl následovně síťován na laboratorním sítu o velikosti otvorů 4 mm.

Při síťování na jemnějším sítu bylo pozorováno prodloužení doby mletí a zahřívání mlýnku, tedy i zvýšení rizika natavení materiálu. Při větší velikosti ok síta měl získaný materiál vyšší variabilitu velikosti částic, což se v dalším kroku odrazilo v nerovnoměrném plnění šneku extrudéru. Použitá velikost otvorů 4 mm se ukázala jako vhodná pro extruzi, protože poskytuje částice podobné velikosti a zároveň bylo omezeno natavování částic.

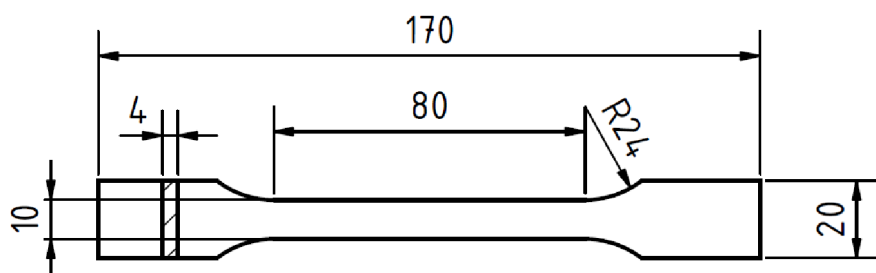


Obr. 4-4 Mlýnek IKA MF 10 basic

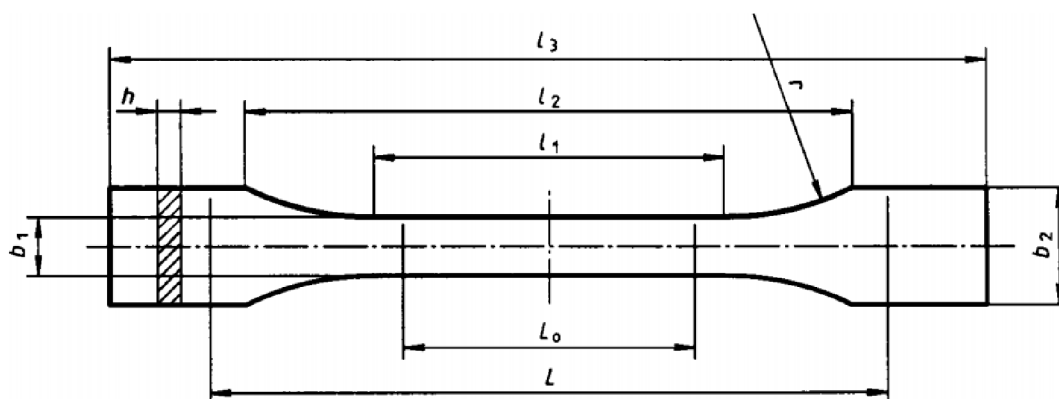
4.3 Metody vyhodnocení

4.3.1 Tahová zkouška

Tahová zkouška proběhla na stroji **ZWICK Z020** s využitím vyhřívané komory a extenzometru **ZWICK 066608**. Dle normy ČSN EN ISO 527 a požadavku měření prodloužení bylo zvoleno zkušební těleso tvaru 1A (Obr. 4-5 a 4-6).



Obr. 4-5 Rozměry tištěného zkušebního tělesa



Obr. 4-6 Rozměry zkušebního tělesa dle normy

Těleso bylo zvoleno s ohledem na použitý typ extenzometru, jeho charakteristiky uvádí tabulka 4-2. Zvolené zařízení neumožňuje použití menšího typu zkušebního tělesa, a tedy ani úsporu materiálu a času. Zkušební těleso bylo vymodelováno v programu **Autodesk Inventor 2019**.

4.3.2 Index toku taveniny

K měření indexu toku ztaveniny byl použit přístroj CEAST 7024. Měření bylo provedeno na předem připravené drti a filamentu, který byl nasekán na 4 mm dlouhé kousky pomocí granulovačky SCHEER SGS25 E 4. Hodnota indexu toku taveniny byla měřena dle normy ISO 1133 při použití normalizovaného závaží 2,16 kg při teplotě 210 °C. Byla použita tryska o průměru 2,095 mm.

Tab. 4-2 Skutečné rozměry zkušebního tělesa

Typ zkušebního tělesa		1A
l ₃	Celková délka	≥150
l ₁	Délka zúžené části s rovnoběžnými hranami	80 ± 2
r	Poloměr	20 až 25
l ₂	Vzdálenost mezi rozšířenými částmi s rovnoběžnými hranami	104 až 113
b ₂	Šířka konců	20,0 ± 0,2
b ₁	Šířka zúžené části	10,0 ± 0,2
h	Tloušťka	4,0 ± 0,2
L ₀	Počáteční měřená délka	50,0 ± 0,5
L	Počáteční vzdálenost mezi čelistmi	115 ± 1

5 VÝSLEDKY

5.1 Recyklační cykly

1. cyklus:

Extruzi z granulátu provedl výrobce filamentu Devil design. Následný 3D tisk zkušebních těles i těles na drcení proběhl bez problému. Při drcení nenastaly žádné potíže.

2. cyklus:

Extruze proběhla zdánlivě bez obtíží, ovšem při čištění byly nalezeny v čistícím materiálu Devoclen kovové částičky. Výsledný filament měl velké odchylky průměru a ovalitu (viz Obr. 5.1). Teflonovou trubičkou v podavači 3D tiskárny dokáže projít filamet o maximálním průměru 1,95 mm, proto nemohla být většina filamentu použita.

Na konci další extruze při čištění došlo k zablokování šneku extrudéru. Bylo nutné stroj rozebrat a vyčistit. Drcení proběhlo opět bez komplikací.

3. cyklus:

Po extruzi docházelo k deformaci vyextrudovaného filamentu. Bylo tedy nutné upravit směřování ventilátorů tak, aby docházelo k rychlejšímu chladnutí a předešlo se deformacím. Po těchto úpravách měl filament velmi malé odchylky průměru od nominálu. Toto zlepšení vůči 2. cyklu bylo s největší pravděpodobností důsledkem rozebrání a vyčištění celého stroje. Mezi přejezdy při tisku měl materiál tendenci samovolně vytékat z trysky. Proto byly zkušební tělesa tisknuta samostatně.

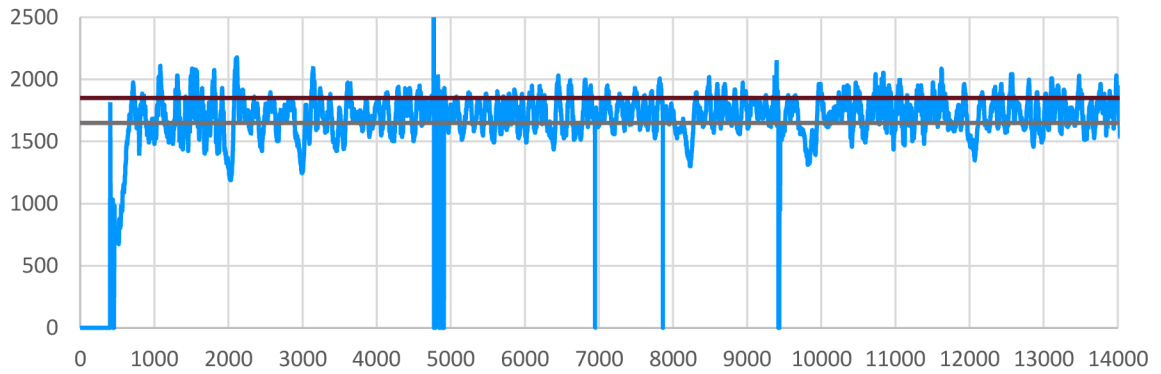
5.2 Extruze

Extruze v prvním cyklu byla provedena firmou Devil Design. Firma deklaruje průměrovou toleranci $\pm 0,05$ mm vůči jmenovitému průměru 1,75 mm a ovalitu $\pm 0,02$ mm.

V následujících cyklech byl použit extrudér 3devo NEXT 1.0 Advanced. Jmenovitý průměr byl 1,75 mm. Dovolený minimální průměr byl 1,65 mm a maximální 1,85 mm.

V druhém cyklu měl filament po celou dobu extruze velké odchylky v průměru (Obr. 5-1).

Výsledný filamet měl průměrný průměr 1,841 mm se směrodatnou odchylkou $\pm 0,135$ mm.



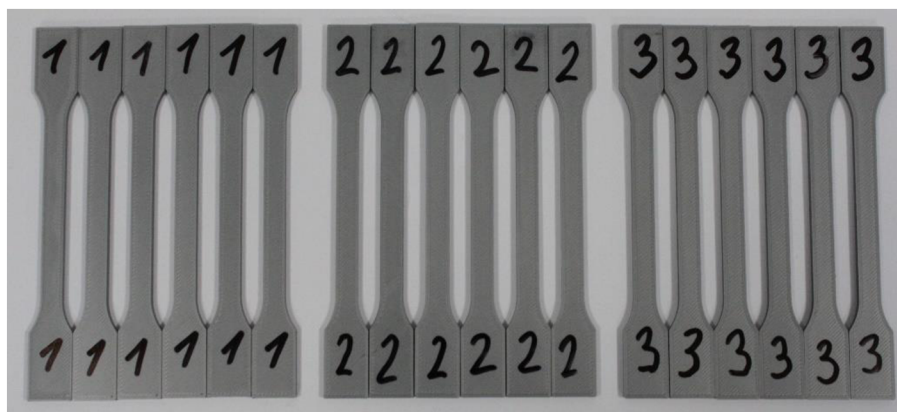
Obr. 5-1 Průběh průměru filamentu při extruzi v druhém cyklu

Ve třetím cyklu byla v počátku extruze problematická. Od cca 3500 sekundy se však průměrové odchylky výrazně zmenšily a ustálily (Obr. 5-2). Díky tomu byl výsledný průměr filamentu v průměru 1,795 mm se směrodatnou odchylkou $\pm 0,022$ mm.

Obr. 5-2 Průběh průměru filamentu při extruzi ve třetím cyklu

5.3 Tahová zkouška

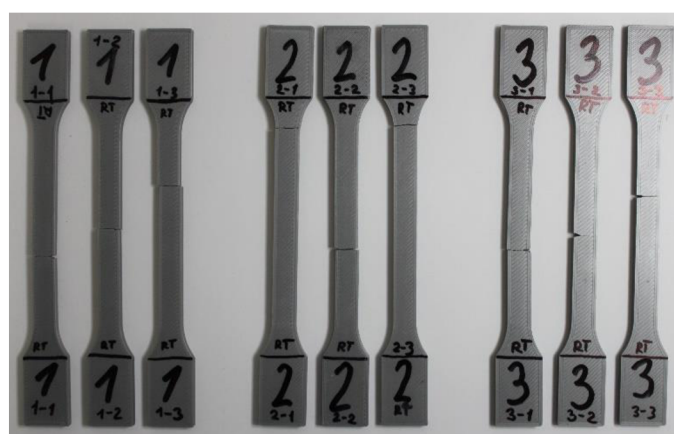
Z každého cyklu bylo ve fázi 3D tisku vytištěno 6 vzorků typu 1A. Tři zkoušky proběhly za pokojové teploty a tři za zvýšené teploty 50 °C. Celkově tedy bylo otestováno 18 vzorků (Obr. 5-3).



Obr. 5-3 Vytištěné vzorky před testováním

5.3.1 Testování při pokojové teplotě

Z každého cyklu extruze byly tahovou zkouškou při pokojové teplotě testovány celkem 3 vzorky (Obr. 5-3). Nalezené výsledky uvádí tabulka hodnot (Tab. 5-1), graficky jsou vyneseny v Obr. 5-4. Je patrné, že nejvyšší hodnoty meze pevnosti vykazuje třetí cyklus s průměrnou hodnotou 57 MPa a směrodatnou odchylkou $\pm 0,205$. První cyklus má hodnoty meze pevnosti 51,5 MPa se směrodatnou odchylkou $\pm 0,294$ a jsou druhé nejvyšší. Druhý cyklus má nejnižší pevnost 47,6 MPa s řádově větší směrodatnou odchylkou $\pm 4,847$.



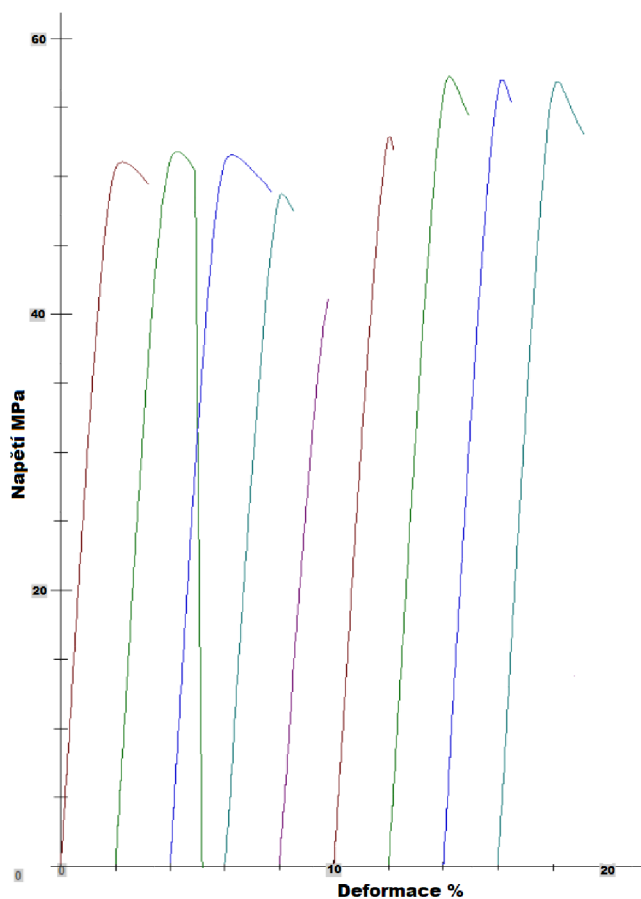
Obr. 5-3 Zkušební tělesa po provedení zkoušky tahem za pokojové teploty

Youngův modul pružnosti byl nejvyšší u třetího cyklu ($3344 \text{ MPa} \pm 78,88$), první cyklus měl hodnoty nižší ($3141 \text{ MPa} \pm 15,41$) a nejnižší byl u druhého cyklu ($3026 \text{ MPa} \pm 92,32$).

Obdobné pořadí se opakovalo i u smluvní meze kluzu, kde třetí cyklus dosáhl hodnoty $52,7 \text{ MPa} \pm 1,255$, první cyklus $47,9 \text{ MPa} \pm 0,287$ a druhý cyklus $44,1 \text{ MPa} \pm 5,927$. Celkové prodloužení má největší první cyklus ($3,4 \% \pm 0,236$) následován třetím cyklem ($2,8 \% \pm 0,249$). Nejmenšího celkového prodloužení dosáhl druhý cyklus ($2,2 \% \pm 0,287$).

Tab. 5-1 Výsledky tahových zkoušek za pokojové teploty

pokojeová teplota	E modul	Rp 0,2	Rm	Rb	At
	MPa	MPa	MPa	MPa	%
1. cyklus 1. vzorek	3120	47,6	51,1	49,4	3,2
1. cyklus 2. vzorek	3157	47,9	51,8	0	3,2
1. cyklus 3. vzorek	3145	48,3	51,6	48,9	3,7
2. cyklus 1. vzorek	3123	43,0	48,8	47,4	2,5
2. cyklus 2. vzorek	2902	37,4	41,2	41,2	1,8
2. cyklus 3. vzorek	3054	51,8	52,9	51,9	2,2
3. cyklus 1. vzorek	3282	53,4	57,3	54,4	2,9
3. cyklus 2. vzorek	3294	53,7	57,0	55,3	2,5
3. cyklus 3. vzorek	3455	50,9	56,8	53	3,1
průměrné hodnoty					
1. cyklus	3141	47,9	51,5	32,8	3,4
2. cyklus	3026	44,1	47,6	46,8	2,2
3. cyklus	3344	52,7	57,0	54,2	2,8
směrodatná odchylka					
1. cyklus	15,41	0,287	0,294	23,170	0,236
2. cyklus	92,32	5,927	4,847	4,387	0,287
3. cyklus	78,88	1,255	0,205	0,946	0,249



Obr. 5-4 Graf průběhu napětí během tahové zkoušky za pokojové teploty

5.3.2 Testování za zvýšené teploty

Z každého extruzního cyklu byly tahovou zkouškou za zvýšené teploty testovány celkem 3 vzorky (Obr. 5-5). Po zvýšení testovací teploty na 50 °C došlo k výraznému poklesu smluvní meze kluzu i Youngova modulu pružnosti. Nalezené výsledky uvádí tabulka hodnot (Tab. 5-2), graficky jsou vyneseny v Obr. 5-6 (detail grafu Obr. 5-7).

Tažnost se natolik zvýšila, že vzhledem k rozměrům vyhřívané komory musela být zkouška zastavena při přibližně 150% prodloužení. U žádného ze vzorků nedošlo k porušení materiálu.

Nejvyšší smluvní mez kluzu vykázaly vzorky z třetího cyklu s hodnotou $6,1 \text{ MPa} \pm 0,368$. Pro první cyklus byla naměřena mírně snížená hodnota meze kluzu $5,8 \text{ MPa} \pm 0,403$, nejnižší hodnota $5,3 \text{ MPa} \pm 0,377$ odpovídá opět druhému cyklu.

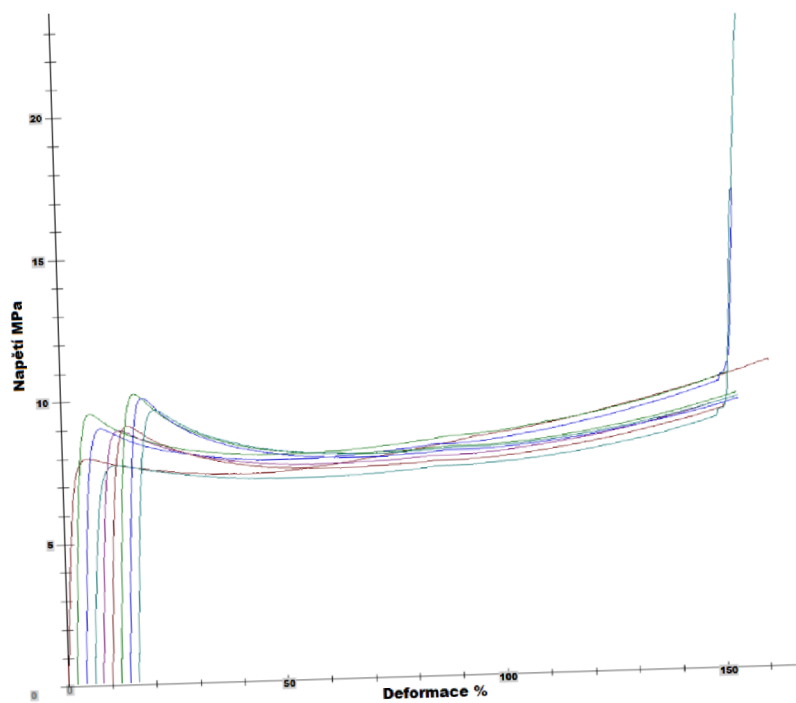


Obr. 5-5 Zkušební tělesa po provedení zkoušky tahem za zvýšené teploty

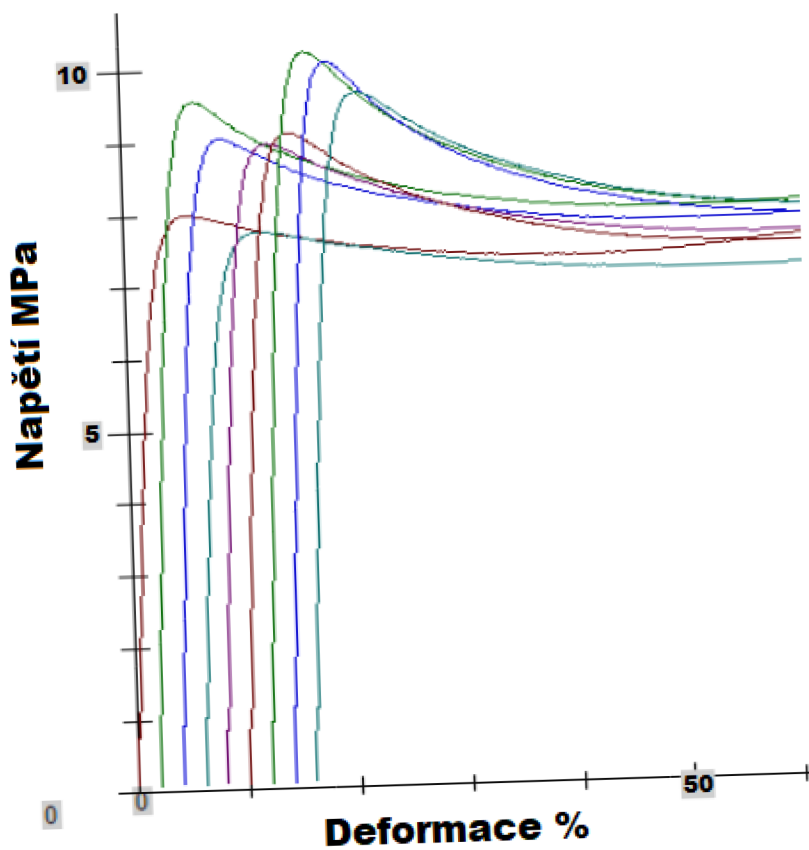
Youngův modul pružnosti byl nejvyšší opět u třetího cyklu $633 \text{ MPa} \pm 34,08$, ovšem narozdíl od pokojové teploty byl u druhého cyklu vyšší ($540 \text{ MPa} \pm 57,28$) než u prvního ($522 \text{ MPa} \pm 66,10$). Jak je zřejmé z grafu (Obr. 5-7) přístrojem zaznamenané hodnoty meze pevnosti nelze považovat za relevantní.

Tab. 5-2 Výsledky tahových zkoušek za zvýšené teploty

zvýšená teplota	E modul	Rp 0,2	Rm	At
50 °C	MPa	MPa	MPa	%
1. cyklus 1. vzorek	434	5,2	10,8	161,1
1. cyklus 2. vzorek	593	6,1	10,4	150,1
1. cyklus 3. vzorek	540	6,0	17,0	150,0
2. cyklus 1. vzorek	460	4,8	23,2	150,0
2. cyklus 2. vzorek	591	5,6	9,3	139,3
2. cyklus 3. vzorek	569	5,6	9,3	140,7
3. cyklus 1. vzorek	679	6,1	10,2	141,6
3. cyklus 2. vzorek	598	6,5	10,1	140,0
3. cyklus 3. vzorek	621	5,6	9,7	138,0
průměrné hodnoty				
1. cyklus	522	5,8	12,7	153,7
2. cyklus	540	5,3	13,9	143,3
3. cyklus	633	6,1	10,0	139,9
směrodatná odchylka				
1. cyklus	66,10	0,403	3,021	5,209
2. cyklus	57,28	0,377	6,553	4,749
3. cyklus	34,08	0,368	0,216	1,473



Obr. 5-6 Graf průběhu napětí během tahové zkoušky za zvýšené teploty



Obr. 5-7 Detail grafu průběhu napětí během tahové zkoušky za zvýšené teploty

5.4 Index toku taveniny

Pro všechny cykly bylo provedeno měření indexu toku taveniny. Z každého cyklu byl použit filament před 3D tiskem a nadrcený materiál po 3D tisku. K měření dle ISO 1133 bylo použito normalizované závaží 2,16 kg, doba přehřevu 240 s, průměr trysky 2,095 mm a teplota 210 °C. Nalezené hodnoty uvádí tabulka 5-3.

V prvním cyklu byl objemový index toku taveniny pro filament 24,5 cm³ za 10 minut se směrodatnou odchylkou ± 1,918. U drťi došlo k poklesu na 19,5 cm³ za 10 minut se směrodatnou odchylkou ± 0,892.

Ve druhém cyklu hodnoty mírně vzrostly jak v porovnání s prvním cyklem, tak i po 3D tisku (filament: 31,0 cm³ za 10 minut ± 1,284, drť: 37,2 cm³ za 10 minut ± 0,635).

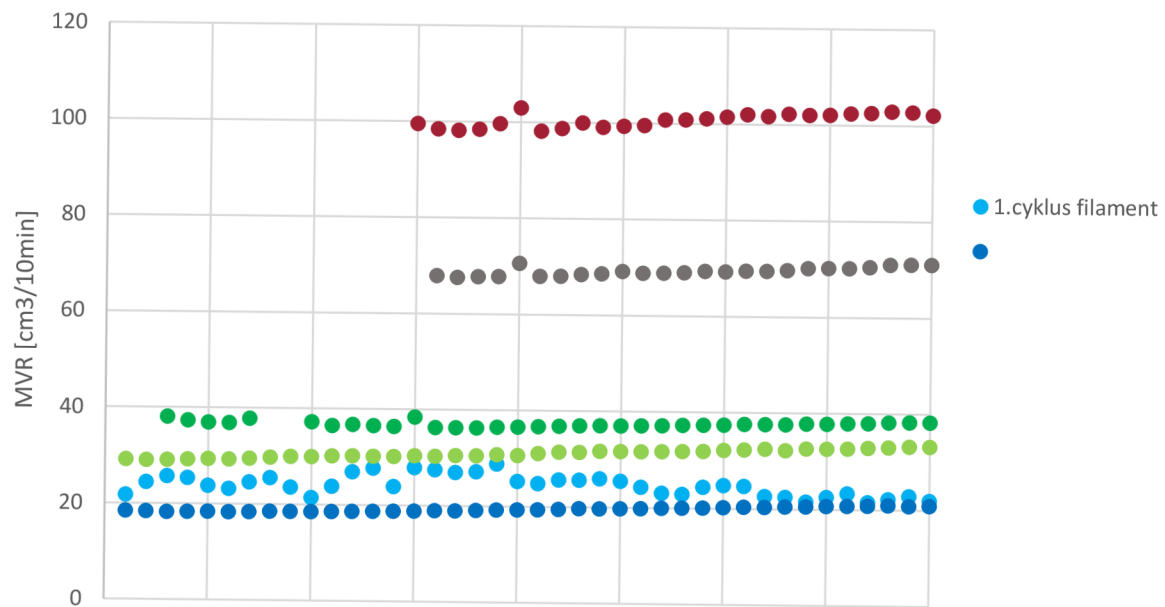
Třetí cyklus měl hodnoty výrazně vyšší než předešlé cykly, zároveň došlo k významnému nárůstu před 3D tiskem (filament: 69,3 cm³ za 10 minut ± 1,091) a po něm (drť: 100,7 cm³ za 10 minut ± 1,613).

Tab. 5-3 Výsledky měření indexu toku taveniny

	MVR	směrodatná
	cm³/10 min	odchylka
		±
1. cyklus filament	24,5	1,918
1. cyklus drť	19,5	0,892
2. cyklus filament	31,0	1,284
2. cyklus drť	37,2	0,635
3. cyklus filament	69,3	1,091
3. cyklus drť	100,7	1,613

V grafu (Obr. 5-8) je patrný mírně rostoucí index toku taveniny v průběhu testování. Tento efekt je způsoben degradací materiálu uvnitř stroje.

Index toku taveniny PLA



Obr. 5-8 Graf indexu toku taveniny

6 DISKUZE

6.1 Zhodnocení průběhu výroby zkušebních těles

Z výsledků tahových zkoušek za pokojové teploty je zřejmé, že zkušební tělesa z druhého cyklu mají nejhorší mechanické vlastnosti. Tyto vlastnosti, ani průběh deformace vůči napětí nekorespondují s chováním zkušebních těles z ostatních cyklů. Dokonce u dvou ze tří vzorků došlo k porušení v místě přechodu mezi úzkou a širší částí zkušebního tělesa.

Popsané chování a neuspokojivé výsledky jsou důsledkem problematické extruze. Podle grafu (Obr. 5-1) má filament z druhého cyklu velké odchylky v průměru. Senzor pro měření průměru měří rozměr pouze v jednom směru, avšak nepodává žádné informace o ovalitě. Právě ovalita v kombinaci s odchylkami od jmenovitého průměru byla největším problémem při tisku.

Teflonová trubička podavače uvnitř 3D tiskárny má vnitřní rozměr 1,95 mm, a tedy jí neprojde filament o stejném nebo větším průměru. Přestože byl filament v průběhu tisku měřen posuvným měřidlem, došlo několikrát k ucpání této teflonové trubičky. Uvedený problém byl vyřešen kontrolou filamentu. Kontrola byla provedena protažením filamentu kalibrovaným otvorem. Pomůcka k tomuto účelu byla vytvořena vyvrtáním otvoru o průměru 1,9 mm do ocelového plechu. Tímto postupem byl odseparován filament vyššího průměru nebo ovality. Kontrolou neprošlo enormních 423 g z celkových 673 g. Bylo tedy nutné extrudovat další materiál.

Nižší průměr filamentu než nominální, vedl ke vzniku pórů a ředin ve vytištěných tělesech. Problém se podařilo částečně eliminovat měněním průtoku tryskou. Změna průtoku probíhala manuálně dle vizuálního stavu tisku. Jelikož změna průměru filamentu byla poměrně rychlá, nebylo možné se zcela předejít vzniku pórů v materiálu.

Na konci opakované extruze v druhém cyklu došlo k ucpání extrudéru. Bezpečnostní pojistka proti přetížení motoru vypnula celý extrudér. Díky tomu došlo ke ztrátě dat z opakované extruze. Extrudér bylo nutné rozebrat a vyčistit. Při rozebrání extrudéru se ukázalo, že šnek byl zablokovaný úlomkem ostrého rohu (Obr. 6-1) z mixážní části šneku. Tento ostrý rožek byl výsledkem výrobní technologie a neměl na funkci extrudéru vliv.



Obr. 6-1 Šnek extrudéru

Předešlí uživatelé extrudér čistili pouze HDPE. Teprve po prvním použití výrobcem doporučeného čistícího materiálu Devocleanu vyšly ze zařízení částičky velmi degradovaného materiálu. Po každé extruzi proběhlo čištění Devocleanem, tyto velmi degradované částice se již neobjevily.

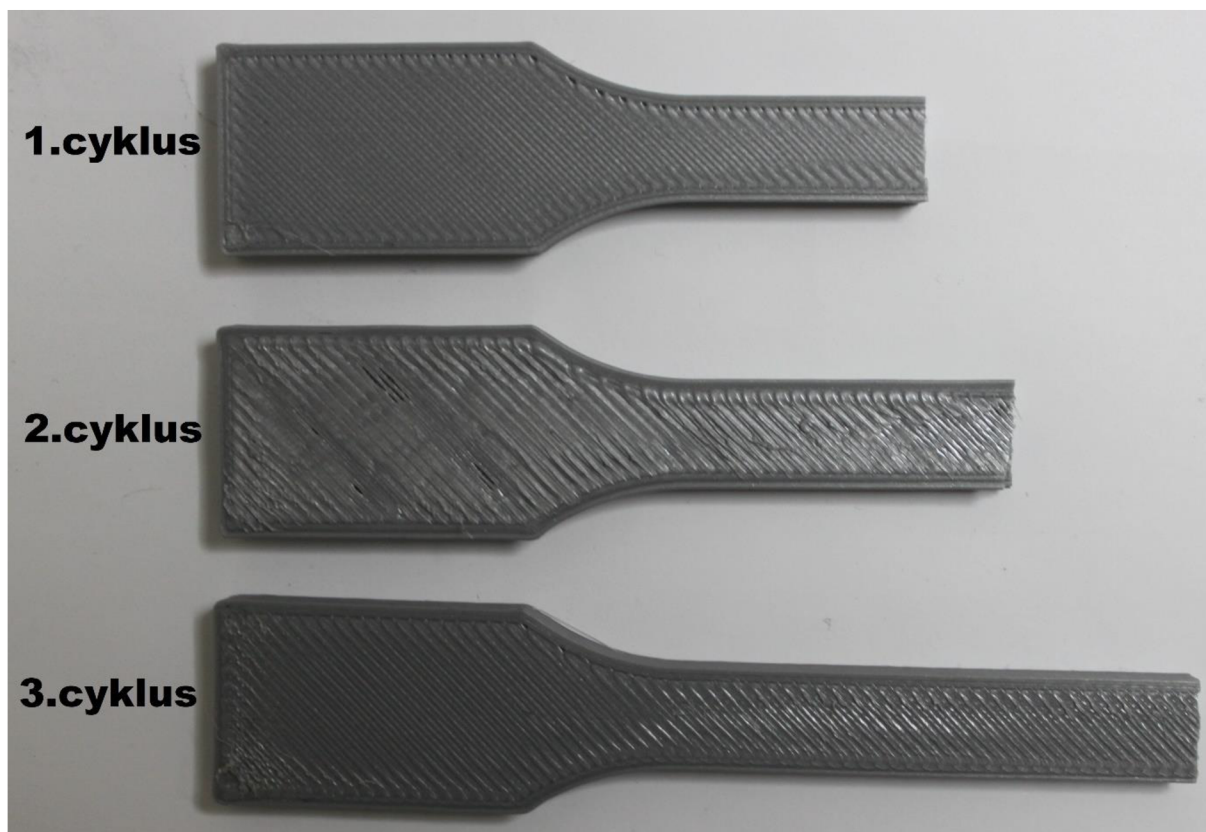
Další rozebrání extrudéru ukázalo, že šnek je v místě heaterů pokryt nepravidelnou vrstvou degradovaného materiálu. Po odstranění této vrstvy byl extrudér znovu smontován a uveden do provozu.

Jak ukazuje graf (Obr. 5-8), tak mezi druhým a třetím cyklem došlo k významnému nárůstu hodnot indexu toku taveniny. Díky tomu z počátku třetí extruze měl materiál tendenci z trysky vytékat samovolně, spíše působením gravitace než tahem napínacího kolečka. Vyextrudovaný filament se poté zpomaloval o senzor průměru a deformoval se. Bylo nutné upravení pozice ventilátorů, tak aby filament začal chladnout ihned po opuštění trysky. Z výsledků třetí extruze je parné, že po vyčištění extrudéru byl výsledný filament vhodný pro 3D tisk téměř všechen.

Při 3D tisku filamentu z třetího cyklu měl filament tendenci samovolně vytékat mezi přejezdy. Proto byla zkušební tělesa tisknuta po jednom kusu. Další možností, jak tento problém eliminovat je zvětšit retrakce. Zvětšení retrakcí ovšem vede k nežádoucímu prodloužení tiskového času.

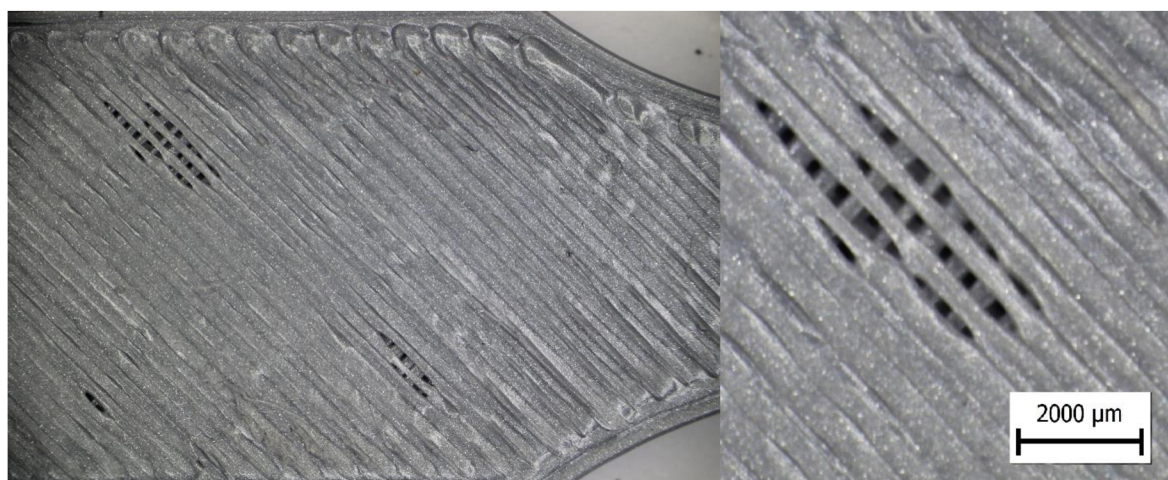
6.2 Vizuální porovnání zkušebních těles

Je patrné, že vzorky z prvního a třetího cyklu vytištěny poměrně rovnoměrně. Oproti tomu vzorek z druhého cyklu vykazuje nerovnoměrnosti. Při detailnějším pohledu je zřejmé, že některá místa obsahují materiálu více než je třeba, někde je materiálu naopak málo. Tyto odchylky jsou důsledkem proměnnosti průměru filamentu.



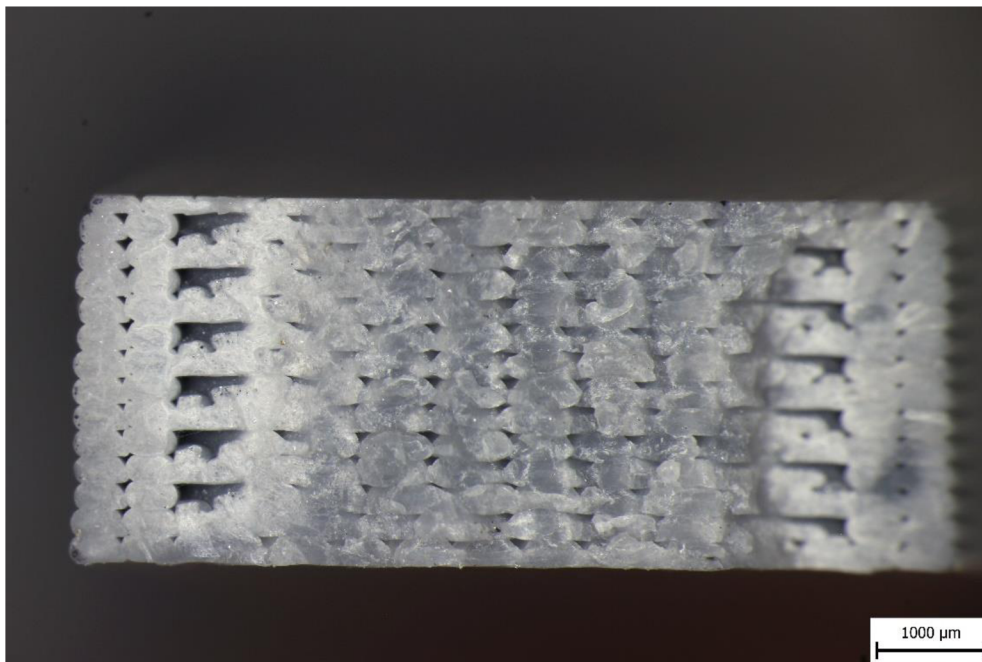
Obr. 6-2 Detail vzorku po jednotlivých cyklech

Další snímky vzorku z druhého cyklu (Obr. 6-3 a 6-4) ukazují detail degradovaného materiálu. Tento materiál patrně setrval v extrudéru déle. Je jasně patrná změna barvy.



6.2 Lomové plochy zkušebních těles

Lomová plocha vzorku z prvního cyklu (Obr. 6-4) ukazuje rovnoměrné rozmístění pórů a systémovou chybu sliceru, který nedokonale propojil vnější vrstvy perimetru s vnitřní výplní. Tato pórovitost je obvyklá pro 3D výtisky.



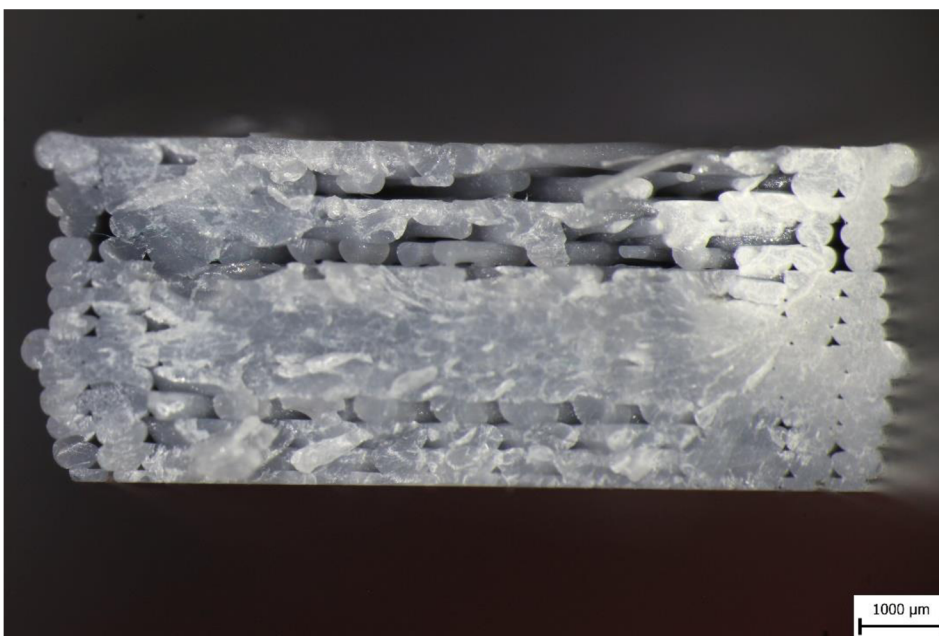
Obr. 6-4 Lomová plocha vzorku z prvního cyklu

Lomová plocha třetího vzorku z druhého cyklu. Tento vzorek dopadl ze všech vzorků z druhého cyklu nejlépe. Obr. 6-5 dokumentuje, že došlo k lepšímu propojení materiálu, patrně díky zvýšení indexu toku taveniny. Zároveň je patrné, že některé vrstvy nadále trpí nedostatkem materiálu. Tento přetrvávající jev je způsoben variabilitou průměru filamentu.



Obr. 6-5 Lomová plocha třetího vzorku z druhého cyklu

Na lomové ploše druhého vzorku z druhého cyklu (Obr. 6-6) je v makroskopickém měřítku patrný vliv nestejného průměru struny. Některé vrstvy mají zřetelně velký nedostatek materiálu a je zde patrné, že v horní části došlo k vytržení ztenčeného vlákna materiálu. Proto také tahová zkouška dopadla u tohoto vzorku nejhůře. K porušení došlo u přechodu z užší části do širší, tedy mimo extenzometr.

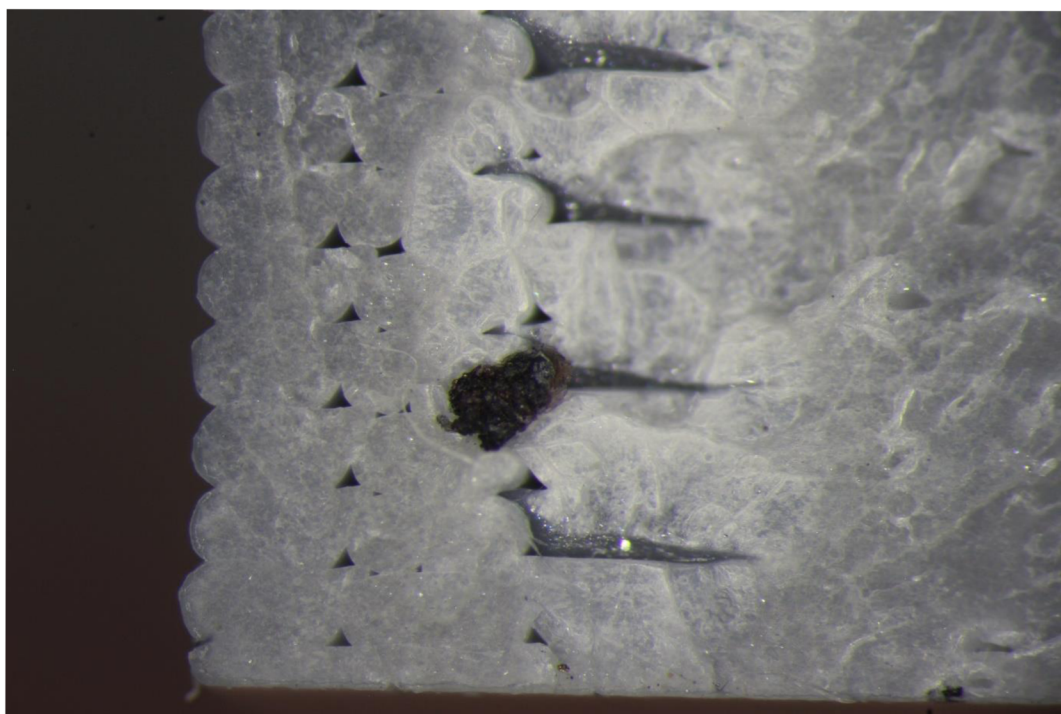


Obr. 6-6 Lomová plocha problematického vzorku z druhého cyklu

Na lomové ploše vzorku z třetího cyklu (Obr. 6-7, 6-8) je patrné nejdokonalejší propojení materiálu. To lze vysvětlit výrazným nárůstem indexu toku taveniny právě ve třetím cyklu. Dále je patrné že lomová plocha obsahuje materiál vysoce degradovaný v průběhu recyklace.



Obr. 6-7 Lomová plocha vzorku ze třetího cyklu



Obr. 6-8 Detail vysoce degradovaného materiálu

7 ZÁVĚR

Tato práce byla zaměřena na proces recyklace PLA a porovnání mechanických vlastností v průběhu recyklace. Proces recyklace spočíval v extruzi filamentu, 3D tisku zkušebních těles a drcení. Tímto postupem prošel materiál třikrát.

Nejvíce problematická se ukázala extruze filamentu, a to především ve druhém cyklu. Výsledný filament měl průměrnou hodnotu průměru 1,841 mm se směrodatnou odchylkou $\pm 0,135$ mm. Filament s větším průměrem, než byla schopna 3D tiskárna Original Prusa i3 MK3 pojmout nemohl být použit. Zbylý filament měl stále vůči nominálnímu průměru značné odchylky, které způsobily vznik ředin a póru uvnitř vytištěných zkušebních vzorků. Proto nelze výsledky tahové zkoušky u druhého cyklu považovat za průkazné.

Extruze ve třetím cyklu měla naopak velmi dobré výsledky především díky vyčištění extrudéru, které předcházelo samotné extruzi. Výsledný filament měl v průměru 1,795 mm se směrodatnou odchylkou $\pm 0,022$ mm. S průměrem tohoto filamentu nebyly při 3D tisku potíže.

Za pokojových teplot došlo mezi prvním a třetím cyklem k mírnému nárůstu mechanických vlastností. Toto chování je spíše opačné vůči předpokladu že materiál i jeho mechanické vlastnosti budou v průběhu recyklace degradovat. Lomové plochy ukázaly, že za tímto mírným zvýšením mechanických vlastností stojí lepší propojení materiálu. Zlepšení propojení materiálu mělo významnější vliv než jeho postupná degradace.

Dále byly provedeny i tahové zkoušky za zvýšené teploty 50 °C. Tato teplota je o 10 °C nižší než teplota skelného přechodu, což je i maximální doporučená teplota pro použití 3D tištěných součástí z PLA. Ukázalo se, že při této teplotě došlo k poklesu smluvní meze kluzu v průměru o 87,9 % u prvního cyklu, 88,0 % u druhého cyklu a 88,4 % u třetího cyklu vůči pokojové teplotě. Z výsledků je patrné že PLA není při 50 °C vhodné pro zatěžované součásti.

Jak ukazuje měření indexu toku taveniny, tak v průběhu procesu stoupala hodnota MVR. To dokazuje pokles polymerizace PLA materiálu, a tudíž i jeho tepelnou degradaci. Toto zvýšení tekutosti, které bylo nejmarkantnější u třetího cyklu způsobilo lepší propojení materiálu, a tudíž i mírný nárůst mechanických vlastností.

Z výsledků je tedy zřejmé, že recyklace PLA je realizovatelná a změna mechanických vlastností mezi recyklačními cykly není výrazná. Vzhledem k množství odpadu, které při 3D tisku vzniká lze recyklaci doporučit více než kompostování, které je časově náročné a ke svému provozu potřebuje zvýšenou teplotu tedy i energii navíc.

Výsledky z druhého cyklu nelze považovat za průkazné a bylo by vhodné je zopakovat. Do budoucna by bylo smysluplné měření zopakovat s větším počtem vzorků.

8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] HRDLIČKA, Martin. Vliv teploty vzduchu na FDM 3D tisk. Brno, 2017, 57 s. Vedoucí diplomové práce Oskar Zemčík. Vysoké učení technické v Brně, Ústav strojírenské technologie.
- [2] GIBSON, Ian, David W. Rosen, and Brent Stucker. Additive manufacturing technologies. Vol. 17. New York: Springer, 2014. 510 p. ISBN 978-1-4939-2113-3.
- [3] ZÍTKA, Lukáš. Inovace 3d tiskárny typu REP RAP. Brno, 2017, 70 s. Vedoucí diplomové práce Josef Sedlák. Vysoké učení technické v Brně, Ústav strojírenské technologie.
- [4] PAREKTRH, Visthal. 3D Printing in Plastics [online]. 2019 [vid. 2020-06-23]. Dostupné z: <https://www.aranca.com/knowledge-library/articles/ip-research/3d-printing-in-plastics>
- [5] GEBHARDT, Andreas and J. S. Hötter. 3-Machines for Rapid Prototyping, Direct Tooling, and Direct Manufacturing. Additive Manufacturing: Hanser 2016: 93–290.
- [6] Aditivní technologie – metody Rapid Prototyping [online]. [vid. 2020-06-24]. Vysoké učení technické v Brně, Ústav strojírenské technologie. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/podklady/sto_bak/cv_STV_04_Aditivni_technologie_metody_Rapid_Prototyping.pdf
- [7] How FDM/FFF 3D Printing Technology Works? [online]. 2018 [vid. 2020-06-20]. Dostupné z: <https://manufactur3dmag.com/working-fdm-fff-3d-printing-technology/>
- [8] Jaký materiál vybrat pro stolní 3D tisk? Průvodce základními polymery napoví. [online]. 2016 [vid. 2020-06-17]. Dostupné z: <https://www.3d-tisk.cz/jaky-material-vybrat-pro-stolni-3d-tisk/>
- [9] PRŮŠA, Josef. Průvodce materiály. [online]. 2020 [vid. 2020-06-20]. Dostupné z: <https://www.prusa3d.cz/materialy/>
- [10] Materiálový slovník. [online]. 2020 [vid. 2020-06-19]. Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/materialovy-slovník/>
- [11] Polymléčná kyselina PLA kolik znáte a Pla příbory sada. [online]. 2018 [vid. 2020-06-20]. Dostupné z: <http://cz.dxcutlery-ar.com/info/polylactic-acid-pla-how-much-do-you-know-30513428.html>
- [12] SVÍTIL, Jan. Roztoková syntéza PLA. Brno, 2016, 37 s. Vedoucí diplomové práce Jaroslav Petřůj. Vysoké učení technické v Brně, Ústav chemie materiálů.
- [13] FARAH, Shady, Daniel G. Anderson a Robert Langer. Physical and mechanical properties of PLA, and their functions in widespread applications — A comprehensive review. 2Advanced Drug Delivery Reviews 107, 2016, 367–392.
- [14] Bioplasty – Polylaktid (PLA). [online]. 2020 [vid. 2020-06-14]. Dostupné z: <http://www.bio-plasty.cz/bioplasty-polylaktid-pla/>

- [15] KALEA, Gaurav, Rafael Auras, Sher Paul Singha a Ramani Narayan. Biodegradability of polylactide bottles in real and simulated composting conditions *Polymer Testing* 26, 2007, 1049–1061.
- [16] PAKKANEN, Jukka, Diego Manfredi, Paolo Minetola a Luca Iuliano. About the Use of Recycled or Biodegradable Filaments for Sustainability of 3D Printing State of the Art and Research Opportunities. 2017, *International Conference on Sustainable Design and Manufacturing*. Springer, Cham.
- [17] BĀŇA, Jiří. Sledování chemické odolnosti Polyesterů, Polyamidů a vybraných epoxidových pryskyřic. Pardubice, 2018, 56 s. Dostupné z: https://dk.upce.cz/bitstream/handle/10195/71516/BanaJ_SledovaniChemicke_LU_2018.pdf?sequence=1&isAllowed=y Vedoucí bakalářské práce Leoš Ungermann. Univerzita Pardubice, Fakulta chemicko-technologická.
- [18] Flynt, Joseph. 3D Printer Settings for PLA Filament – A Beginner’s Guide. [online]. 2020 [vid. 2020-06-18]. Dostupné z: <https://3dinsider.com/pla-filament/>
- [19] 3D tiskové materiály – jak fungují. [online]. 2020 [vid. 2020-06-18]. Dostupné z: <http://www.3dtiskarny.info/recenze/srovnani-3d-tiskovych-strun/>
- [20] Recycling pla: extrusion walkthrough from regrind to filament. [online]. 2020 [vid. 2020-06-18]. Dostupné z: <https://support.3devo.com/pla-shredded/>

9 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

FDM (Fused deposition modeling)

PLA (polylactic acid)

ABS (Akrylonitrilbutadienstyren)

PET-G (Polyetyléntereftalát – glykol)

R_m Mez pevnosti v tahu

$R_{p0,2}$ Smluvní mez pevnosti v tahu

E Youngův modul pružnosti

A_t celkové prodloužení

MVR - melt volume rate

10 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

- Obr. 2-1 Schéma technologie FDM [7]
- Obr. 2-2 Vzorec kyseliny polymléčné [11]
- Obr. 2-3 Degradace PLA lahve [I]
- Obr. 4-1 Schéma recyklačního procesu
- Obr. 4-2 Extrudér 3devo NEXT 1.0 Advanced
- Obr. 4-3 Tiskárna Original Prusa i3 MK3
- Obr. 4-4 Mlýnek IKA MF 10 basic
- Obr. 4-5 Rozměry tištěného zkušební tělesa
- Obr. 4-6 Rozměry zkušební tělesa dle normy
- Obr. 5-1 Průběh průměru filamentu při extruzi v druhém cyklu
- Obr. 5-2 Průběh průměru filamentu při extruzi ve třetím cyklu
- Obr. 5-3 Vytisknuté vzorky před testováním
- Obr. 5-3 Zkušební tělesa po provedení zkoušky tahem za pokojové teploty
- Obr. 5-4 Graf průběhu napětí během tahové zkoušky za pokojové teploty
- Obr. 5-5 Zkušební tělesa po provedení zkoušky tahem za zvýšené teploty
- Obr. 5-6 Graf průběhu napětí během tahové zkoušky za zvýšené teploty
- Obr. 5-7 Detail grafu průběhu napětí během tahové zkoušky za zvýšené teploty
- Obr. 5-8 Graf indexu toku taveniny
- Obr. 6-1 Šnek extrudéru
- Obr. 6-2 Detail vzorku po jednotlivých cyklech
- Obr. 6-3 Detail defektu
- Obr. 6-4 Lomová plocha vzorku z prvního cyklu
- Obr. 6-5 Lomová plocha třetího vzorku z druhého cyklu
- Obr. 6-6 Lomová plocha problematického vzorku z druhého cyklu
- Obr. 6-7 Lomová plocha vzorku ze třetího cyklu
- Obr. 6-8 Detail vysoce degradovaného materiálu

11 SEZNAM TABULEK

Tab. 2-1 Parametry recyklovaného PLA [B]

Tab. 4-1 Nastavení extrudéru

Tab. 4-2 Skutečné rozměry zkušebního tělesa

Tab. 5-1 Výsledky tahových zkoušek za pokojové teploty

Tab. 5-2 Výsledky tahových zkoušek za zvýšené teploty

Tab. 5-3 Výsledky měření indexu toku taveniny

12 SEZNAM PŘÍLOH

Extruze 2cyklus

Extruze 3cyklus

PLA-drt-1

PLA-drt-2

PLA-drt-3

PLA-filament-1

PLA-filament-2

PLA-filament-3