

Charakterizace vlastností materiálů používaných RepRap 3D tiskárnami

Ondřej Diatel

Bakalářská práce
2018



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická
Ústav výrobního inženýrství
akademický rok: 2017/2018

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Ondřej Diatel**
Osobní číslo: **T14085**
Studijní program: **B3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Technologická zařízení**
Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Charakterizace vlastností materiálů používaných RepRap 3D tiskárnami**

Zásady pro vypracování:

1. Zpracujte literární rešerši na dané téma
2. Stanovte základní termické vlastnosti daných materiálů
3. Stanovte základní strukturní vlastnosti daných materiálů
4. Vyhodnoťte zjištěné skutečnosti a porovnejte

Rozsah bakalářské práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

dle doporučení vedoucího bakalářské práce

Vedoucí bakalářské práce:

doc. Ing. Martina Hřibová, Ph.D.

Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání bakalářské práce:

2. ledna 2018

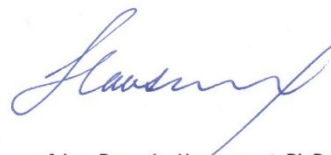
Termín odevzdání bakalářské práce:

18. května 2018

Ve Zlíně dne 28. února 2018



doc. Ing. František Buňka, Ph.D.
děkan



prof. Ing. Berenika Hausnerová, Ph.D.
ředitel ústavu

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby ¹⁾;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3 ²⁾;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Ve Zlíně 16. 5. 2018



¹⁾ zákon č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, § 47 Zveřejňování závěrečných prací:

(1) Vysoká škola nevydávalečně zveřejňuje disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce, u kterých proběhla obhajoba, včetně posudků oponentů a výsledku obhajoby prostřednictvím databáze kvalifikačních prací, kterou spravuje. Způsob zveřejnění stanoví vnitřní předpis vysoké školy.

(2) Disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce odevzdané uchazečem k obhajobě musí být též nejméně pět pracovních dnů před konáním obhajoby zveřejněny k nahlížení veřejnosti v místě určeném vnitřním předpisem vysoké školy nebo není-li tak určeno, v místě pracoviště vysoké školy, kde se má konat obhajoba práce. Každý si může ze zveřejněné práce pořizovat na své náklady výpisy, opisy nebo rozmnoženiny.

(3) Platí, že odevzdáním práce autor souhlasí se zveřejněním své práce podle tohoto zákona, bez ohledu na výsledek obhajoby.

²⁾ zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 35 odst. 3:

(3) Do práva autorského také nezasahuje škola nebo školské či vzdělávací zařízení, užije-li nikoli za účelem přímého nebo nepřímého hospodářského nebo obchodního prospěchu k výuce nebo k vlastní potřebě dílo vytvořené žákem nebo studentem ke splnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školskému či vzdělávacímu zařízení (školní dílo).

³⁾ zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 60 Školní dílo:

(1) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení mají za obvyklých podmínek právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla (§ 35 odst. 3). Odpírá-li autor takového díla udělit svolení bez vážného důvodu, mohou se tyto osoby domáhat nahrazení chybějícího projevu jeho vůle u soudu. Ustanovení § 35 odst. 3 zůstává nedotčeno.

(2) Není-li sjednáno jinak, může autor školního díla své dílo užit či poskytnout jinému licenci, není-li to v rozporu s oprávněnými zájmy školy nebo školského či vzdělávacího zařízení.

(3) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení jsou oprávněny požadovat, aby jim autor školního díla z výdělku jím dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence podle odstavce 2 přiměřeně přispěl na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložily, a to podle okolností až do jejich skutečné výše; přitom se přihlídně k vyšší výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

ABSTRAKT

Cílem bakalářské práce je stanovení důležitých materiálových charakteristik využívaných při 3D tisku pomocí technologie RepRap 3D tiskárny.

Teoretická část práce se zabývá principem 3D tisku a definováním základních požadavků na použitý polymerní tiskový materiál. Dále jsou popsány principy metod vhodných pro charakterizaci polymerních tiskových materiálů.

V praktické části byly polymerní materiály testovány pomocí rentgenové difrakční analýzy, diferenciální snímací kalorimetrie, splitting indexu a mechanické vlastnosti byly stanoveny pomocí tahové a ohybové zkoušky. Byly srovnány vlastnosti vytištěných a vylisovaných tělísek, vyrobených z různých druhů polymerních tiskových materiálů, přičemž výsledky ukázaly, že vytištěné vzorky mají větší pevnost v ohybu než vzorky lisované.

Klíčová slova:

3D tisk, RepRap, FDM, Polymerní materiály, RTG, DSC, SI, Mechanické zkoušky

ABSTRACT

The aim of this bachelor thesis is to determine the important material characteristics used in 3D printing using RepRap 3D printer technology.

The theoretical part deals with the principle of 3D printing and define the basic requirements for the used printing polymer material. The principles of methods suitable for the characterization of printing polymer materials are also described.

Polymer materials were tested by X-ray diffraction analysis, differential scanning calorimetry, splitting index and mechanical properties were determined by tensile and bending test in practical part. The properties of printed and molded samples made from different types of polymer printing materials were compared and the results show that the printed samples have greater flexural strength than molded samples.

Keywords:

3D print, RepRap, FDM, Polymer materials, RTG, DSC, SI, Mechanical tests

PODĚKOVÁNÍ

Touto cestou bych chtěl poděkovat vedoucí mé bakalářské práce, paní doc. Ing. Martině Hřibové, Ph.D. za pomoc, ochotu, vstřícnost, vynaložený čas, veškeré rady a cenné informace, které mi pomohly při řešení dané problematiky. Dále bych rád poděkoval panu Ing. arch. Martinu Hřibovi a Ing. Petru Krátkému za zprostředkování použitého materiálu a za rady týkající se dané problematiky. Rád bych poděkoval i panu Ing. Martinu Bednaříkovi Ph.D. za pomoc při měření mechanických zkoušek. A v neposlední řadě bych chtěl poděkovat i své rodině a svým blízkým za veškerou pomoc a podporu.

Prohlašuji, že odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

OBSAH

ÚVOD	10
I TEORETICKÁ ČÁST	11
1 RAPID PROTOTYPING A ADITIVNÍ TECHNOLOGIE	12
1.1 RAPID PROTOTYPING	12
1.2 ADITIVNÍ TECHNOLOGIE	12
1.2.1 Stereolitografie (SLA).....	13
1.2.2 Selective Laser Sintering (SLS)	15
1.2.3 Laminated Object Manufacturing (LOM).....	15
1.2.4 Fused Deposition Modeling (FDM).....	16
2 REPRAP	18
2.1 HISTORIE REPRAP	18
2.2 GENERAČNÍ VÝVOJ REPRAP	19
2.2.1 1.0 Darwin.....	19
2.2.2 Mendel.....	19
2.2.3 Huxley	20
2.3 ROZVOJ 3D TISKU U NÁS	20
2.3.1 Josef Průša.....	20
3 CHARAKTERIZACE TISKOVÝCH MATERIÁLŮ	22
3.1 POŽADAVKY NA TISKOVÝ MATERIÁL	22
3.2 DŮLEŽITÉ TEPLoty PRO 3D TISK.....	24
3.2.1 Teplota tání.....	24
3.2.2 Teplota skelného přechodu	24
3.2.3 Teplota viskózního toku.....	24
3.2.4 Teplota tisku.....	24
3.2.5 Teplota tiskové podložky	24
3.3 POUŽÍVANÉ TISKOVÉ MATERIÁLY PRO REPRAP.....	24
3.3.1 ABS	25
3.3.2 PC/ABS	26
3.3.3 PLA	26
3.3.4 PETG.....	26
3.3.5 HiPS	27
3.3.6 Flexfill	27
3.4 ZKUŠEBNÍ METODY PRO CHARAKTERIZACI MATERIÁLŮ	28
3.4.1 Rentgenová difrakční analýza (RTG)	28
3.4.2 Diferenciální snímací kalorimetrie (DSC)	32
3.4.3 Spliting index (SI)	34
3.4.4 Tahová zkouška.....	34
3.4.5 Ohybová zkouška	37
II PRAKTICKÁ ČÁST	39
4 CÍLE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE	40
5 POUŽITÉ MATERIÁLY A JEJICH VLASTNOSTI	41

5.1	ABS	41
5.2	PC/ABS	41
5.3	PLA EXTRAFILL	41
5.4	PETG	42
5.5	HiPS	42
5.6	FLEXFILL 92A	42
6	PŘÍPRAVA VZORKŮ.....	43
6.1	PŘÍPRAVA ZKUŠEBNÍCH TĚLÍSEK	43
6.1.1	Výpočet navážky pro lisovaná zkušební tělíska.....	43
6.1.2	Lisování zkušebních tělísek	44
6.1.3	3D tisk zkušebních tělísek.....	45
7	ZKOUŠENÍ TISKOVÝCH MATERIÁLŮ.....	47
7.1	RTG DIFRAKČNÍ ANALÝZA	47
7.2	DIFERENCIÁLNÍ SNÍMACÍ KALORIMETRIE	47
7.3	SPLITING INDEX.....	47
7.4	TAHOVÁ ZKOUŠKA TISKOVÝCH STRUN	48
7.5	TŘÍBODOVÁ OHYBOVÁ ZKOUŠKA	49
8	VÝSLEDKY A DISKUZE	50
8.1	NAMĚŘENÁ DATA RTG	50
8.2	NAMĚŘENÁ DATA DSC	55
8.2.1	ABS	55
8.2.2	PC/ABS	56
8.2.3	PLA ₁	57
8.2.4	PLA ₂	58
8.2.5	PETG	59
8.2.6	HiPS	60
8.2.7	Flexfill	61
8.3	SPLITING INDEX.....	62
8.4	TAHOVÁ ZKOUŠKA TISKOVÝCH STRUN	63
8.4.1	ABS	64
8.4.2	PC/ABS	64
8.4.3	PLA ₁	65
8.4.4	PLA ₂	66
8.4.5	PETG	67
8.4.6	HiPS	67
8.4.7	Flexfill	68
8.5	TŘÍBODOVÁ OHYBOVÁ ZKOUŠKA	69
8.5.1	ABS	70
8.5.2	PC/ABS	70
8.5.3	PLA ₁ a PLA ₂ – Lisovaná tělíska	71
8.5.4	PLA ₁ – Vytištěná tělíska	72
8.5.5	PETG	75
8.5.6	HiPS	80
8.5.7	Flexfill	80
	ZÁVĚR	82

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	84
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	89
SEZNAM OBRÁZKŮ	92
SEZNAM TABULEK.....	95
SEZNAM PŘÍLOH.....	96

ÚVOD

Pro rychlé zhotovení modelu nebo sestavy pomocí trojrozměrných výpočetních návrhů se v současnosti používají metody ze skupiny rapid prototypingu, přičemž tvorba objektů se provádí pomocí aditivní technologie nebo konvekčními metodami. V současnosti se velmi rozvíjí tzv. skupina aditivních technologií, kterou lze využít pro vytvoření prostorových výrobků, pro kontrolu designu navrženého výrobku, k ověření a optimalizaci výroby, pro výrobu forem a nástrojů nebo také pro simulaci namáhání. [3] Odlišné technologické metody kladou různé předpoklady pro přesnosti vyrobených objektů na jejich mechanické vlastnosti a nezanedbatelným aspektem je cena a rychlost výroby. V předložené bakalářské práci je popsán souhrn základních aditivních technologií.

3D tisk je dynamicky se rozvíjející aditivní technologie, která má v budoucnosti velmi široké uplatnění a to: ve zdravotnictví, strojírenství, spotřebním průmyslu nebo stavebnictví, ale také v mnoha jiných profesích. 3D tisk je trojrozměrné zhotovení reálných objektů z digitálního souboru za pomoci vhodných tiskových materiálů. V aditivních procesech, jichž je 3D tisk příkladem, je požadovaný objekt získán pokládáním souvislých vrstev tiskového materiálu, dokud není celý předmět dokončen. Každá z těchto vrstev může být považována za úzce rozříznutou horizontální sekci daného objektu. [5] Vzhledem k velkým a stále rostoucím, možnostem uplatnění je důležité charakterizovat základní vlastnosti použitých tiskových materiálů a jejich výhody či limity při praktickém využití.

Tato práce se zaměřuje na popis tiskových materiálů používaných při technologii RepRap 3D tisku, což je komunitní projekt 3D tiskárny vyvíjené na principu otevřeného hardware. Název RepRap je zkratkou replicating rapid prototyper, což znamená, že tiskárna je schopná sebereplikace svých základních plastových dílů a rychlého prototypování objektů. [8]

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 RAPID PROTOTYPING A ADITIVNÍ TECHNOLOGIE

1.1 Rapid prototyping

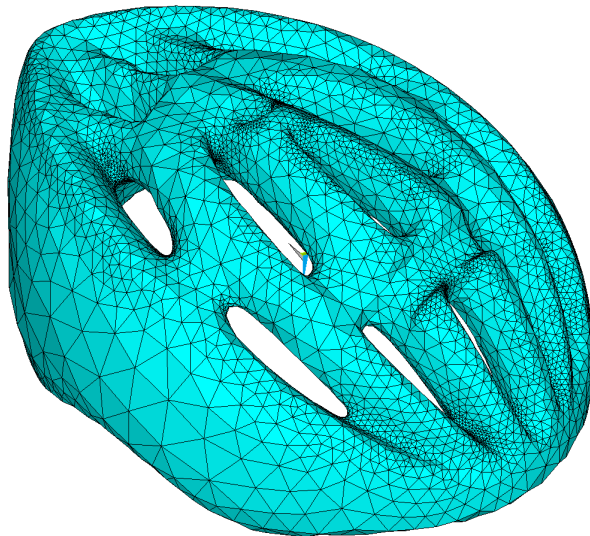
Rapid prototyping (RP) v českém překladu: rychlé prototypování, je skupina technik používaných pro rychlé zhotovení modelu nebo sestavy pomocí trojrozměrných výpočetních návrhů vytvořených v Computer-aided design softwaru (CAD). Konstrukce částí nebo sestavy se obvykle provádí pomocí aditivní technologie nebo konvekčními metodami.

Mezi hlavní výhody aditivní technologie v porovnání s konvekčními technologiemi patří rychlost výroby. Další důležitou výhodou je možnost vytvoření prototypů pro analýzu a zjištění jejich skutečných vlastností ještě před zahájením samotné výroby. I když v současné době probíhá masivní pokrok v této moderní technologii i tak se RP setkává s řadou omezení, jako je například přesnost výroby, výsledná kvalita povrchu nebo druh použitého materiálu. Aditivní technologie je totiž založena na nanášení vrstev polymeru nebo jiného vhodného materiálu (například keramika nebo vosk) za účelem vytvoření výsledného celkového objektu. Technologie konvekčních metod, která je založena na odebírání materiálu, tato konkrétní omezení víceméně nemá. [6, 32]

1.2 Aditivní technologie

Aditivní technologie charakterizuje veškerou výrobu výrobků, kde se neuvžívá konvekční metody, při které dochází k odebírání materiálu. Aditivní technologie je proces, při kterém trojrozměrný výrobek vzniká postupným nanášením jednotlivých tenkých vrstev materiálu na sebe.

Princip metody spočívá ve vytvoření virtuálního 3D modelu v konstrukčním programu např. CAD či jiném vhodném programu, nebo naskenováním trojrozměrného objektu pomocí skeneru, převedeném ve formátu, nejčastěji STL (formát zpočátku určený pro STereoLitografii). Připravená data jsou načtena do softwaru rapid prototypingu. Model je následně v softwaru virtuálně rozřezán příčnými řezy na tenké vrstvy, přičemž čím menší je tloušťka vrstvy, tím bližší je tvar hotového výrobku originálnímu 3D modelu. V programu je následně navržena podpurná konstrukce, která pomáhá k vytvoření modelu a lze ji též využít pro stavbu modelu na tiskovou desku. Formou G-kódu je připravený model ze systému virtuálně přenesen do stroje určeného ke zhotovení výrobku. [6] Software přístroje vytvoří virtuální model pomocí rovinných útvarů, většinou trojúhelníků.



Obr. 1: 3D model přilby ve formátu STL, vytvořený rovinnými trojúhelníky [24]



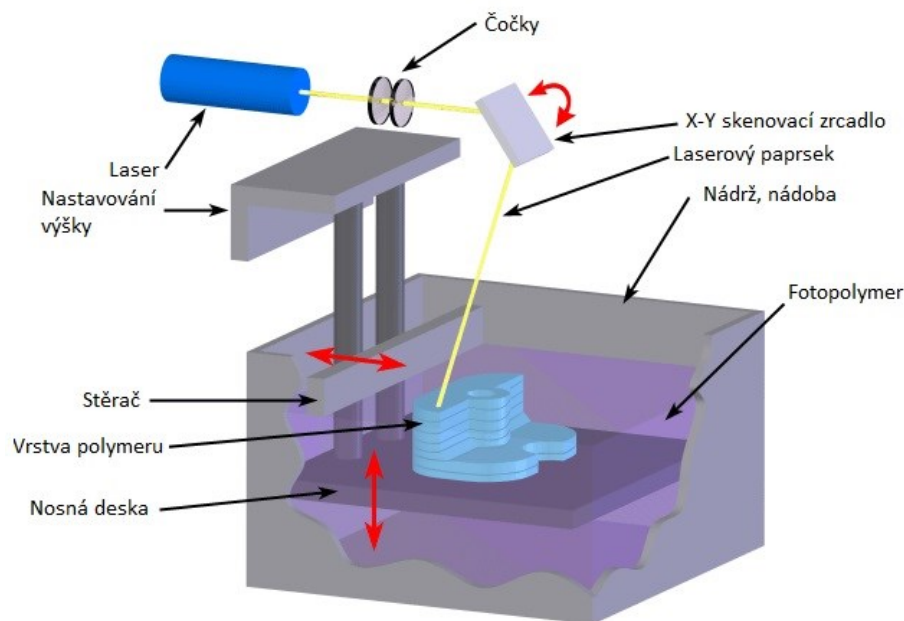
Obr. 2: Přehled typů monomerních / polymerních materiálů, způsoby zpracování a aditivní výrobní metody 3D tisku [40]

1.2.1 Stereolitografie (SLA)

První a nejstarší přesnou aditivní technologii, od které je vývoj RP odvíjen, se nazývá Stereolitografie (SLA), která může vytvářet velmi přesné díly z polymerních materiálů. Princip SLA spočívá ve vytvrzování fotopolymeru (oligomer, který působením záření reaguje za vzniku polymerního řetězce) pomocí laseru s ultrafialovým zářením (UV). Trojrozměrný objekt se vytváří na nosné desce uvnitř nádoby s fotopolymerem, kde průřezy objektu UV

laser obkresluje. Ihned po dokončení vrstvy, kvůli nerovnostem vzniklých vytvrzováním, přejede po povrchu vyrovnávací čepel tzv. stěrač, čímž se zaručí hladký povrch vrstvy. Jelikož UV laser sleduje vrstvu, oligomer fotopolymery zreaguje do polymerního řetězce, čímž přejde z tekutého do pevného stavu. Přebytečná část matrice zůstává ve formě kapaliny. Po vytvrzení vrstvy se nosná deska s objektem sníží o tloušťku vrstvy. Tento proces probíhá po opakujících se vrstvách v rozsahu 0,05 - 0,15 mm. Nanesení další vrstvy probíhá na horní část předchozí vrstvy. Proces se opakuje, dokud se nevytvoří kompletní objekt. Pro uchycení objektu na nosnou plochu se využívají podpůrné konstrukce, které trojrozměrný objekt zafixují a zabrání případnému zřícení při vytvrzování. Podpůrné konstrukce jsou voleny tak, aby se daly snadno odstranit a nenarušily výsledný produkt. Po dokončení vytvrzování se produkt vyjme a očistí od přebytečného nevytvrzeného oligomeru. [4, 33] Dodatečně může ještě dojít k dokončení fotopolymerace pod UV lampou. Tím se dokončí síťování a hotový výrobek se vytvrdí.

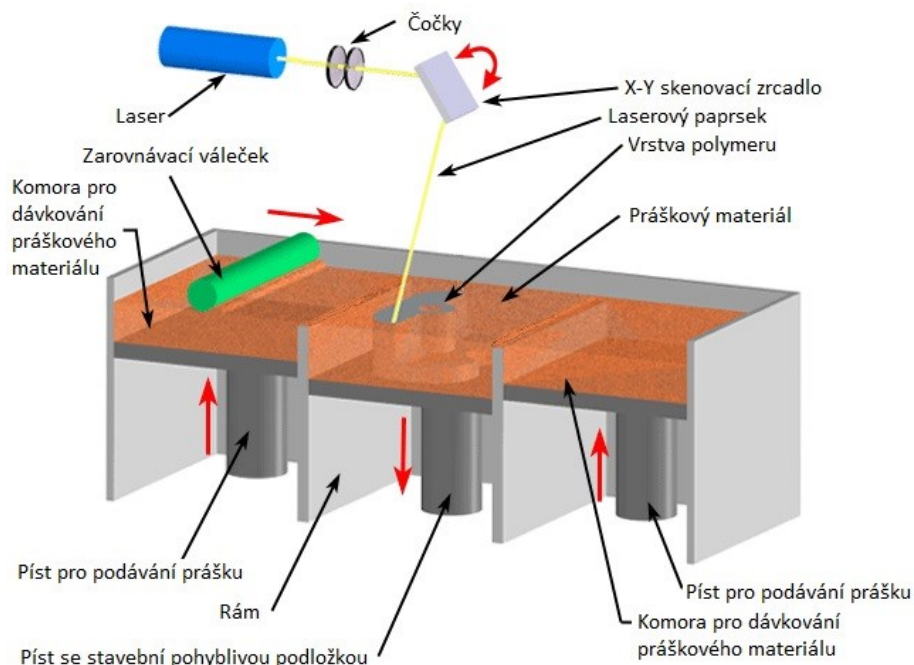
Výhodou SLA technologie je přesnost výroby výrobků s kvalitním povrchem. Další výhodou je možnost použití přebytečného fotopolymery v další vrstvě. Pro barevné výrobky se používá barvený kapalný fotopolymer. Na druhou stranu se při této technologii najdou i nevýhody, jako je nutnost stavby podpůrných konstrukcí s následným ručním opracováním. [4, 6]



Obr. 3: Princip metody Stereolitografie [33]

1.2.2 Selective Laser Sintering (SLS)

Technologie Selective Laser Sintering (v českém překladu: selektivní spékání laserem) je založena na spékání práškových materiálů pomocí laseru. Používají se takové materiály, které lze uskladnit v podobě prášku. Sintrovaný materiál nemusí být polymerní, lze použít i kov či keramiku. Tisk objektu probíhá v nádobě, kde se laserem spéká prášek. Na rozdíl od technologie SLA nemusí být použit laser s UV zářením, protože použitý prášek roztaví vysoká teplota. Tavenina se sline a následně po vychlazení přejde do pevného stavu a tím se vytvoří výsledný slinutý produkt. Prášek, který přebývá, se odstraní a může se použít při dalším tisku, což je jedna z výhod této aditivní metody. Velkým pozitivem je vysoká přesnost výroby. [4, 6]

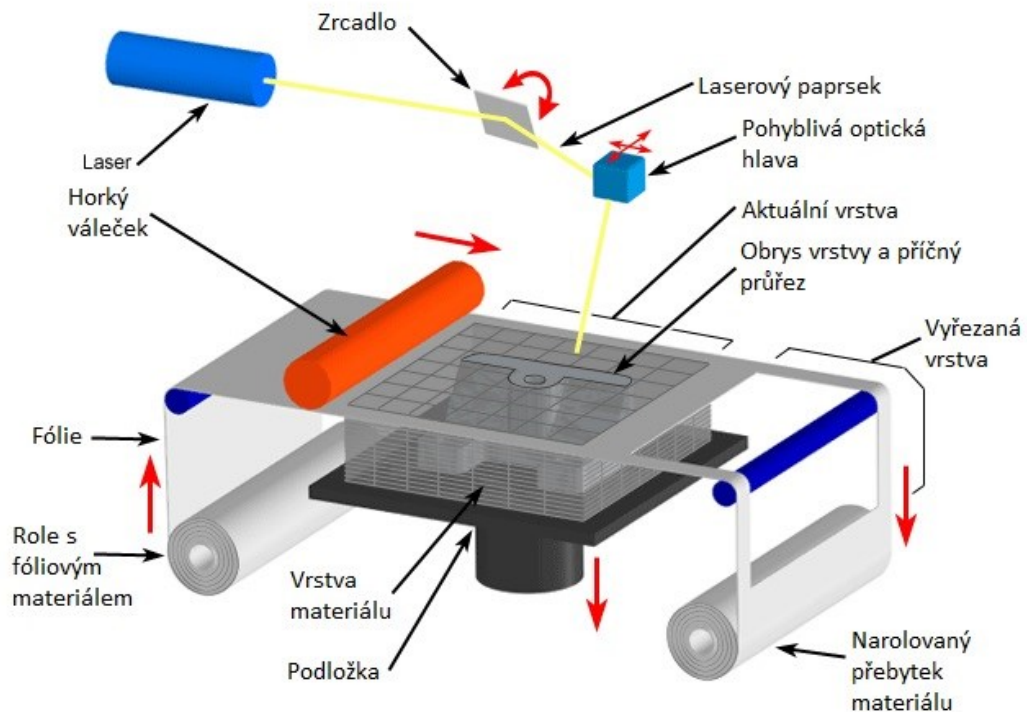


Obr. 4: Princip metody Selective Laser Sintering [34]

1.2.3 Laminated Object Manufacturing (LOM)

Metoda Laminated object manufacturing používá jako tiskový materiál tenkou plastovou fólii o tloušťce 0,2 mm. Fólie je při každém kroku rozvinuta po celém pracovním prostoru a zažehlena horkým válečkem. Po zažehlení na již hotovou předchozí vrstvu se za pomoci laseru nebo nože vyřeže do fólie obrys vrstvy. Výhodou popsané metody je především rychlost tisku, možnost výroby velkých částí, použití různých druhů materiálů a nízké náklady na výrobu. Nevýhodou je odpad, který vznikne při vyříznutí vrstvy. Jako tiskový materiál se

často při této metodě používá i papír, který je z jedné strany potažen polyethylenem sloužícím jako pojivo u zažehlení. [4, 38]



Obr. 5: Princip metody Laminated Object Manufacturing [34]

1.2.4 Fused Deposition Modeling (FDM)

V současnosti nejlevnější metodou 3D tisku na trhu je Fused Deposition Modeling (FDM) nebo také Fused Filament Fabrication (FFF) [51]. Díky nízkým nákladům a jednoduchosti tisku je FDM velmi využívána i mezi domácími uživateli. [4]

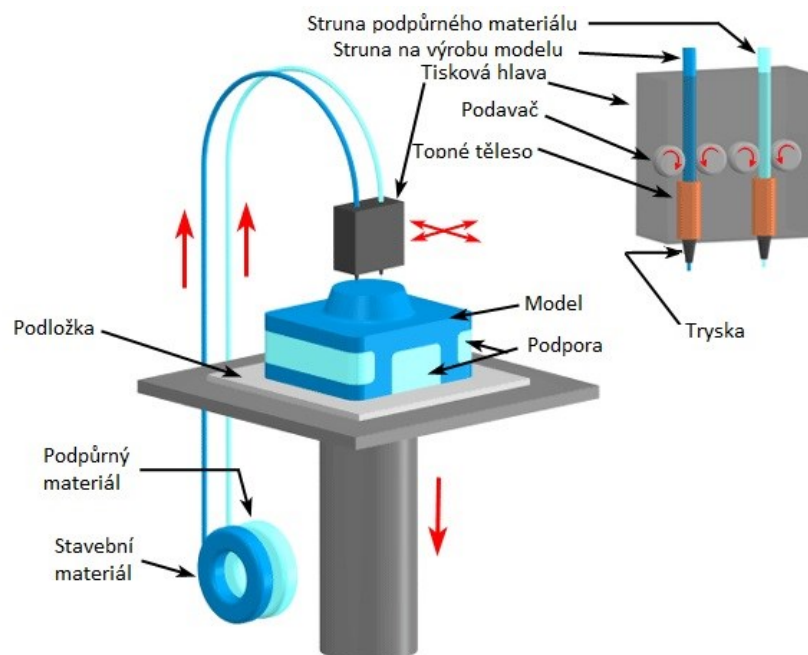
Princip metody FDM spočívá v pohybu plotru ovládajícím pohyb tiskové hlavy nanášející roztavený polymer ve dvou osách. Polymerní materiál, který je přiváděn do tiskové hlavy pomocí ozubeného kola spojeného buď s převodovkou, nebo s hnacím strojem, může být v podobě prášku, granulátu nebo struny. V tiskové hlavě neboli extrudéru se za pomoci laseru, elektrické cívky nebo jiného topného tělesa taví tiskový materiál až do skoro tekutého skupenství a poté se tryskou po vrstvách nanáší tavenina na tiskovou podložku, kde vykresluje 3D model. Pro udržení konstantní teploty je uvnitř trysky teploměr, který snímá teplotu vytlačované taveniny. Použitá teplota závisí na druhu vytlačovaného polymeru. U semikrystalických polymerů se používá teplota vyšší než je teplota tání a u amorfních polymerů musí teplota vytlačování přesáhnout teplotu tečení. [1, 4]

Přechod taveniny do pevného stavu nastává ihned poté, co tavenina vytéká z trysky a naváže se na vytisknutou vrstvu níže. Po ochlazení všech vrstev vzniká hotový výrobek.

Často se při 3D tisku modelu FDM technologií využívá podpurných konstrukcí z lehce odstranitelných nebo lehce rozpustných materiálů. Jako podpurný materiál se nejčastěji používá HiPS (High Impact PolyStyren), který se dá snadno rozpustit v lemonsolu, což je speciální chemický přípravek určený k jeho rozpuštění, obsahující biodegradabilní materiál 1-methyl-4-prop-1-en-2-yl-cyklohexen (známý jako Limonen), vyrobený z oleje získávaného z citrusových slupek. [43]

Díky poměrně silným mezimolekulárním vazbám mezi jednotlivými tiskovými vrstvami lze FDM použít pro výrobu funkčních dílů. Nejčastějšími tiskovými materiály, které se při této technologii používají, jsou struny z ABS (Akrylonitril-butadien-styren), PLA (polylactid acid), PET (Polyethylentereftalát), PC (Polykarbonát), aj., o konstantním průměru struny 1,75 mm, 2,85 mm, 2,95 mm nebo 3 mm. Nevýhodou FDM technologie je nekvalitní povrch výrobku. Na vytištěných výrobcích lze vidět jednotlivé tištěné vrstvy a na vodorovných plochách je viditelná dráha po nástroji. To znamená, že se musí výrobek dále opracovávat. [7, 9]

FDM technologie je nejčastěji využívána RepRap 3D tiskárnami.



Obr. 6: Princip metody Fused Deposition Modeling [34]

2 REPRAP

3D tiskárnou, využívající strunový materiál pro tisk 3D modelu je RepRap. Model je vytištěn přímo z 3D CAD softwaru.

Název RepRap pochází z anglického replicating rapid prototyper neboli schopnost sebe-replikace a rychlého prototypování objektů. Původním cílem projektu pocházejícího z Velké Británie bylo vyvinout takovou FDM 3D tiskárnu, která by si mohla většinu součástek vytisknout sama, což se postupem času podařilo. [8, 35]

2.1 Historie RepRap

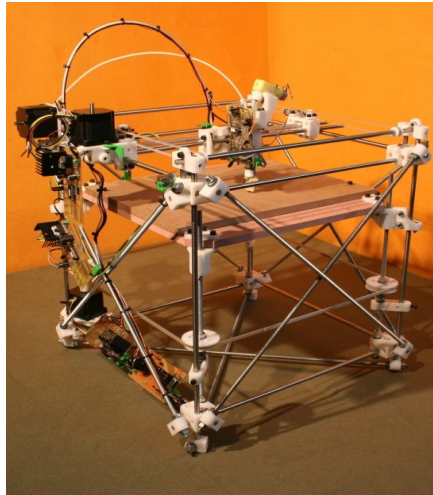
Stručné shrnutí historického vývoje 3D tiskáren [35]:

- 23. března 2005 - problematikou se začal zajímat Dr. Adrian Bowyer z Univerzity v Bathu ve Velké Británii.
- 13. září 2006 - úspěšný tisk své první části, použitý pro stavbu další RepRap 3D tiskárny, prototypem RepRap 0.2
- 9. února 2008 - tisk více než poloviny součástek pomocí RepRap 1.0 "Darwin"
- 14. dubna 2008 - tisk prvního výrobku pro koncové uživatele
- 29. května 2008 - stvoření druhé tiskárny pomocí RepRap
- 13. říjen 2009 - vytvoření RepRap 2.0 „Mendel“ - druhá generace tiskáren
- Srpen 2010 - konstrukce RepRap „Huxley“ - třetí generace
- Září 2012 - zkonstruování Prusa i3

2.2 Generační vývoj RepRap

2.2.1 1.0 Darwin

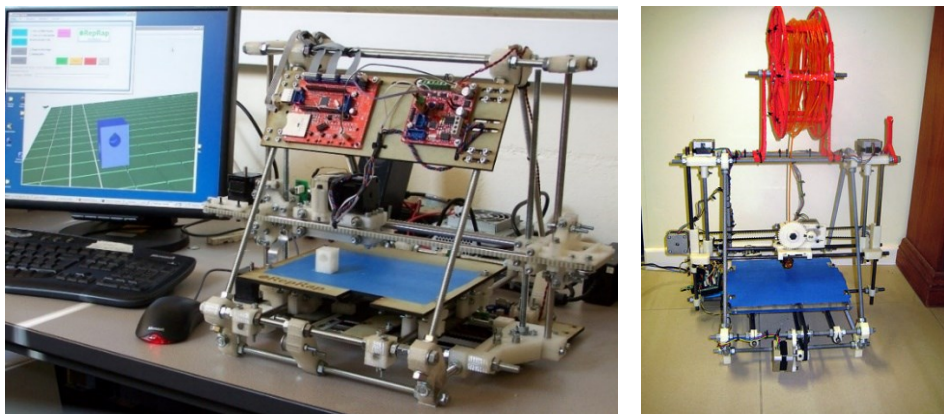
V roce 2008 se objevila první generace RepRap 3D tiskáren používající FDM technologii a byla také vytvořena první 3D tiskárna na světě nesoucí název RepRap 1.0 Darwin, která měla schopnost částečné sebe-replikace.[8]



Obr. 7: RepRap 1.0 Darwin [8]

2.2.2 Mendel

Mezi populární tiskárny se zapsala tiskárna Mendel, která byla dále v posledních letech vylepšena. Nejvýraznější vylepšení vytvořil Josef Průša, když postavil levnější variantu Prusa Mendel, která je vyobrazena na Obr. 8. [8]



Obr. 8: Původní 3D tiskárna Mendel a levnější varianta 3D tiskárny Prusa Mendel [8]

2.2.3 Huxley

Jednodušší varianta 3D tiskárny Mendel, která se skládá z menšího množství součástí je RepRap Huxley. Společnost Professional Ltd., kterou založil Adrian Bowyer, v současnosti vyvinula jednu z nejčastěji stavěných modelů tiskáren a tou je RepRapPro Huxley. [8]

2.3 Rozvoj 3D tisku u nás

V České republice se 3D tisk začal objevovat už v polovině 90. let 20. století, kdy brněnská společnost MCAE Systems začala vyvíjet a instalovat 3D tiskárny do různých společností, jako jsou například Škoda Auto nebo Tescoma. [5]

Mezi hlavní představitele, kteří se začali touto problematikou zabývat, patří Josef Průša, který do dnešní doby zhotovuje a vylepšuje RepRap 3D tiskárny.

2.3.1 Josef Průša

Josef Průša je český vývojář, který od roku 2009 přispívá ke vzniku a rozvoji RepRap 3D tiskáren.

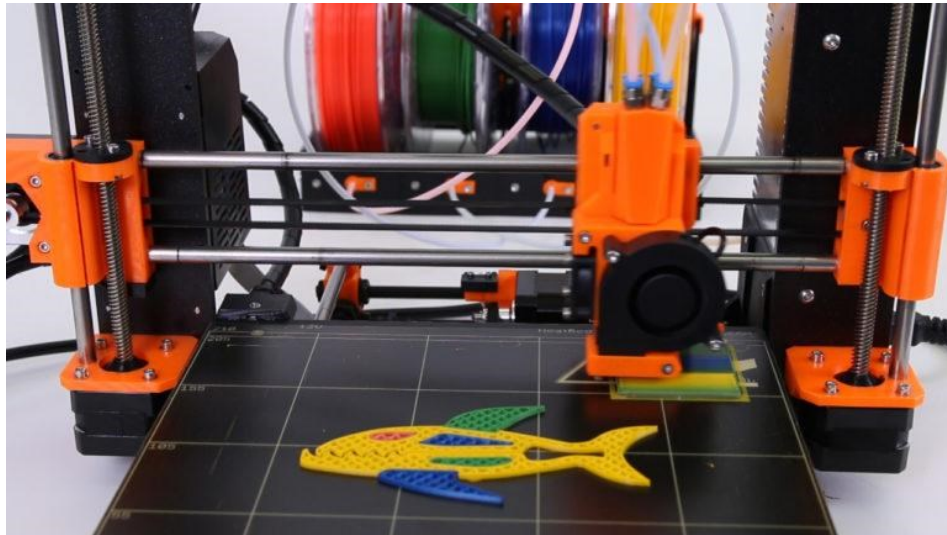
Jeho nejznámější a nejčastěji využívanou osobní 3D tiskárnou je model Prusa i3.



Obr. 9: Prusa i3 [8]

Současným rozvojem v oblasti RepRap 3D tiskáren je možnost 3D tisku v různém spektru barev.

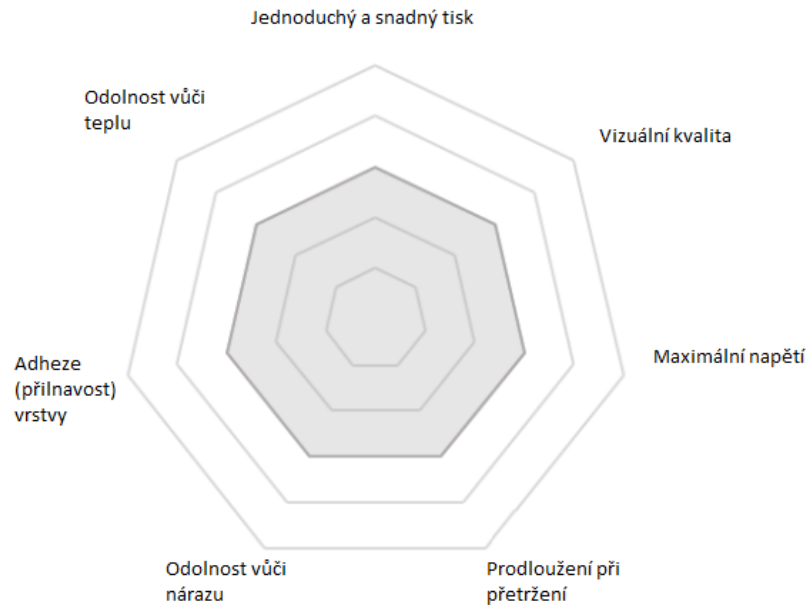
Pro možnost barevného 3D tisku sestrojil Josef Průša barevnou 3D tiskárnu Original Prusa i3 MK2 Multi Material upgrade, která může tisknout v jednotlivých vrstvách 4 různé barvy pomocí 4 strunných polymerních materiálů. Nicméně novinkou současnosti je už i tisk v 5 různých barevných kombinacích. [7]



Obr. 10: Barevný 3D tisk na Prusa i3 MK2 Multi Material upgrade [22]

3 CHARAKTERIZACE TISKOVÝCH MATERIÁLŮ

3.1 Požadavky na tiskový materiál



Obr. 11: Požadavky na vlastnosti materiálů [26]

Požadované vlastnosti materiálů, podle kterých se vybírá vhodný materiál pro 3D tisk objektu, jsou na Obr. 11, přičemž:

- **Snadnost tisku:** přilnavost materiálu k tiskové podložce, maximální rychlost tisku, frekvence neúspěšných výtisků, přesnost průtoku, snadné vložení do 3D tiskárny apod.
- **Vizuální kvalita:** vypovídá o tom, jak dobře vypadá vytištěný výrobek.
- **Maximální napětí:** maximální napětí, které model může mít před zdeformováním, když je pomalu vytahován.
- **Prodloužení při přetržení:** maximální délka předmětu je prodloužena před zdeformováním.
- **Odolnost proti nárazu:** schopnost materiálu odolávat velkým nárazům.
- **Adheze vrstev (izotropie):** vypovídá o adhezi mezi vrstvami tiskového materiálu. Je spojena s "izotropií" (tj. jednotnost ve všech směrech), tedy čím lepší je adheze vrstev, tím je izotropnější objekt.
- **Tepelná odolnost:** maximální teplota, kterou materiál snese, než se zdeformuje [26]

Kvalita výrobků pomocí technologie 3D tisku je ovlivněna použitým materiálem, který může mít pozměněné vlastnosti už od výroby. Vlastnosti jednotlivých materiálů se mohou změnit už i při výrobě tiskových strun, to má za následek přidání přísad na úpravu jednotlivých vlastností materiálů.

Pro tisk výrobku je zapotřebí tzv. filament tj. tisková struna navinutá na cívku, která se v trysce pomocí topného tělesa taví, tím přechází do plastického stavu a po ochlazení opět ztuhne. Tisková struna je navržena v konstantní tloušťce (1,75; 2,85; 2,9; $3 \pm 0,5$ mm) a v různém barevném provedení.

Pro správnost 3D tisku by měl být zachován konstantní průměr tiskové struny po celou dobu 3D tisku, přičemž pro dobrý tok roztaveného materiálu musí být tiskové struně umožněn snadný přístup do rozehráté trysky a zároveň se tisková struna musí dotýkat stěny rozehráté trysky, kvůli přenosu tepla z topného tělesa k roztavení struny.

Pro podpurné konstrukce se volí takové materiály, které lze snadno odstranit za pomoci rozpouštědla lemonsol, nebo vody. Po namočení vytištěného dílu v lemonsolu podpurný materiál změkne a pak jej lze snadno odstranit. Někdy se také jako podpurný materiál využívá tiskový materiál PVA (Polyvinylalkohol), který se rozpouští ve vodě. [41] Volba podpurných materiálů závisí na typu konstrukčního materiálu. Podpurný materiál PVA je často využíván v kombinaci s ABS, PLA nebo s ASA (akrylonitril-styren-akrylát), podpurný materiál HiPS se používá v kombinaci s PC. Důvodem využití podpurných materiálů ve zmíněných kombinacích s konstrukčními materiály jsou obdobné teploty (především topné desky) potřebné k 3D tisku.



Obr. 12: Tiskové struny [44]

3.2 Důležité teploty pro 3D tisk

3.2.1 Teplota tání

Teplota tání (T_m) je fázový přechod charakteristický pro krystalické a semikrystalické polymery. V oblasti této teploty přechází krystalický polymer kvůli rozpadu uspořádané části své hmoty z tuhé fáze do kapalné. Nad teplotou tání přechází polymer do taveniny. [11]

3.2.2 Teplota skelného přechodu

Teplota skelného přechodu (T_g) značí takovou teplotu, kdy dochází k uvolnění pohybů zamrzlých segmentů makromolekulárního řetězce. Pod teplotou skelného přechodu je polymer tvrdý, křehký a má vysoký modul pružnosti - daný polymer je ve sklovitém stavu. Nad teplotou skelného přechodu je polymer v kaučukovitém stavu. [11]

3.2.3 Teplota viskózního toku

Při teplotě viskózního toku (T_f) ztrácí amorfní polymer své kaučukovité vlastnosti a mění se na viskózní kapalinu. [11]

3.2.4 Teplota tisku

Teplota tisku (T_p) je vyšší, než je teplota tání.

3.2.5 Teplota tiskové podložky

Teplota tiskové podložky je nižší, než je teplota skelného přechodu daného polymeru. Využívá se proto, aby se snížilo riziko zkroucení tištěného modelu.

3.3 Používané tiskové materiály pro RepRap

Pro technologii FDM tisku na RepRap 3D tiskárně se v současnosti nejčastěji používají ABS, ASA, PLA, PC, PMMA (polymethylmethakrylát), HiPS, PET, aj.

Pro tuto bakalářskou práci byly vybrány následující tiskové materiály určené pro zkoušení daných materiálových vlastností: ABS, PC/ABS, PLA, PETG, HiPS a Flexfill. Jejich vlastnosti jsou charakterizovány níže.

3.3.1 ABS

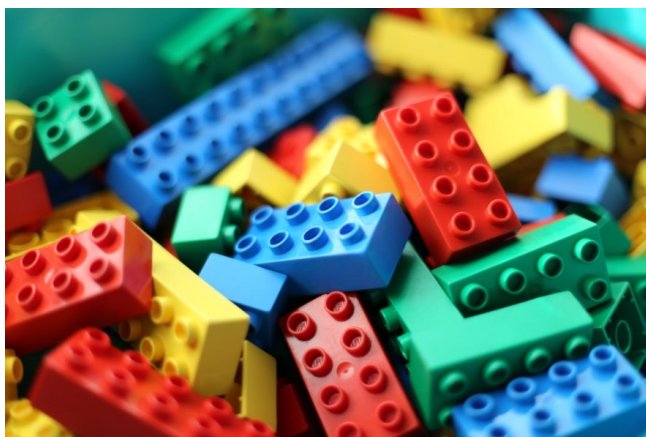
Amorfní termoplastický kopolymer vytvořený kopolymerací akrylonitrilu, styrenu a butadienu, kde akrylonitrilová složka napomáhá ke zvýšení chemické odolnosti a butadienová ke zvýšení houževnatosti materiálu. [36, 37]

ABS patří mezi nejpoužívanější materiály 3D tisku a to kvůli svým vhodným mechanickým vlastnostem. Mezi jeho výhody patří tuhost, odolnost proti nárazům, pevnost v tahu, pevnost v ohybu a zdravotní nezávadnost. [36, 37]

ABS odolává nízkým i vysokým teplotám a odolává i široké škále kyselin a chemikálií. ABS lze zpracovávat do 280 °C, což umožňuje snadné opracování broušením, vrtáním, soustružením, řezáním, stříháním a dalšími metodami. Aplikace ABS je například v automobilovém průmyslu, pro sportovní potřeby, kancelářské potřeby, potrubní systémy nebo pro výrobu lega. [12, 36]

ABS je používán pro tisk menších a jednodušších dílů o rozměrech kolem 60-80 mm, a to kvůli většímu vnitřnímu pnutí, které vzniká při chladnutí tištěných dílů. Díly o větších rozměrech mohou praskat. [19, 42] Praskání se předchází tiskem ve vytápěné komoře (heat chamber), kde se vytištěný materiál udržuje při teplotách blízkých teplotě skelného přechodu, aby nedocházelo k nežádoucímu praskání nebo tvarovým deformacím. To je ale záležitost profesionálních tiskáren, u RepRap 3D tiskáren se využívá jen zřídka, taková konstrukce je složitá, poměrně drahá a náročná na použité součástky, které musí vyšší teploty dlouhodobě snášet.

Při tisku je vždy nutno využít základní mřížku, která brání odtržení i malého výrobku od tiskového stolu. [19, 42]



Obr. 13: Lego [17]

3.3.2 PC/ABS

Jedná se o směs polykarbonátu (PC) a akrylonitril-butadienu-styrenu (ABS). Díky ABS má výborné zpracovatelské vlastnosti a díky přítomnosti PC má velmi dobré mechanické vlastnosti a odolnost proti nárazu a teple. PC/ABS, díky synergickému efektu, vykazuje vynikající odolnost vůči nárazům za nízkých teplot. [18]

Směs PC/ABS je vhodná pro aplikace, které vyžadují vysokou teplotu průhybu při zatížení materiálu tj. při 95-125 °C a zároveň vyžaduje-li se dobrá tuhost a pevnost. PC/ABS má za nízkých teplot vynikající tuhost a proto se často využívá pro výrobky, které jsou vystavené velkému teplotnímu rozsahu. [18]

3.3.3 PLA

Kyselina polymléčná je biopolymer tj. biologicky rozložitelný polymer, který je vyroben z obnovitelných surovin, jako je například kukuřičný škrob nebo cukrová třtina. Jedná se o křehký polymer s vyšší povrchovou tvrdostí. Kromě využití v 3D tisku se ještě využívá pro biodegradabilní obalový materiál, plastové fólie, plastové kelímky nebo plastové láhve. [14]

PLA patří vedle ABS k nejpoužívanějším materiálům pro 3D tisk. Ve srovnání se PLA oproti ABS snadněji a rychleji zpracovává za stejných výchozích podmínek, avšak výrobky z PLA neodolávají vyšším teplotám tak jako z ABS. PLA při 60 °C (při teplotě skelného přechodu) ztrácí mechanickou pevnost. Další výhodou je nižší náchylnost k deformacím a vadám vlivem chlazení po vytištění materiálu, čímž se ztrácí nutnost využití vyhřívané podložky. Hotové výrobky jsou z materiálového hlediska v porovnání s ABS lesklejší, ale mají nižší pružnost. [6, 15]

3.3.4 PETG

PET je jeden z nejvíce využívaných polymerních materiálů na světě, nejčastěji se využívá k výrobě láhví, nádob, obalů apod.

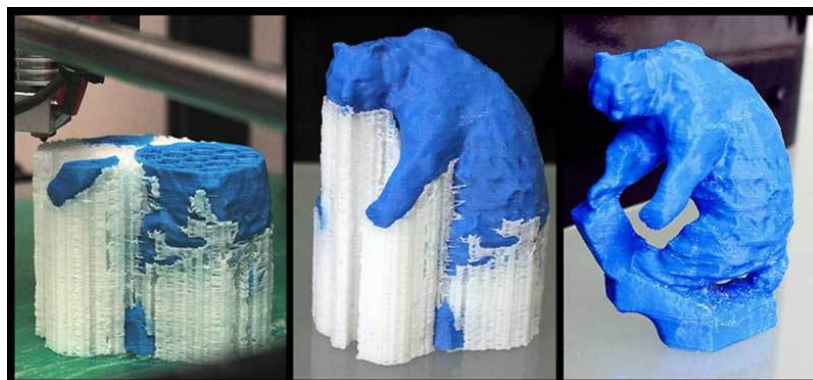
PET-G je kopolymer PET a modifikovaného glykolu (polyethylentereftalát-1,4-cyklohexylendimethylentereftalát). Glykol zlepšuje některé vlastnosti oproti čistému PET. Vlákno z PETG se oproti PET snadněji tiskne, je méně křehké a je vysoce odolné vůči nárazu i teplotám. Adheze (přilnavost) mezi jednotlivými vrstvami je vynikající, riziko zkroucení a výrazného smrštění není velké. Nevýhodou PETG oproti PLA je náchylnost na poškrábání. [47]

3.3.5 HiPS

Houževnatý kopolymer složený z dvoufázové struktury, kterou tvoří kaučuk a polystyren. Spojení tuhosti plastu a houževnatosti kaučuku má vliv na dosažení zajímavých materiálových vlastností. Zvyšujícím se obsahem kaučuku se u HiPS oproti běžnému polystyrenu (který má kolem 20 kJ.m^{-2}), zvyšuje jeho rázová houževnatost na přibližně $40 - 80 \text{ kJ.m}^{-2}$. Kvůli náchylnosti na stárnutí, které se sice dá stabilizovat při jeho výrobě, má však HiPS omezenou využitelnost a není doporučen pro venkovní užívání. [36]

Mezi další výhody HiPS patří dobrá rozměrová stabilita. HiPS je ekonomicky výhodný, lehce vyrobitelný a snadno obrobitelný a to kvůli rostoucí rázové houževnatosti, při které klesá tepelná odolnost, tvrdost a také bod měknutí. [13, 36]

HiPS se též využívá jako podpůrná konstrukce, která je pomocí rozpouštědla (lemonosol) snadno odstranitelná. Jako podpůrná konstrukce se nejčastěji HiPS používá pro ABS a jiné plasty, které nejsou tak lehce rozpustné.



Obr. 14: Tisk výrobku s podpůrnou konstrukcí [31]

3.3.6 Flexfill

Jedná se o elastické flexibilní vlákno vytvořené na bázi plastického polyuretanu. Termoplastický polyuretan (TPU) je elastomer skládající se z lineárně segmentovaných blokových kopolymerů, složených z tvrdých a měkkých segmentů. Charakteristickým znakem TPU je především pružnost. Dalšími vlastnostmi jsou odolnost vůči oleji, mastnotě a oděru. [45]

Díky vytvoření Flexfillu na bázi TPU, strunový materiál charakterizuje pružnost a měkký povrch výsledného výrobku. Teplota tisku je kolem $210 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

3.4 Zkušební metody pro charakterizaci materiálů

3.4.1 Rentgenová difrakční analýza (RTG)

RTG difrakční analýza, jinak taky nazývána rentgenová krystalografie, slouží k identifikaci krystalických látek (minerálů) ve zkoumaném vzorku. Dále se taky používá k určení struktury rentgenovým zářením krystalických materiálů, určení množství krystalické fáze a k určení poměru jednotlivých krystalografických fází [20, 27].

Používá se pro kvalitativní stanovení složení materiálu. Pro kvantitativní stanovení složení doplňují RTG analýzu i jiné metody, a to např. DTA analýza (Diferenční termická analýza). Z faktu, že polymer není 100% krystalicky uspořádaný, vyplývá, že každý polymer může být i z malé části amorfni. Velký vliv na mechanické vlastnosti polymeru může mít právě poměr krystalické a amorfni struktury. Proto je důležité sledovat průběh krystalizace a poměr krystalické a amorfni struktury v polymerních vzorcích. [27]

RTG difrakční analýza se využívá pro práškový vzorek, ale může se použít i pro vzorek pevné konzistence (např. zkušební tělísko, struna atp.).

RTG záření

Rentgenové záření je proud fotonů, které ionizují elektromagnetickým zářením o energii desítek až stovek keV (kilo-elektronvolt). Rozsah vlnové délky je v intervalu $10^{-8} - 10^{-12}$ m (v krystalové mřížce je vzdálenost atomů cca 10^{-10} m). Za jednotkou energie záření se zpravidla uvádí elektronvolt – značka: eV. Pomocí vlnové délky se rozděluje na měkké tj. vlnová délka $10^{-12} - 10^{-10}$ m a na tvrdé tj. $10^{-10} - 10^{-12}$ m. Dále se může rentgenové záření rozdělovat podle vzniku a to na charakteristické nebo na brzdné. [27, 29]

V případě Brzdného záření při dopadu elektronu na povrch zkoumané látky se vytrácí z elektronu energie. Tento jev způsobuje vyzařování elektromagnetických vln. Záznam, který se tímto získá, charakterizuje spojité spektrum. [29]

Vznik charakteristického záření je dán předáváním většího množství energie. Tím dochází k uvolnění vnitřního elektronu. Na uvolněné místo je dosazen elektron pocházející z vyššího orbitalu, který při tom doprovází uvolnění energie. Charakterizací daného materiálu vzniká čárové spektrum. [29]

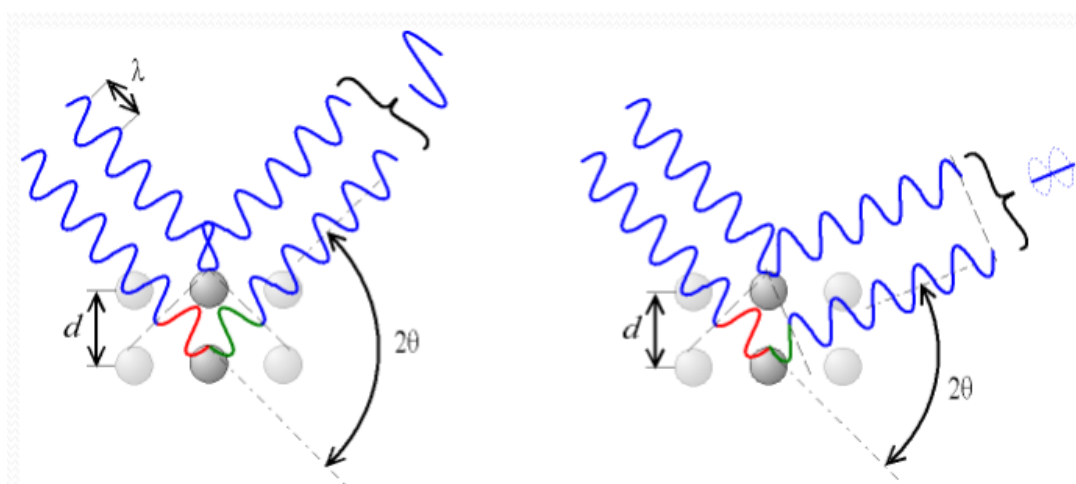
Rentgenové záření při interakci s hmotou může být jí absorbováno, může dojít k difrakci nebo k sekundární emisi (fluorescenci) Pro vyhodnocení krystalické struktury není absorpce

významná. Difrakce je určena pro strukturní analýzu, sekundární emise se využívá pro prvkovou analýzu. [29]

Jako zdroj RTG záření se v oblasti analýzy vzorku používá rentgenová lampa (tzv. Rentgenka). Je to skleněná trubice vybavená katodou a anodou, v níž je vysoké vakuum. Žhavicí katoda (vyrobená z wolframu) připojená k zápornému pólu vysílá proud elektronů. Elektronů dopadají vysokou rychlostí na anodu, protože jsou urychlovány vysokým napětím. Nepatrná část se při dopadu na anodu přemění na rentgenové záření (tj. méně než 1%). U zbylých se jejich kinetická energie přemění na teplo. [27]

Princip RTG difrakce

Principem je ohyb (difrakce) paprsků a jejich interference [29]. Monochromatický rentgenový paprsek s vlnovou délkou λ dopadá na mřížkové roviny v krystalu pod úhlem θ , difrakce nastane pouze tehdy, když vzdálenost mezi paprsky odraženými od po sobě jdoucích rovin se liší o úplný počet n vlnových délek.



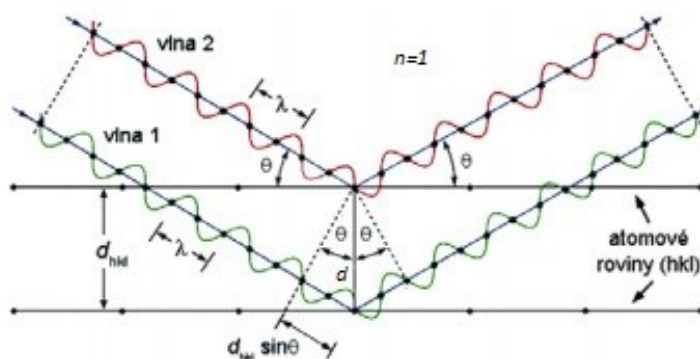
Obr. 15: Vlnová interference [29]

Braggova podmínka

Dráhový rozdíl vzniká při difrakci elektronů s vlnovou délkou λ na krystalové mřížce, při kterém vzniká fázový posun vlnění (viz Obr. 15). Poté začne docházet k interferenci. Na stínítku lze sledovat interferenční maxima, jejichž umístění je popsáno Braggovou podmínkou [48]:

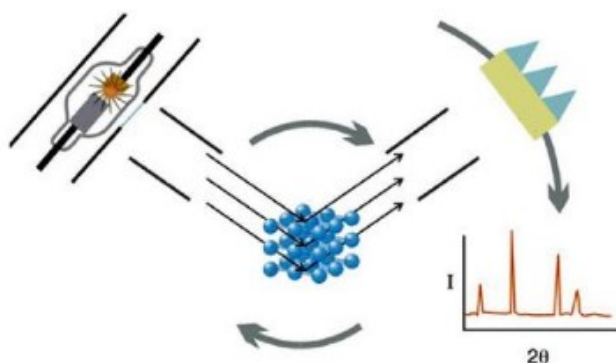
$$2 \cdot d_{hkl} \cdot \sin\theta = n \cdot \lambda \quad (1)$$

Kde d_{hkl} představuje vzdálenost meziatomových rovin (hkl), θ je difrakční úhel, řád reflexe $n = 1, 2, 3$ a λ charakterizuje vlnovou délku. [48]



Obr. 16: Grafické znázornění Braggovy podmínky [48]

Obr. 17 jednoduše znázorňuje princip rentgenové analýzy. Rentgenová lampa, která je na obrázku znázorněna vlevo, vysílá rentgenové paprsky dovnitř zkoumaného materiálu. Pokud je tento materiál částečně krystalický, tak se tyto paprsky odrazí na jeho atomech, které tvoří krystalickou mřížku a dále jsou snímány vyhodnocovacím zařízením sledujícím intenzitu dopadajícího záření pod jednotlivými úhly dopadu. V závislosti na typu detekce je buď získán tzv. pole image, nebo software převede RTG difrakční obrazce do grafických závislostí intenzity záření na úhlu dopadu. Pokud došlo k intenzivní difrakci na krystalické mřížce, pak se v záznamech zjeví buď kruh (v případě pole image) nebo v grafu pík (grafická závislost). Když se jedná o strukturu amorfni, tak lze pozorovat pouze široký a málo intenzivní pík, tzv. amorfni pozadí.



Obr. 17: Princip RTG záření [27]

Velikost a šířka píku

Šířka i intenzita píku závisí na rozměrech krystalu. Pokud zkoušený materiál obsahuje velké krystaly, pak dochází k intenzivní difrakci, která je na záznamech pozorována jako vysoký a úzký pík. Z šířky píku v polovině jeho maximální intenzity je možno stanovit velikost krystalitů podle Sherrerovy rovnice:

$$\tau = \frac{K \cdot \lambda}{\beta \cdot \cos \theta} \quad (2)$$

Kde τ je střední velikost uspořádaných (krystalických) domén, které mohou být menší nebo rovné velikosti zrna; K je bezrozměrný tvarový faktor, jehož hodnota je blízká jedničce. Tvarový faktor má typickou hodnotu asi 0,9, ale mění se se skutečným tvarem krystalitu; λ je rentgenová vlnová délka; β je čára zvětšená v polovině maximální intenzity v radiánech, někdy také označováno jako $\Delta (2 \theta)$ a θ je Braggův úhel. [50]

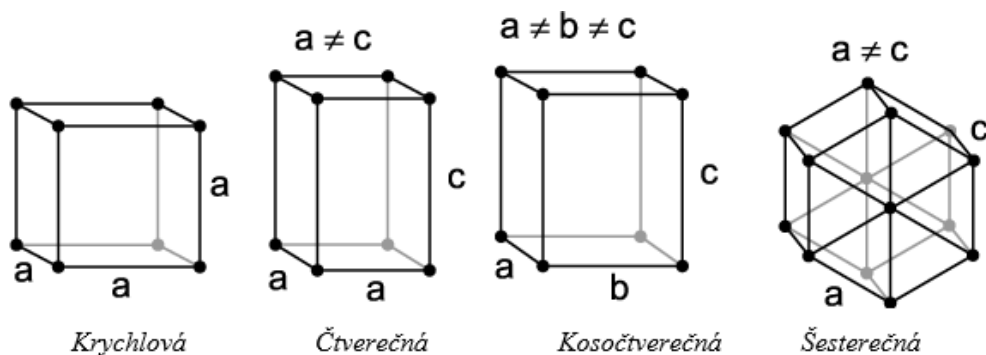
Krystalografické soustavy

Krystalová mřížka je základem vnitřní struktury všech krystalických materiálů. Krystalická mřížka je vytvořena z několika opakujících se elementárních buněk. Elementární buňka je nejmenší geometrický element vytvořený z atomů. Z toho vyplývá, že krystalická mřížka je vytvořena pravidelným geometrickým uspořádáním atomů v prostoru. Dle parametrů elementární buňky (tvar, rozměr, poloha částic a velikost úhlů) se krystalové mřížky dělí do 7 základních soustav. [27, 28]

7 základních soustav krystalových mřížek [28]:

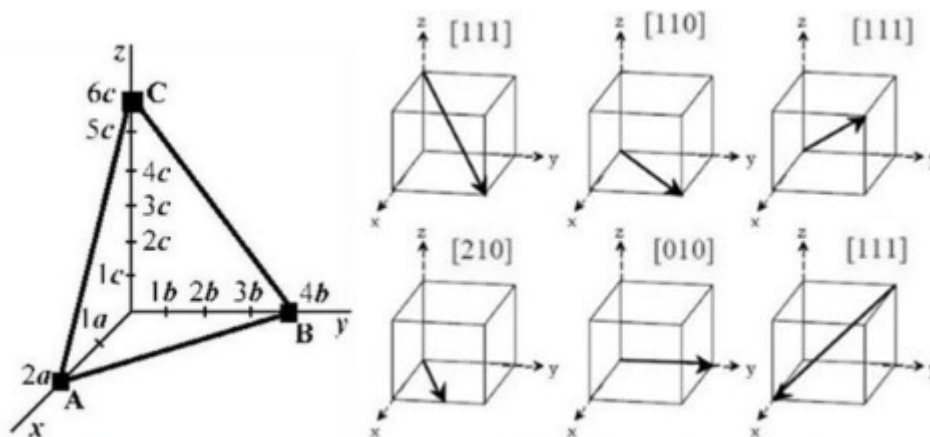
1. Krychlová (kubická)
2. Klencová (trigonální, romboedrická)
3. Šesterečná (hexagonální)
4. Čtverečná (tetragonální)
5. Kosočtverečná (rombická, ortorombická)
6. Jednoklonná (monoklinická)
7. Trojklonná (triklinická)

Některé příklady krystalových mřížek:



Obr. 18: Krystalové mřížky [28]

Pro hodnocení a popis vlastností v různých směrech krystalografických rovin se využívá Millerových indexů. Tyto indexy roviny (h, k, l) stanovují hodnoty úseků, jež tato rovina vytíná na ose (x, y, z). Pokud z počátku souřadného systému v daném směru přes uzlový bod vedeme rovnoběžku, získáme ve směru krystalografickém (uvw) Millerův index. [27]



Obr. 19: Vlevo Millerovy indexy rovin, vpravo Millerovy indexy směrů [27]

3.4.2 Diferenciální snímací kalorimetrie (DSC)

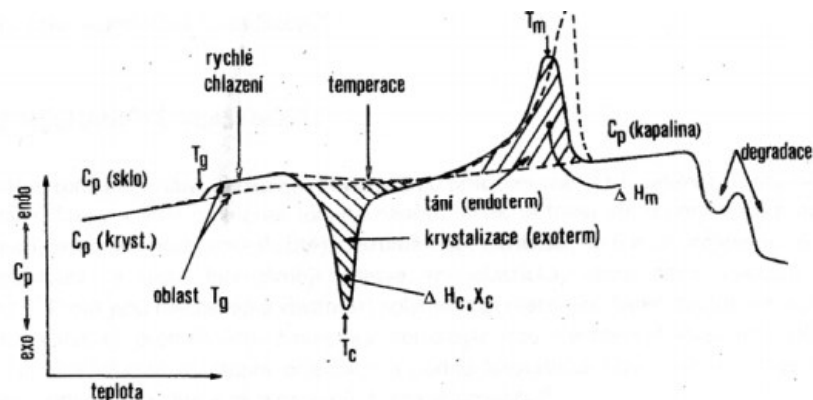
Princip metody diferenciální snímací, někdy také označována jako skenovací (z anglického: „scanning calorimetry“), či dokonce kompenzační kalorimetrie, spočívá ve zkoumání tepelných vlastností materiálu. Vzorek materiálu je současně s referenčním (kontrolním) materiálem při předem definované rychlosti ohříván nebo ochlazován. Signál, který souvisí s fázovou změnou ve zkoumaném vzorku, je pak zapříčiněn okamžitou rozdílnou teplotou vzorku materiálu a referenčního vzorku. Jako referenční vzorek se obvykle používá vzduch, tedy prázdná mistička. Rozdíl teplot se přístroj snaží okamžitě kompenzovat (vyrovnat) například odebráním nebo dodáním energie do vzorku. [23]

DSC metodou můžeme zjistit teplotu tání, teplotu skelného přechodu, tepelnou kapacitu, teplotu degradace, dále lze taky stanovit různé druhy krystalizací. Pomocí DSC můžeme stanovit o jaký materiál se jedná a určit jeho chemické reakce nebo tepelnou vodivost. DSC lze aplikovat pro řešení fázových přechodů nebo pro testování kvality různých polymerních směsí. Měření lze provádět obvykle v inertní atmosféře při teplotě od -100°C do $+650^{\circ}\text{C}$ v závislosti na přístroji. [23]

Pro měření tepelného rozdílu se využívá velmi malé množství materiálu (tj. kolem 10-300 mg), který je vložen do kovové mističky (vyrobené nejčastěji z oceli, hliníku, zlata, stříbra apod.) Díky malé tepelné kapacitě systému se může měřit i při vyšších rychlostech změn

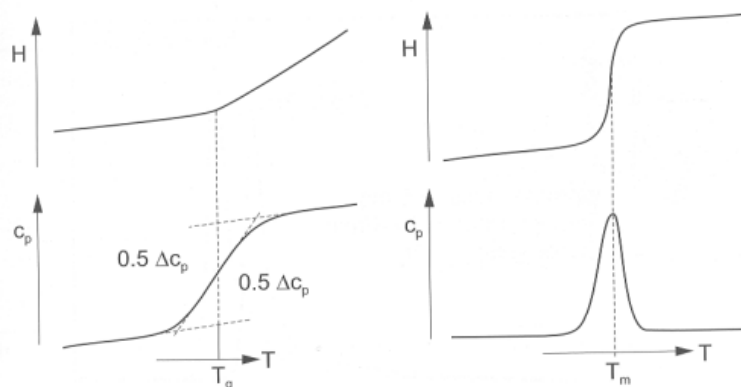
teplot, a to i desítky stupňů za minutu. Avšak musí se brát v úvahu, že při rychlejší změně teplot dochází ke zvětšování píku a jeho maximum se posouvá k vyšším teplotám a dochází k nepřesnosti u získaných dat. Nepřesnosti může způsobit i přílišná velikost částic ve zkoumaném materiálu. Aby nedošlo k degradaci vzorku, je do měřicí komory přístroje vhnán interní plyn (nejčastěji se jedná o dusík nebo argon). [25]

Křivka polymeru vyhodnocena DSC přístrojem, která je na Obr. 20, znázorňuje fázové přechody, které mohou při vyhodnocování nastat. Oblast skleného přechodu (T_g) znázorňuje v závislosti na teplotě náhlý strmý růst specifického tepla. Při ochlazování semikrystalického polymeru dojde ke krystalizaci (T_c) – toto značí krátkodobý pokles a následný růst specifického tepla. Oblast T_m nastává ohříváním semikrystalického polymeru, kdy na rozdíl od krystalizace dochází ke krátkodobému zvýšení a následnému snížení teploty. Většina krystalů se roztaví při teplotě tání, která je závislá na mechanické a tepelné historii zkoumaného polymeru. Při T_c i T_m dochází k vykreslení tzv. píku. [25]



Obr. 20: Schématická křivka polymeru vykreslená DSC přístrojem [25]

Obr. 21 schematicky znázorňuje vlevo teplotu skelného přechodu (T_g) a vpravo teplotu tání (T_m) na DSC přístroji.



Obr. 21: Znázornění T_g a T_m DSC přístrojem [25]

3.4.3 Spliting index (SI)

Jedná se o termo-reologickou metodu určenou k měření toku taveniny, jinak řečeno k měření tekutosti polymeru. Tuto metodu lze použít jako alternativu k měření indexu toku taveniny (ITT). Hlavním důvodem upřednostnění využití SI oproti ITT je použití minimálního možného množství zkoumaného materiálu. Metoda ITT vyžaduje cca kolem 8 gramů granulovaného materiálu, což v některých případech není možné zajistit. [21]

Pro měření SI je zapotřebí 1-2 mm tlustá destička (může být z daného polymeru vylisována). Jedná-li se o vylisovanou destičku, tak se po vychladnutí z ní uřízne geometricky snadno definovatelný vzorek, např. obdélník nebo kotouček o průměru 0,5 cm, který se následně vloží mezi rovné desky (sklo nebo kov). Na topném stolku, působením závaží při předem definovaných hmotnostech (např. 100 a 200 g), za stálé teploty, za určitý čas (např. 5 minut), se vzorek roztaví. Po ochlazení se změří lineární změna rozměrů vzorku. Výsledek je vyhodnocen jako procentuální zvětšení původních rozměrů vzorku. [21]

3.4.4 Tahová zkouška

Trhací stroj, ve kterém tahová zkouška probíhá, je zařízení, které umožňuje deformovat vzorek pomocí různých deformačních mechanismů. Pro vyhodnocení tahové zkoušky se sleduje závislost tahového napětí s na deformaci e . Napětím se myslí napětí smluvní, které charakterizuje poměr působící síly F na plochu tělesa o průřezu S_0 (původní těleso před deformací). Deformací se rozumí poměr prodloužení zkoušeného tělesa ΔL k délce tělesa L_0 (v původním stavu). [39]

- Smluvní napětí:

$$\sigma = \frac{F}{S_0} \text{ [MPa]} \quad (3)$$

- Poměrná deformace:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{L-L_0}{L_0} [-] \quad (4)$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \cdot 100 = \frac{L-L_0}{L_0} \cdot 100 [\%] \quad (5)$$

Kde S_0 [mm²] označuje původní průřez zkušební tělesa, L_0 [mm] vyjadřuje měrnou délku zkušební tělesa a $\Delta L = (L - L_0)$ charakterizuje přírůstek délky L_0 , proto se označuje jako ΔL . [39, 49]

Zkušební těleso, pro které je charakteristický jeho jednoduchý tvar, je obvykle kruhového nebo obdélníkového průřezu. Na těleso, které je uchyceno do čelistí zkušebního trhačního stroje, je nasazen průtahoměr. Do softwaru určeného pro trhační přístroj se během tahové zkoušky zapisuje závislost působící síly F , která charakterizuje zatížení snímané dynamometrem, na prodloužení zkušební tyče, snímané průtahoměrem. [39] Tvar a rozměry zkušební tyče jsou pro každý materiál přesně definovány normou. Ve většině případů se používají zkušební tělesa ve tvaru oboustranných lopatek, které jsou vhodné kvůli pevnému uchycení v čelistech. Pro fólie a desky lze využít např. pásky. Tahová křivka je výsledkem prováděné tahové zkoušky. Pomocí tahové křivky se určují důležité pevnostní charakteristiky jako je mez pevnosti, napětí na mezi kluzu nebo napětí naměřené při přetržení materiálu. [49]

Mez pevnosti

Mez pevnosti (σ_m) charakterizuje maximální napětí, odpovídající maximální síle (F_{max}) změřené v průběhu tahové zkoušky. Hodnota meze pevnosti se u polymerů často při pokojové teplotě pohybuje v rozmezí od 15 MPa do 100 MPa, u elastomerů se při pokojové teplotě hodnota pohybuje od 7 MPa do cca 28 MPa a je dána ze vztahu [49]:

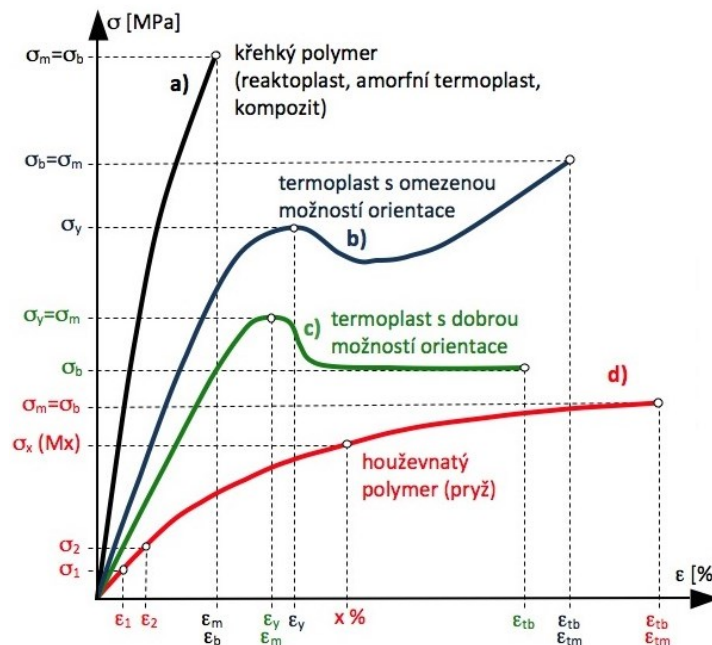
$$\sigma_m = \frac{F_{max}}{S_0} [\text{MPa}] \quad (6)$$

Napětí na mezi kluzu

Napětí na mezi kluzu (σ_y) představuje napětí, kdy začíná vznikat plastická (trvalá) deformace. Při této deformaci se průměr materiálu zužuje a tím dochází ke vzniku tzv. krčku, který se během rostoucího napětí rozšiřuje. Při překročení meze kluzu dochází ke vzniku trvalých deformací, proto se toho napětí na mezi kluzu považuje za přípustné maximální napětí. Pro semikrystalické polymery s nižším obsahem krystalinity bývá napětí na mezi kluzu považováno za shodné s mezí pevnosti (křivka c, Obr. 21). [49]

Napětí při přetržení

U napětí při přetržení (σ_b) dochází k porušení zkoušeného materiálu. U amorfních termoplastů nebo u reaktoplastů může být σ_b shodné s napětím na mezi pevnosti (křivka a, Obr. 21). [49]



Obr. 22: Typické křivky polymerů při deformaci v tahu [49]

Tuhost materiálu vyjadřuje modul pružnosti E , přičemž čím větší má materiál modul pružnosti, tím větší je jeho tuhost. [49]

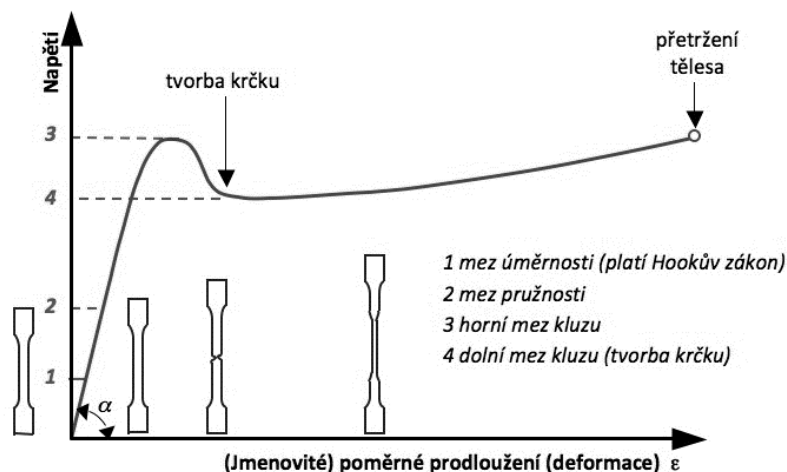
Počáteční přímkový úsek diagramu značí elastickou (pružnou) deformaci, kdy napětí R je přímo úměrné poměrnému prodloužení ε , se nazývá mez úměrnosti, viz Obr. 22. Pokud je na zkušební tělese umístěn snímač pro snímání prodloužení, pak je tento přímkový úsek popsán Hookeovým zákonem:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \Rightarrow E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \text{ [MPa]} \quad (7)$$

kde σ [MPa] je smluvní napětí, E [MPa] představuje modul pružnosti v tahu zkušebního materiálu a ε [-] je poměrné prodloužení (deformace [%]). [39, 49]

Zakřivená část tahové křivky zahrnuje plastickou i pružnou deformaci. Úsek, ve kterém je deformace vratná a materiál pružný, je označován jako mez pružnosti. Za mezí pružnosti dochází i při malém nárůstu napětí k velkým deformacím a tím dochází k plastické (trvalé) deformaci. Nastává zde mez kluzu. Pokud za tímto bodem dojde k poklesu napětí, pak se

jedná o horní mez kluzu. Dolní mez kluzu se určuje jako minimum na pokračující křivce. Za dolní mezí kluzu dochází u semikrystalických polymerů k opětovnému zvýšení napětí až do definovaného maxima, při kterém dochází k přetržení zkoušeného tělesa nebo může dojít k porušení soudružnosti materiálu poklesem napětí a lomem. U křehkých polymerů (amorfni termoplasty nebo reaktoplasty) lom nastává při nízkých deformacích, těsně za mezí pružnosti. [49]



Obr. 23: Tahová křivka typická pro semikrystalické polymery [49]

Z deformační křivky v tahu lze dále získat i poměrné prodloužení na mezi pevnosti (ϵ_m), poměrné prodloužení na mezi kluzu (ϵ_y) nebo poměrné, resp. jmenovité poměrné prodloužení při přetržení (ϵ_b , resp. ϵ_{tb}), vyjadřující celkovou tažnost polymeru. [49]

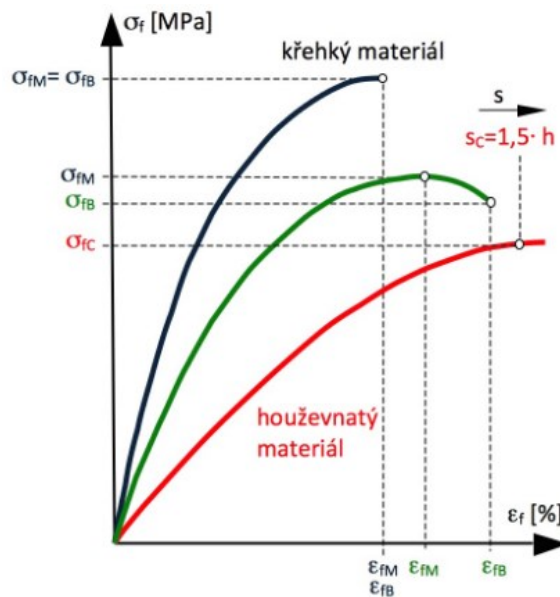
Pro měření tahové zkoušky a určení tahových vlastností se používá trhací zařízení Zwick 1456.

3.4.5 Ohybová zkouška

Ohybová zkouška definována normou ČSN EN ISO 178, podrobně popisuje přípravu vzorků, průběh měření při ohybu a vyhodnocení změřených dat. Norma charakterizuje metody určené pro stanovení vlastností v ohybu pro tuhé a polotuhé plasty při přesně definovaných podmínkách. Tato norma stanovuje rozměry a jiné důležité náležitosti zkušebního tělesa a určuje rychlost průběhu ohybové zkoušky. [46]

Pro ohybovou zkoušku se používá těleso ve tvaru hranolu, které je volně umístěno na dvou podpěrách v předepsané vzdálenosti (L). Síla působící mezi dvěma podporami ve středu tělesa je charakteristická pro třibodový ohyb. Tato metoda je vhodná pro termoplasty nebo reaktoplasty. [46, 49]

Pro měření tříbodového ohybu se rovněž používá zařízení Zwick 1456 (Německo), nastavené na ohybovou zkoušku.



Obr. 24: Typické křivky polymerů při deformaci v tahu [49]

Maximální ohybový moment pro tříbodový ohyb lez vyjádřit vztahem [49]:

$$M_{o,max} = \frac{F_{max} \cdot L}{4} \text{ [N} \cdot \text{mm]} \quad (8)$$

Pro zkušební tělíska, ve tvaru hranolu o tloušťce h a šířce b , se průřezový modul stanovuje ze vztahu [49]:

$$W_o = \frac{b \cdot h^2}{6} \text{ [mm}^3\text{]} \quad (9)$$

Pevnost v ohybu σ_{fM} , lze vypočítat z maximálního ohybového momentu $M_{o,max}$ a průřezového modulu W_o , pomocí vztahu [49]:

$$\sigma_{fM} = \frac{M_{o,max}}{W_o} \text{ [MPa]} \quad (10)$$

Úpravou rovnice (10), lze získat vztah pro pevnost v ohybu [49]:

$$\sigma_{fM} = \frac{3}{2} \cdot \frac{F_{max} \cdot L}{b \cdot h^2} \text{ [MPa]} \quad (11)$$

II. PRAKTICKÁ ČÁST

4 CÍLE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Cílem bakalářské práce bylo charakterizovat vlastnosti nejčastěji používaných druhů tiskových polymerních materiálů. U materiálů byly testovány mechanické vlastnosti (pevnost v tahu a ohybu, naměřené na trhacím stroji Zwick 1456) a změny struktury vyhodnocené pomocí RTG a DSC. U vybraných materiálů byly výsledné vlastnosti srovnávány.

5 POUŽITÉ MATERIÁLY A JEJICH VLASTNOSTI

Pro vyhodnocení struktury a mechanických vlastností bylo zvoleno 6 druhů polymerních materiálů, které se v současnosti nejčastěji používají pro tisk na RepRap 3D tiskárně. Jedná se o: ABS, PLA, HiPS, FlexiFil, PC/ABS a PETG. Níže jsou uvedeny základní vlastnosti udávané výrobcí jednotlivých materiálů.

Materiál PLA byl od jednoho výrobce zkoumán 2x. Zkoumané materiály se lišily jiným pigmentem filamentu, kde PLA₁ měl šedý pigment filamentu a PLA₂ měl černý pigment filamentu.

5.1 ABS

Od firmy Plasty Mladeč z Haňovic (Česká Republika) byl dodán strunný materiál o průměru $1,75 \pm 0,05$ mm a má tyto vlastnosti:

- Hustota: $1,04 \text{ g/cm}^3$
- Rozpouštědlo: Aceton
- Teplota tisku: $220 - 250 \text{ }^\circ\text{C}$
- Modul pružnosti v ohybu: 1800 MPa

5.2 PC/ABS

Od firmy Plasty Mladeč z Haňovic (Česká Republika) byl dodán strunný materiál o průměru $1,75 \pm 0,1$ mm a má tyto vlastnosti:

- Hustota: $1,19 \text{ g/cm}^3$
- Rozpouštědlo: Aceton
- Teplota tisku: $240 - 260 \text{ }^\circ\text{C}$
- Teplota tiskové podložky: $110 \text{ }^\circ\text{C}$
- Modul pružnosti v ohybu: 2650 MPa

5.3 PLA Extrafill

Od firmy Parzlich z Hulína (Česká Republika) byl dodán strunný materiál o průměru $1,75 \pm 0,05$ mm o vlastnostech daných výrobcem:

- Hustota: $1,24 \text{ g/cm}^3$
- Teplota tisku: $190 - 210 \text{ }^\circ\text{C}$

- Teplota tiskové podložky: 40 – 50 °C
- Teplota skelného přechodu: 55 – 60 °C
- Pevnost v tahu: 53 MPa
- Prodloužení při přetržení: 6 %
- Pevnost v ohybu: 83 MPa
- Modul pružnosti v ohybu: 3800 MPa

5.4 PETG

Od firmy Plasty Mladeč z Haňovic (Česká Republika) byl dodán strunný materiál o průměru $1,75 \pm 0,05$ mm a má tyto vlastnosti:

- Hustota: $1,27 \text{ g/cm}^3$
- Rozpouštědlo: Acetaldehyd, benzen
- Teplota tisku: 230 – 250 °C
- Modul pružnosti v ohybu: 1880 MPa

5.5 HiPS

Od firmy Plasty Mladeč z Haňovic (Česká Republika) byl dodán strunný materiál o průměru $1,75 \pm 0,05$ mm a má tyto vlastnosti:

- Hustota: $1,04 \text{ g/cm}^3$
- Rozpouštědlo: Aceton
- Teplota tisku: 220 – 250 °C
- Teplota tiskové podložky: 100 °C

5.6 Flexfill 92A

Od firmy Parzlich z Hulína (Česká Republika) byl dodán strunný materiál o průměru $1,75 \pm 0,01$ mm a má tyto vlastnosti:

- Hustota: $1,20 \text{ g/cm}^3$
- Teplota tisku: 200 – 220 °C
- Teplota podložky: 30 – 50 °C
- Pevnost v tahu: 49 MPa
- Prodloužení při přetržení: 600 %

6 PŘÍPRAVA VZORKŮ

Výchozí vlastnosti zvolených tiskových materiálů byly testovány na strunách dodaných jednotlivými komerčními výrobci. Struny o průměru 1,75 mm byly zkoumány pomocí RTG difrakce, DSC analýzy, splitting indexu a tahové zkoušky.

Dále byla připravena zkušební tělíska určená pro třibodovou ohybovou zkoušku a RTG difrakci. Tělíska byla připravena dvěma metodami, aby bylo možno vyhodnotit vliv 3D tisku na chování materiálu. Jako srovnávací metoda přípravy tělísek bylo použito lisování v laboratorním lisu. Druhý typ zkušebních tělísek byl v případě definovaných tiskových materiálů připraven na RepRap 3D tiskárně.

6.1 Příprava zkušebních tělísek

Příprava zkušebních tělísek byla prováděna nejprve za pomoci kalibrovaných vah KERN s přesností $\pm 0,01$ g, kde bylo naváženo potřebné množství materiálu (granulovaného polymeru) k vyplnění dutiny formy. Délka dutiny formy byla 80 mm, přičemž obě strany tvořil zaoblený okraj o poloměru 5 mm.

6.1.1 Výpočet navážky pro lisovaná zkušební tělíska

- *Výpočet objemu dutiny zkušební formy*

Rozměry dutiny formy: $80 \cdot 10 \cdot 4$ mm; kde 80 mm je celková délka dutiny formy, přičemž $a = 70$ mm značí délku bez zaoblených okrajů, $b = 10$ mm je šířka, $h = 4$ mm je výška formy a $r = 5$ mm je poloměr zaobleného okraje dutiny formy.

$$V_{kvádr} = a \cdot b \cdot c$$

$$V_{kvádr} = 70 \cdot 10 \cdot 4 = 2800 \text{ mm}^3$$

$$V_{válec} = \pi \cdot r^2 \cdot h$$

$$V_{válec} = \pi \cdot 5^2 \cdot 4 = 314 \text{ mm}^3$$

- *Celkový objem dutiny zkušební formy:*

$$V_{celk.} = V_{kvádr} + V_{válec}$$

$$V_{celk.} = 2800 + 314 = 3114 \text{ mm}^3 = 3,114 \text{ cm}^3$$

- *Příklad výpočtu potřebné navážky pro materiál ABS:*

Hustota ABS: $\rho = 1,05 \text{ g/cm}^3$

Objem zkušební formy: $V_{\text{celk.}} = 3,114 \text{ cm}^3$

$$m = \rho \cdot V$$

$$m = 1,04 \cdot 3,114 = 3,238 \text{ g} \doteq \underline{3,24 \text{ g}}$$

Tab. 1: Navážka pro jednotlivé materiály

Materiál	Hustota [g/cm³]	Požadovaná navážka [g]
ABS	1,04	3,24
PC/ABS	1,19	3,71
PLA	1,24	3,86
PETG	1,27	3,95
HiPS	1,04	3,24
Flexfill	1,20	3,74

6.1.2 Lisování zkušebních tělísek

Lisování zkušebních tělísek bylo provedeno pomocí laboratorního ručního lisu. Lis byl přehřát na požadovanou teplotu 220 °C. Při přehřívání lisu byla současně s ocelovými deskami vytemperována i forma. Pro zkoušku ohybovou byla použita kovová forma na výrobu zkušebních tělísek délky 80 mm, šířky 10 mm a tloušťky 4 mm, což odpovídá normě ČSN EN ISO 178. Lisování probíhalo po dobu 5 minut v závislosti na použitém polymeru.

Struna daného polymeru byla zkrácena na kousky potřebné délky (granulát) a následně umístěny do připravené dutiny formy. Z obou stran formy byl přiložen separační teplovzdorný materiál. Forma obalena z obou stran separačním materiálem byla vložena mezi dvě ocelové desky. Tato sestava byla vložena do rozehřátého lisu, který se uzavřel. Po uplynutí předem definovaného času byla z lisu vyjmuta forma, která byla následně ochlazena. Z formy byla vyjmuta hotová zkušební tělíska.



Obr. 25: Příklad vylisovaných zkušebních tělísek Flexfill a ABS

6.1.3 3D tisk zkušebních tělísek

Zkušební tělíska z materiálu PLA₁ byla vytisknuta na RepRap 3D tiskárně konstrukce Martina Hřiba (Česká Republika). Tělíska byla vytištěna ze struny o konstantním průměru 1,75 mm. Hodnoty plnění materiálu PLA₁ a tloušťka tiskové vrstvy jsou uvedeny v následující tabulce, přičemž byly splněny následující podmínky:

- typ výplně: přímočarý
- průměr trysky: 0,4 mm
- tisková rychlost: výplň do 30 mm/s, obvody do 15-20 mm/s
- překryv 0 %

Tab. 2: Parametry vytištěných tělísek PLA₁

Materiál	Tloušťka struny [mm]	Tloušťka tiskové vrstvy [mm]	Plnění [%]
PLA ₁	1,75	0,08	90
		0,10	
		0,15	
		0,20	
		0,25	
		0,30	

Zkušební tělíska z materiálu PETG byla tisknuta na 3D tiskárně *Prusa i3 MK2*. Tělíska byla vytištěna ze struny o konstantním průměru 1,75 mm. Hodnoty plnění materiálu PETG a tloušťka tiskové vrstvy jsou uvedeny v následující tabulce, přičemž byly splněny následující podmínky:

- typ výplně: přímočarý
- průměr trysky: 0,4 mm
- tisková rychlost: výplň do 30 mm/s, obvody do 15-20 mm/s
- překryv 0 %

Tab. 3: Parametry vytištěných tělísek PETG

Materiál	Tloušťka struny [mm]	Tloušťka tiskové vrstvy [mm]	Plnění [%]
PETG	1,75	0,05	90
		0,08	
		0,10	
		0,15	
		0,20	
		0,25	
		0,30	

7 ZKOUŠENÍ TISKOVÝCH MATERIÁLŮ

Tiskové struny získané od komerčních výrobců byly testovány pomocí:

- RTG difrakční analýzy
- Diferenciální snímací kalorimetrie
- Spliting indexu
- Tahové zkoušky

Lisovaná tělíska vyrobená na ručním lisu a vytištěná tělíska (PETG a PLA₁) pomocí 3D tiskárny byla testována pomocí:

- RTG difrakční analýzy
- Třibodové ohybové zkoušky

7.1 RTG difrakční analýza

Pro měření byl použit přístroj X'Pert PRO od firmy PANalytical (Nizozemí). Přístroj je vybaven rentgenkou CuK α , Ni filtrem a rychlým lineárně pozičně citlivým detektorem X'Celerator. Pro měření bylo využito Bragg – Brentanovy konfigurace, napětí 40 kV, proud 30 mA. Měření probíhalo v rozsahu $2\Theta = 5 - 30^\circ$ při pokojové teplotě a atmosférickém tlaku. [20] Celková krystalinita byla stanovena jako podíl součtu ploch všech krystalických píků vůči ploše amorfního pozadí.

7.2 Diferenciální snímací kalorimetrie

Chování materiálu při zvýšených teplotách v případě analyzovaných materiálů byly studovány pomocí diferenciální snímací kalorimetrie s využitím přístroje DSC1 (METTLER TOLEDO, Česká Republika) s rychlostí chlazení či ohřevu 10 °C/min v N₂ atmosféře. Pro měření byly použity hliníkové pánvičky naplněné cca 10 mg vzorku. Nadefinovaný teplotní proces byl v rozsahu od 30 °C do 250 °C, v závislosti na daném polymeru. Program byl zadán ve 3 periodách: 1. ohřev, chlazení a 2. ohřev.

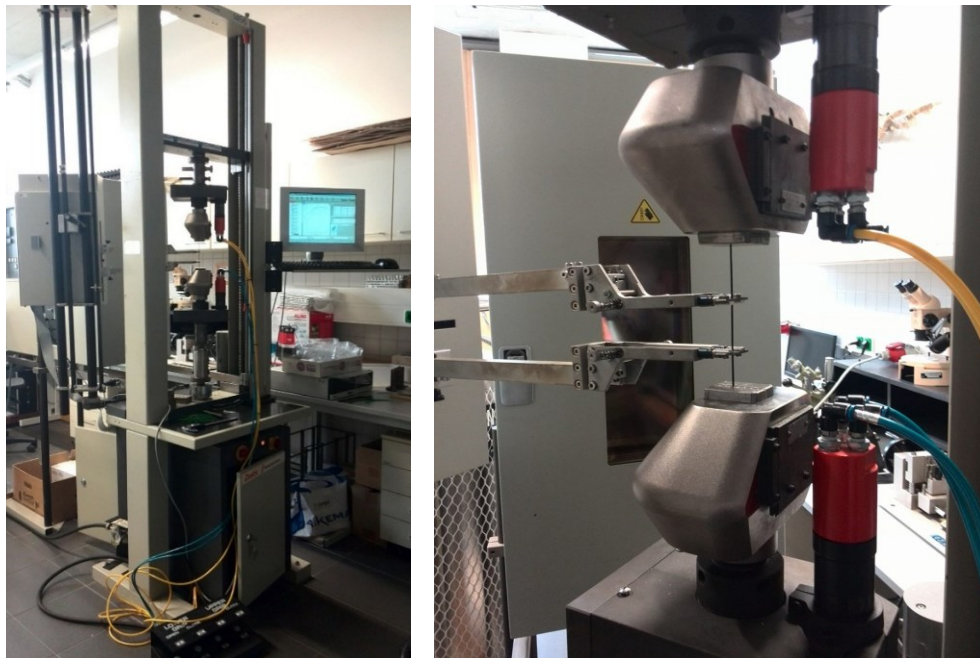
7.3 Spliting index

Důvodem zvolení této metody ke zkoumání roztékavosti materiálu bylo omezené množství materiálu. Pro měření ITT je minimální potřebné množství materiálu 8 g, toto nebylo možno zajistit, proto byla zvolena metoda splitting index.

Ze zkoumaného materiálu se odebral geometricky snadno definovatelný vzorek, např. váleček o průměru 1,75 mm, který se následně vložil mezi rovné skleněné desky. Desky s vloženým vzorkem byly umístěny na topný stolek a zatíženy závažím o předem definované hmotnosti (200 g). Teplota tavení byla nastavena na 200 °C, za definovaného času ($5 \pm 0,1$ min). Po ochlazení vzorku byla změřena lineární změna rozměrů vzorku. Rozměry výsledných vzorků byly naměřeny s přesností $\pm 0,2$ mm. Hodnoty jsou průměrem měření z nejméně šesti nezávislých vzorků. Výsledkem zkoušky bylo stanovení zvětšení původního rozměru vzorku v procentech. [21]

7.4 Tahová zkouška tiskových strun

Tahová zkouška tiskových strun o konstantním průměru $1,75 \pm 0,05$ mm byla prováděna pomocí trhacího stroje Zwick 1456 (Obr. 25) v laboratořích Ústavu výrobního inženýrství. Pro uchycení tiskových strun byly použity pneumatické čelisti (kvůli možnému prokluzu). Naměřené hodnoty byly vyhodnoceny pomocí testovacího softwaru testXpert, který je součástí trhacího stroje dodaný od výrobce. Měření probíhalo při pokojové teplotě a atmosférického tlaku.



Obr. 26: Trhací stroj Zwick 1456 nastavený na tahovou zkoušku a způsob upnutí

Tab. 4: Technické údaje trhačního stroje

Zwick 1456 (Německo)	
Maximální posuv příčniku:	800 mm/min
Snímače síly:	2,5 kN a 20 kN
Teplotní komora:	-80/+250 °C
testXpert software:	Tah/Ohyb/Tlak

7.5 Tříbodová ohybová zkouška

Měření tříbodové ohybové zkoušky na vylisovaných (ABS, PC/ABS, PLA₂, HiPS, FlexFill) a vytištěných (PETG a PLA₁) tělískách probíhalo také na trhačním stroji Zwick 1456 (Obr. 26). Tentokrát byl stroj a software testXpert, kde byla tříbodová ohybová zkouška naměřena a data vyhodnocena, nastaven na ohybovou zkoušku. Vzdálenost podpěr pro plastové materiály je šestnáctinásobek tloušťky materiálu – v tomto případě, při tloušťce tělíska 4 mm, byla vzdálenost podpěr 64 ± 1 mm. Měření probíhalo při pokojové teplotě a atmosférickém tlaku.

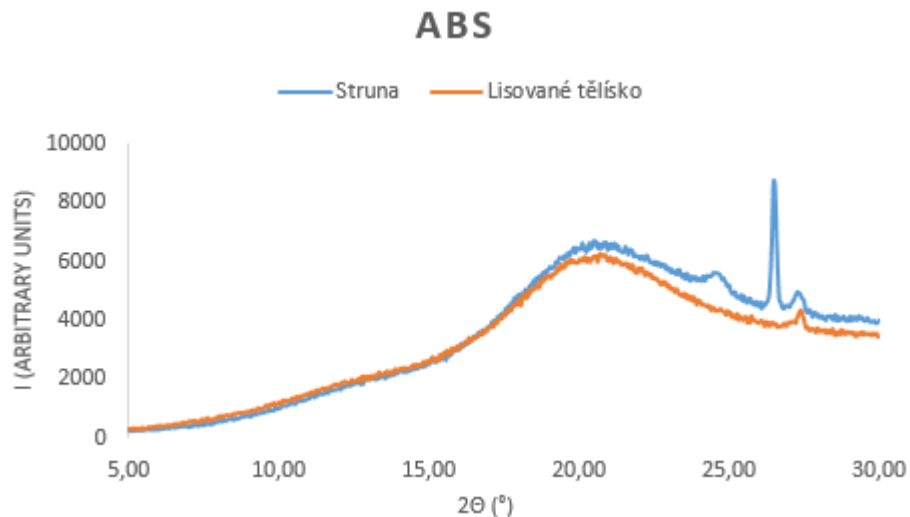


Obr. 27: Způsob uchycení při ohybové zkoušce

8 VÝSLEDKY A DISKUZE

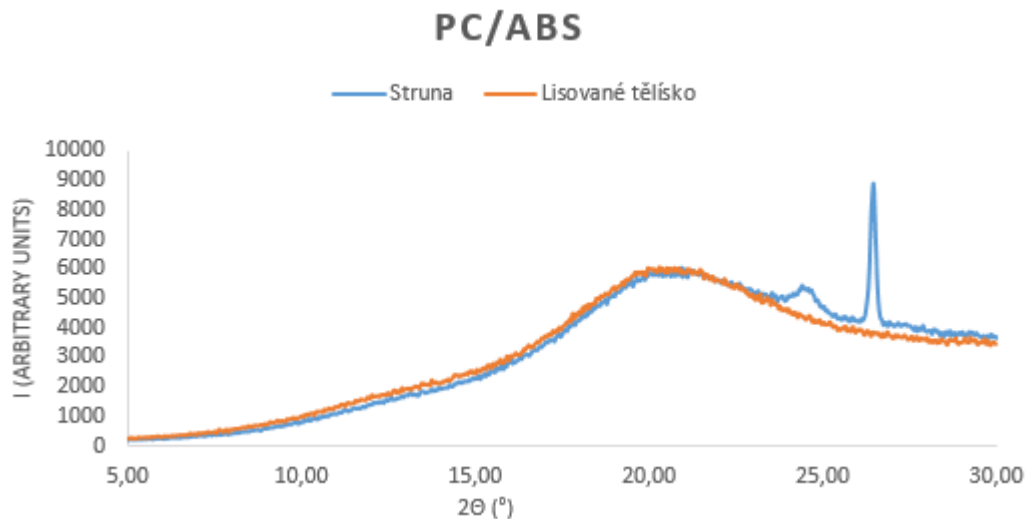
8.1 Naměřená data RTG

Záznam RTG byl nejčastěji vyhodnocován jen pro strunu a lisované tělísko. U PETG a PLA₁ byla možnost provést RTG analýzu nejen pro strunu a lisované tělísko, ale i pro vytištěné tělísko.



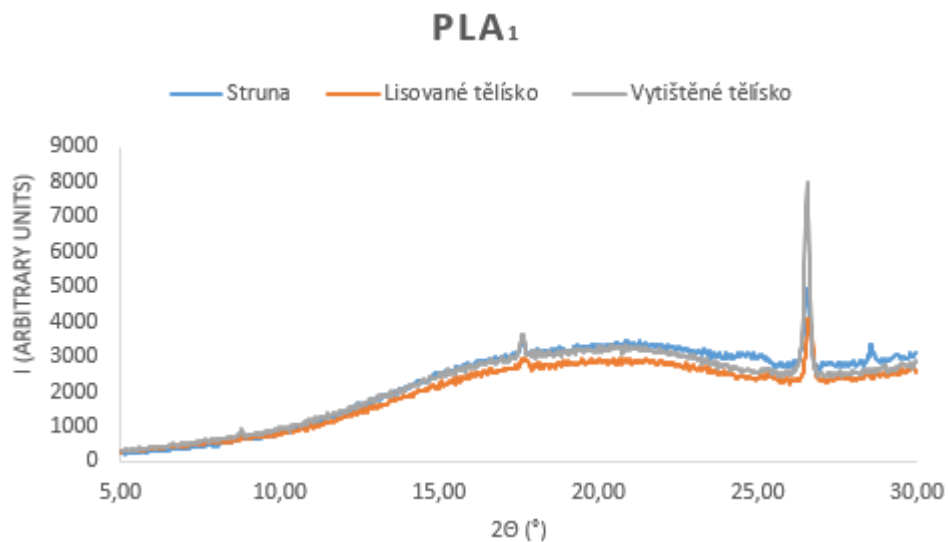
Obr. 28: Graf RTG difrakční analýzy pro ABS

RTG difrakční záznam pro ABS ukázal, že původní struna, ač v ní převažovala amorfnní složka, vykazovala přítomnost malého podílu krystalické složky (s píkem při úhlu $26,6^{\circ}2\theta$ a o poměru krystalizace u struny $X = 3,9\%$, oproti lisovanému tělísku $X = 1\%$), která však byla částečně odstraněna po jednom roztavení a nové krystalizaci (záznam lisovaného tělíška).



Obr. 29: Graf RTG difrakční analýzy pro PC/ABS

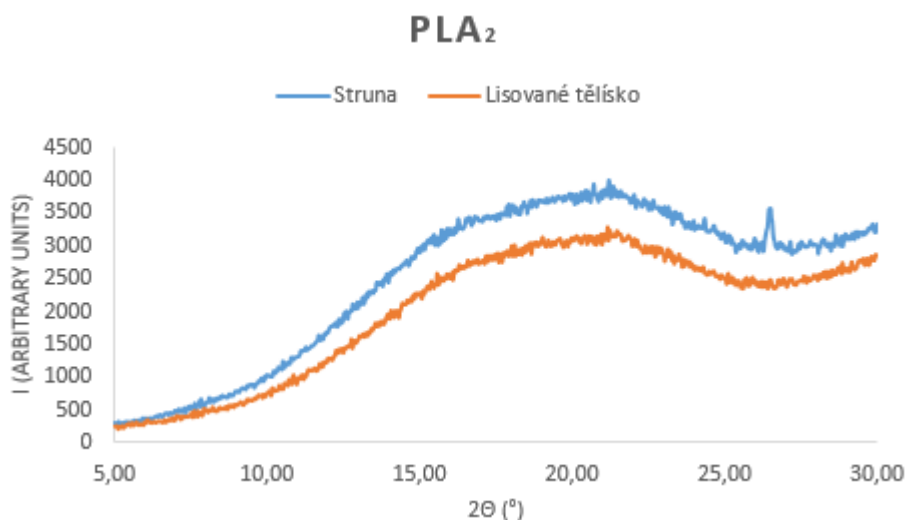
RTG difrakční záznam pro PC/ABS ukázal, že původní struna, i když v ní převažovala amorfnní složka, vykazovala přítomnost malého podílu krystalické složky (s píkem při úhlu $26,495^{\circ}2\theta$ a podílem krystalinity pro strunu $X = 3,94\%$, vůči lisovanému tělísku $X = 0\%$). Po prvním roztavení a nové rekrytalizaci došlo k odstranění podílu krystalické složky a proto lisované tělísko vykazuje amorfnní strukturu (viz záznam lisovaného tělíska).



Obr. 30: Graf RTG difrakční analýzy pro PLA₁

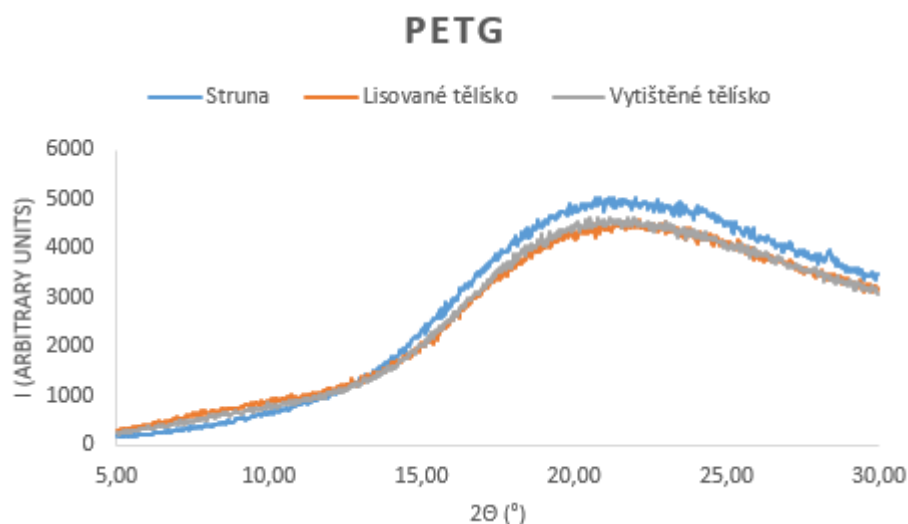
RTG difrakční záznam pro PLA₁ ukázal, že původní struna, ač v ní převažovala amorfnní složka, vykazovala přítomnost malého podílu krystalické složky s píkem při úhlu $26,6^{\circ}2\theta$ a o poměru krystalinity $X = 10,45\%$, oproti lisovanému tělísku, kde $X = 1\%$ s píkem při úhlu $26,6^{\circ}2\theta$, při kterém se po jednom roztavení a rekrytalizaci část krystalické složky mírně

zvýšila a u vytištěného tělíska se část krystalizační složky výrazně zvýšila s úhlem píku $26,6^{\circ}2\theta$ a krystalinitou $X = 13\%$.



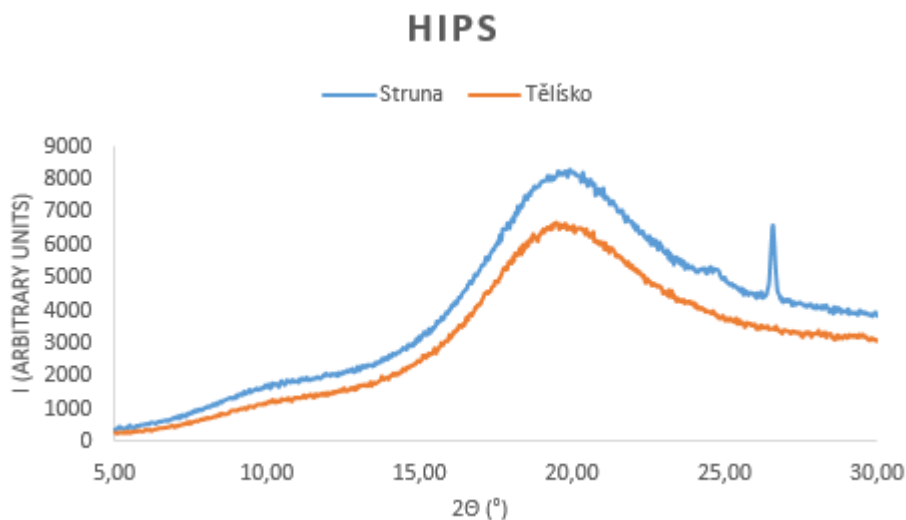
Obr. 31: Graf RTG difrakční analýzy pro PLA₂

RTG analýza ukázala, že PLA₂ je neuspořádaný materiál, který vykazuje amorfnní strukturu, při čemž podíl krystalinity byl pro strunu $X = 3,5\%$ a pro lisované tělísko $X = 0\%$. Toto uspořádání se nezměnilo ani po následném roztavení a rekrystalizaci, proto i lisované tělísko vykazovalo amorfnní strukturu.



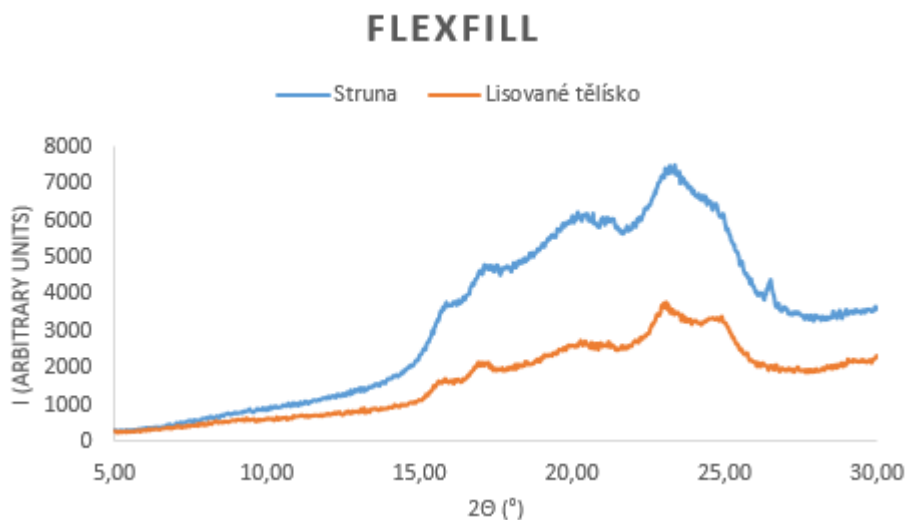
Obr. 32: Graf RTG difrakční analýzy pro PETG

U struny, lisovaného a vytištěného tělíska pro PETG, RTG analýza znázorňuje čistě jen amorfnní strukturu.



Obr. 33: Graf RTG difrakční analýzy pro HIPS

V případě houževnatého polystyrenu RTG analýza potvrdila, že se jedná o neuspořádaný materiál, který v původním provedení (struna) měl jeden významnější vrchol při úhlu $26^\circ 2\theta$, při čemž podíl krystalinity byl pro strunu $X = 1,36\%$ a pro lisované tělísko $X = 1\%$, ale toto částečné uspořádání bylo odstraněno roztavením a následnou rekrystalizací, poté lisované tělísko vykazovalo amorfní strukturu.



Obr. 34: Graf RTG difrakční analýzy pro FlexFill

RTG difrakční analýza struny FlexFill poukázala na částečně krystalický materiál s nejvýraznějším píkem při úhlu $23,261^\circ 2\theta$ a podílem krystalinity pro strunu $X = 12,64\%$ a pro lisované tělísko $X = 20,9\%$. Částečné uspořádání si materiál uchoval i po roztavení a následné rekrystalizaci, kde úhel píku je totožný jako úhel píku struny $23,261^\circ 2\theta$.

Tab. 5: Shrnutí vlastností polymerů z RTG analýzy

Materiál	Krystalinita [%]	Pozice vrcholu píku 2Θ[°]
ABS		
struna	3,94	26,6
lisované tělísko	1	-
PLA₁		
struna	10,45	26,6
lisované tělísko	1	26,6
vytištěné tělísko	13	26,6
PLA₂		
struna	3,5	26,6
lisované tělísko	0	-
HiPS		
struna	1,36	26
lisované tělísko	1	-
Flexfill		
struna	12,64	23,3
lisované tělísko	20,9	23,3
PC/ABS		
struna	3,94	26,5
lisované tělísko	0	-
PETG		
struna	0	-
lisované tělísko	0	-
vytištěné tělísko	0	-

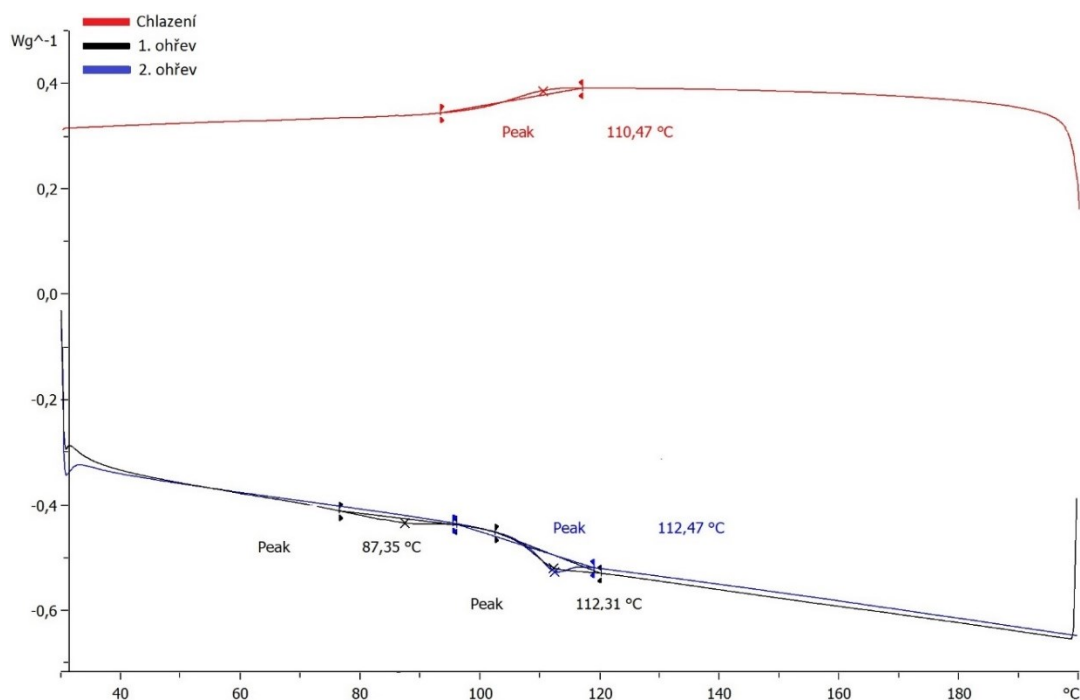
Z tabulky je zřejmé, že krystalinita polymerů po tepelném zpracování klesne, či dokonce úplně vymizí. Pouze u lisovaného tělíska z polymerního materiálu Flexfill se při tepelném zpracování podíl krystalinity zvětšil.

Píky při hodnotách kolem $26,5^\circ 2\Theta$ se vyskytují ve všech zkoumaných tiskových strunách, i když se jedná o odlišné materiály. Lze soudit, že toto zapříčinila přísada (zřejmě separační činidlo) určená pro snadnější zpracování struny, která většinou následně při dalším ohřevu degradovala nebo přešla do amorfni fáze. To, že se jedná o zpracovatelskou přísadu spíše než o pigment, lze soudit z toho, že tento pík se vyskytuje u obou vzorků PLA při stejném úhlu $2\Theta(^{\circ})$, ačkoliv vzorky obsahují odlišné pigmenty.

8.2 Naměřená data DSC

O stanovených teplotních charakteristikách zamýšlených výrobcem vypovídá první tavení a rekrystalizace. Druhé tavení vypovídá o vlastnostech jednotlivých zkoumaných polymerů.

8.2.1 ABS

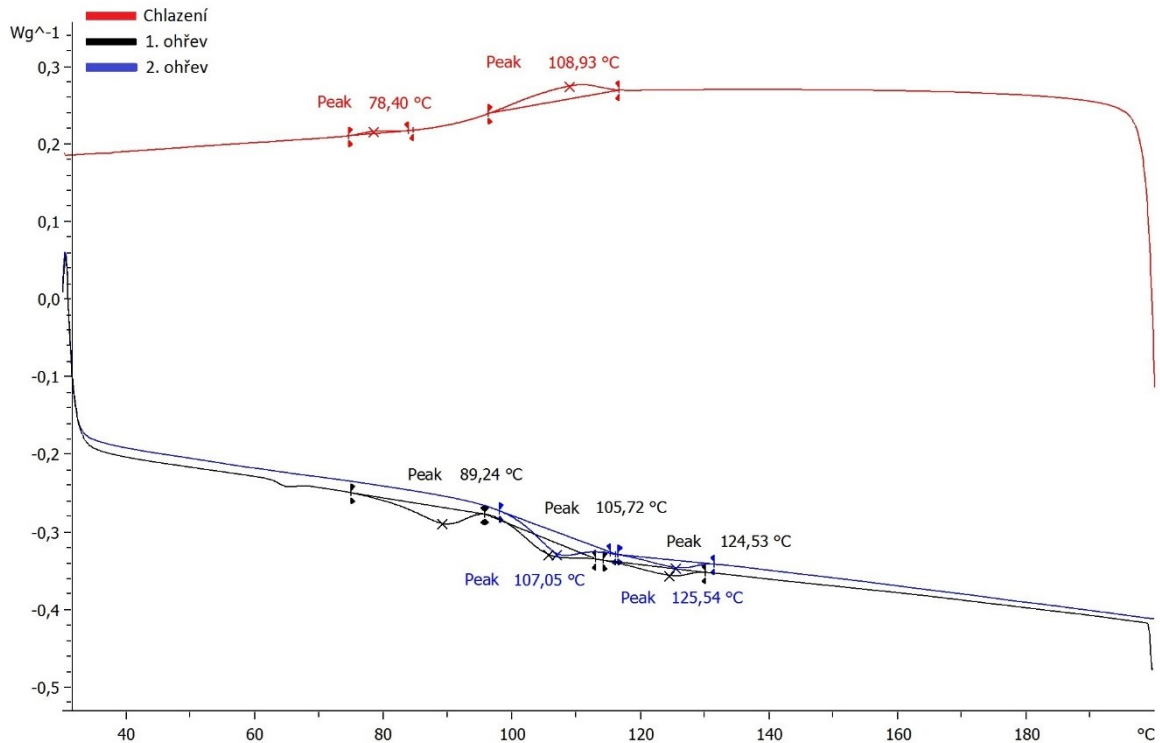


Obr. 35: Záznam DSC křivky pro ABS

Výsledky DSC analýzy pro materiál ABS ukazuje průběh 1. a 2. ohřevu a chlazení, kde je jasně vidět, že daný polymer je amorfni struktury. Malé píky při obou ohřevech kolem tep-

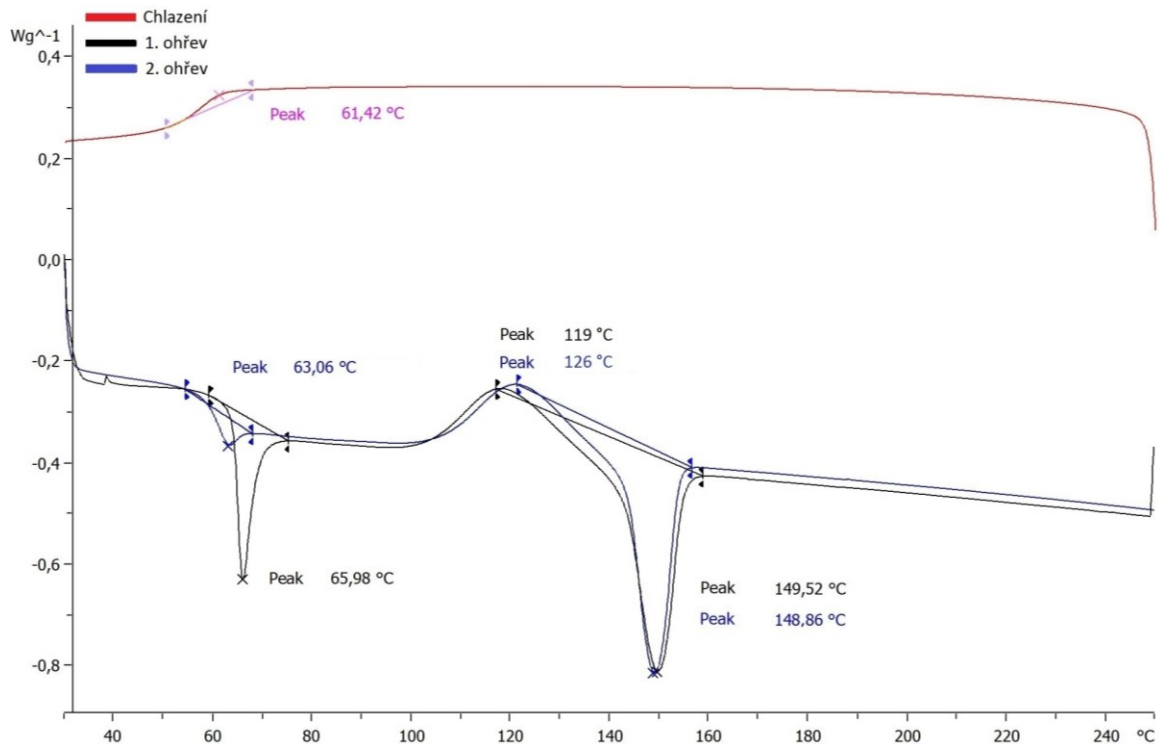
loty kolem 112°C nejspíše odpovídají tání nějaké přísady (vzhledem k minimálnímu procentu). Chlazení ukazuje T_c při teplotě 110,47 °C. Z DSC analýzy je jasně vidět, že výrobce do struktury ABS nezasahoval a neměnil vlastnosti tohoto polymeru.

8.2.2 PC/ABS

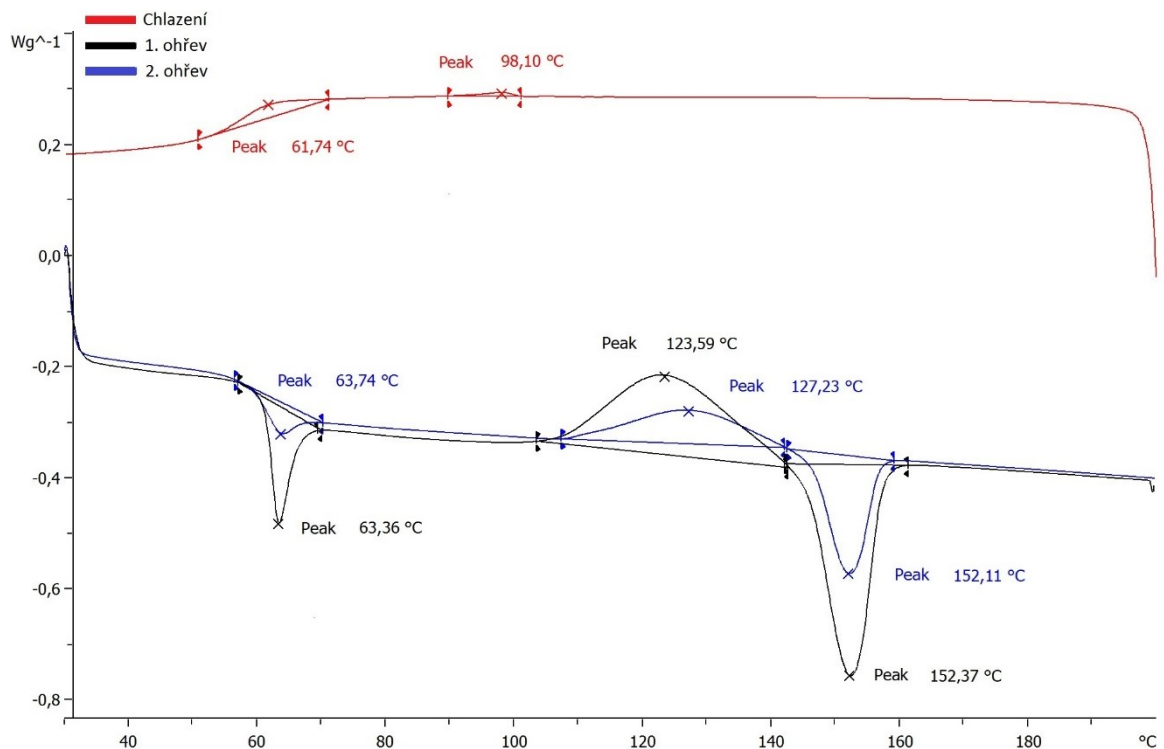


Obr. 36: Záznam DSC křivky pro PC/ABS

Zajímavý výsledek však ukázala DSC analýza u směsi ABS s PC. Smísením amorfnní struktury typické pro ABS a krystalické struktury typické pro PC se na DSC záznamu projevilo malými píky při teplotách u 1. ohřevu 89,24 °C, 105,72 °C a 124,53 °C, u 2. ohřevu se taktéž nevýrazné píky tání projevily při teplotách 107,05 °C a 125,54 °C. Chlazení ukázalo malý krystalizační pík při teplotě 108,93 °C.

8.2.3 PLA₁Obr. 37: Záznam DSC křivky pro PLA₁

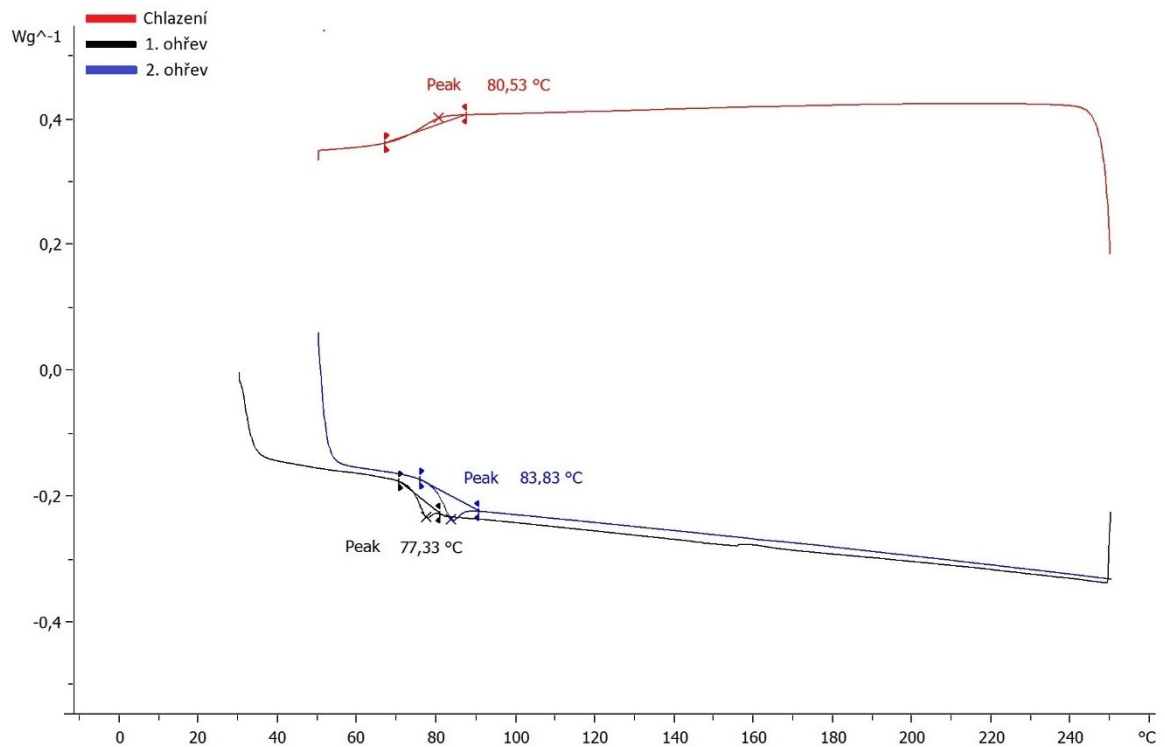
Výsledky DSC analýzy ukazují, že PLA₁ při 1. ohřevu vykázaly teploty tání T_m při teplotách 65,98 °C a 149,52 °C a při 2. ohřevu ukázala DSC křivka tání při teplotách 63,06 °C a 148,86 °C. První pík prvního tání v porovnání s druhým píkem je posunut k mírně vyšším hodnotám (o cca 3°C) a je celkově. Studený krystalizační vrchol (T_{cc}), který je typický pro PLA [10], byl zaznamenán jak při prvním ohřevu, při teplotě 119 °C, tak i při druhém ohřevu, při teplotě 126 °C. Průběh chlazení vykazuje skelný přechod při teplotě 61,42 °C, což značí, že při použité rychlosti chlazení (10°C/min) nedochází ke krystalizaci a výsledná struna je proto amorfní. Pro další výzkum specifického termálního chování polymorfního PLA by bylo vhodné podrobněji vyšetřit rychlost a podmínky krystalizace a tavení.

8.2.4 PLA₂Obr. 38: Záznam DSC křivky pro PLA₂

DSC křivka ukazuje, že tento typ PLA₂ při 1. ohřevu vykazoval teplotu tání T_m při teplotách 63,36 °C a 152,37 °C a při 2. ohřevu ukazuje DSC křivka rekrystalizaci při teplotách 63,74 °C a 152,11 °C. Není zde patrná významná změna poloh píků, ale píky při prvním ohřevu jsou větší, což značí vyšší podíl uspořádané fáze. Průběh chlazení vykazuje skelný přechod při teplotě 61,74 °C. Studený krystalizační vrchol byl zaznamenán při prvním ohřevu při teplotě 123,59 °C a při druhém ohřevu při teplotě 127,23 °C.

Porovnání DSC záznamů PLA₁ – šedého filamentu a PLA₂ - černého filamentu ukazuje, že použitý šedý pigment či barvivo mírně zvyšuje schopnost PLA se pravidelně uspořádat (vzhledem k teplotám prvního tání o cca 2°C). Toto pozorování se shoduje s RTG analýzou.

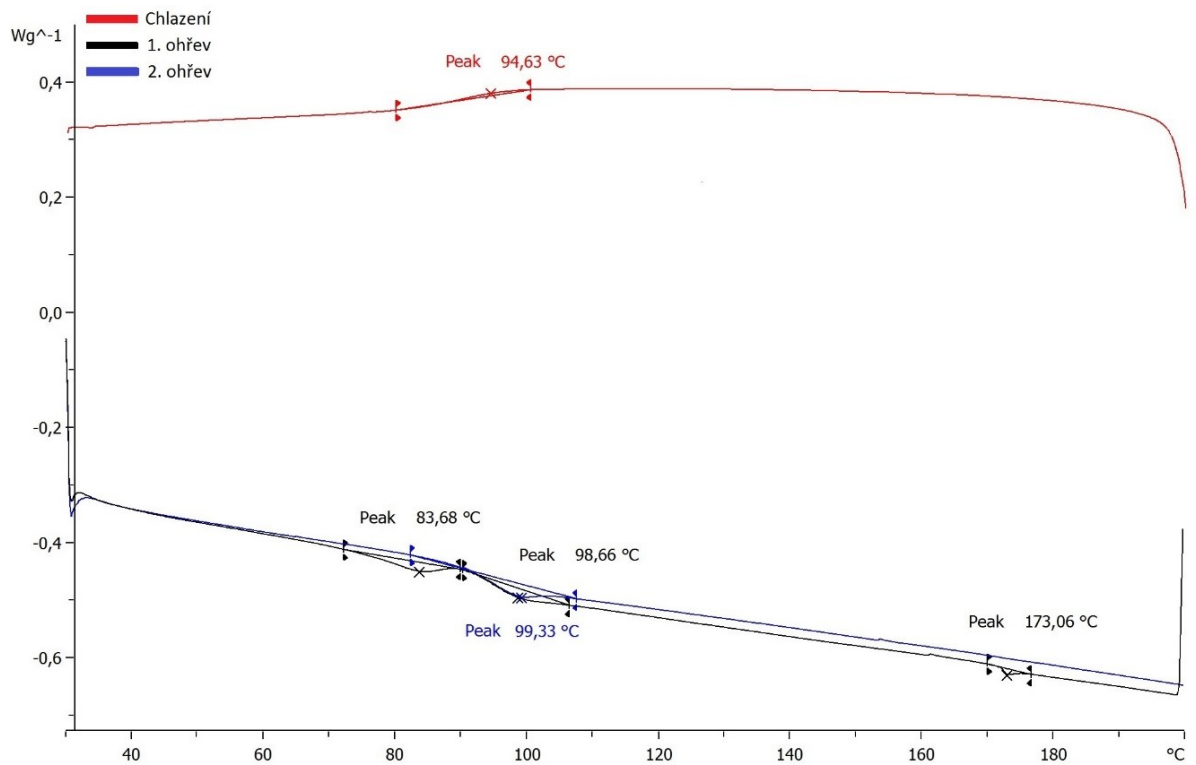
8.2.5 PETG



Obr. 39: Záznam DSC křivky pro PETG

Při prvním ohřevu PETG vykázal malý pík kolem teploty $77,33^{\circ}C$, při chlazení při teplotě $80,53^{\circ}C$ a při druhém ohřevu při $83,83^{\circ}C$, což značí, že použitá rychlost chlazení $10^{\circ}C/min$ je optimálnější než jakou použil výrobce.

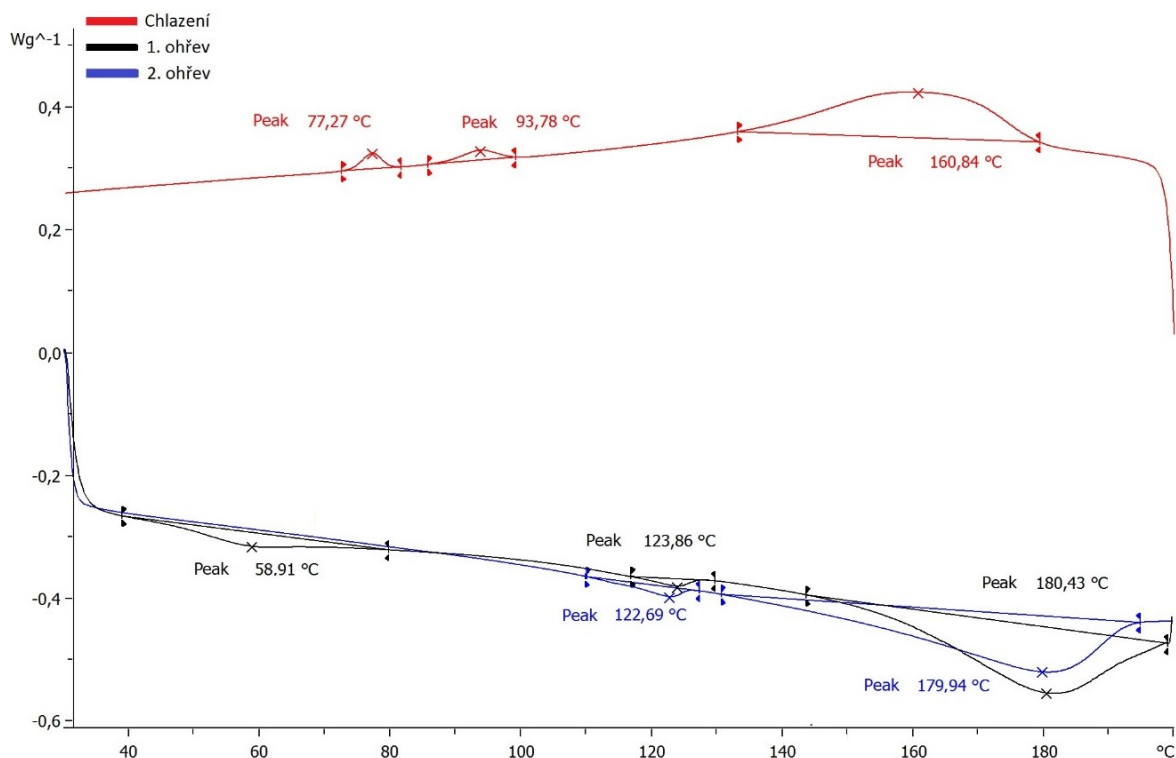
8.2.6 HiPS



Obr. 40: Záznam DSC křivky pro HiPS

V případě HiPS se jedná o minimálně uspořádaný materiál, který vykazuje nevýrazné píky při teplotě kolem 99 $^{\circ}C$. Pík změřený při prvním ohřevu při teplotě 83,68 $^{\circ}C$ se nevyskytuje při druhém ohřevu a ani chlazení, čili se jedná o efekt, který vznikl při výrobě struny a je teplotně závislý.

8.2.7 Flexfill



Obr. 41: Záznam DSC křivky pro Flexfill

Stejně jako záznamy RTG, i DSC analýza potvrdila, že v případě Flexfillu se jedná o částečně uspořádaný materiál, který taje při teplotách 123 resp. 180 $^{\circ}C$ a krystalizuje při 77,27 a 160,84 $^{\circ}C$. Pík změřený při prvním ohřevu při teplotě 58,91 $^{\circ}C$ se nevyskytuje při druhém ohřevu a ani chlazení, čili se jedná o efekt, který vznikl při výrobě struny a je teplotně závislý.

Tab. 6: Charakteristické teploty vyhodnocené pomocí DSC

Materiál	T _{m1} [$^{\circ}C$]	T _c / T _g [$^{\circ}C$]	T _{m2} [$^{\circ}C$]	Podmínky
ABS	87,35 112,31	110,47	112,47	S
PC/ABS	89,24 105,72 124,53	108,93	107,05 125,54	L
PLA ₁	65,98 119 149,52	T _G 61,42	63,06 126 148,86	H
PLA ₂	63,36 123,59 152,37	T _G 61,74	63,74 127,23 152,11	S

PETG	77,33	80,53	83,83	L
HiPS	83,68 98,66 173,06	94,63	99,33	L
Flexfill	58,91 123,86 180,43	77,27 93,78 160,84	122,69 179,94	H

Podmínky:

L – Značí lepší podmínky, které byly materiálu dodány po 2. ohřevu. Krystalinita se při 2. ohřevu změnila k vyšším hodnotám.

H – Značí horší podmínky po 2. ohřevu. Krystalinita se 2. ohřevem snížila.

S – Značí stejné podmínky při 1. i 2. ohřevu. Krystalinita se ohřevem nezměnila.

Vysvětlivky:

T_{m1} – Teplota tání 1. ohřev

T_c – Teplota krystalizace

T_g – Teplota skelného přechodu

T_{m2} – Teplota tání 2. ohřev

8.3 Spliting index

Touto metodou bylo stanoveno procentuální zvětšení rozměrů naměřeného vzorku proti jeho původním rozměrům naměřené při teplotě 200 °C, za dobu 5 min. Z naměřených hodnot (viz. Tab. 7 a 8) byly stanoveny hodnoty SI.

- Vzor výpočtu hodnoty SI [%] pro ABS:

Průměrná hodnota všech rozměrů naměřených posuvným měřidlem (s přesností ± 0,01 mm) před měřením samotné roztékavosti pro ABS byla 2,66 mm.

Průměrná hodnota průměrů roztečení daného polymeru naměřených posuvným měřidlem, při dané teplotě a času byla 4,54 mm.

Pro výpočet SI byla použita trojčlenka (přímá úměrnost):

$$2,66 \text{ mm} \dots 100$$

$$4,54 \text{ mm} \dots x \%$$

$$\Rightarrow x = \frac{4,54 \cdot 100}{2,66} = 170,68 = 171 \%$$

Tab. 7: Naměřená data pro stanovení SI (1. část)

Materiál:	ABS		PC/ABS		PLA ₁		PLA ₂	
	Před [mm]	Po [mm]	Před [mm]	Po [mm]	Před [mm]	Po [mm]	Před [mm]	Po [mm]
	3,00	4,75	3,80	7,60	2,10	9,05	1,75	8,20
	2,22	4,30	2,30	6,30	3,60	10,45	3,15	10,45
	2,15	4,20	3,40	7,40	2,40	9,30	2,75	9,50
	3,10	4,60	4,00	7,90	2,20	9,25	3,05	9,65
	2,90	4,75	4,50	4,30	3,90	11,15	2,75	9,45
	2,60	4,65	3,90	7,60	2,85	9,75	2,45	9,20
Průměr:	2,66	4,54	3,65	6,85	2,84	9,83	2,65	9,41
	170,68		187,67		345,75		355,03	
SI [%]	171%		188%		346%		355%	

Tab. 8: Naměřená data pro stanovení SI (2. část)

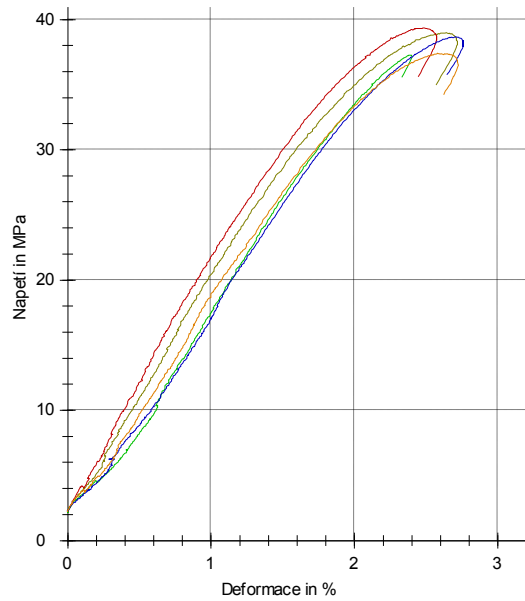
Materiál:	PETG		HiPS		Flexfill	
	Před [mm]	Po [mm]	Před [mm]	Po [mm]	Před [mm]	Po [mm]
	1,75	8,20	3,30	8,35	2,00	3,15
	3,15	10,45	3,20	8,30	2,70	4,05
	2,75	9,70	3,80	8,60	1,95	3,10
	3,05	9,85	3,00	8,10	2,10	3,30
	2,75	9,50	2,20	7,30	3,15	4,55
	2,45	9,20	2,30	7,60	2,15	3,50
Průměr:	2,65	9,48	2,97	8,04	2,34	3,61
	357,86		271,07		154,09	
SI [%]	358%		271%		154%	

Nejvyšší hodnotu SI, tedy nejvyšší roztékavost při zvolené teplotě a zatížení, vykazoval vzorek PETG, přičemž jeho roztékavost byla naměřena na 358 %, následovaný oběma vzorky PLA a HiPS. Naopak nejnižší hodnotu měl Flexfill, jeho roztékavost je 154 %. Pro srovnání s ITT by bylo vhodné použít normované teploty pro jednotlivé materiály.

8.4 Tahová zkouška tiskových strun

Průběh tahové zkoušky byl téměř u všech druhů materiálů měřen na zkušebním materiálu (tisková struna), pro každý materiál v minimálním počtu 5 měření. Toto nebylo možné zajistit pro materiál PC/ABS, kde nejen kvůli nedostatku materiálu, ale i kvůli jeho křehkosti, bylo možno vyhodnotit pouze jedno měření.

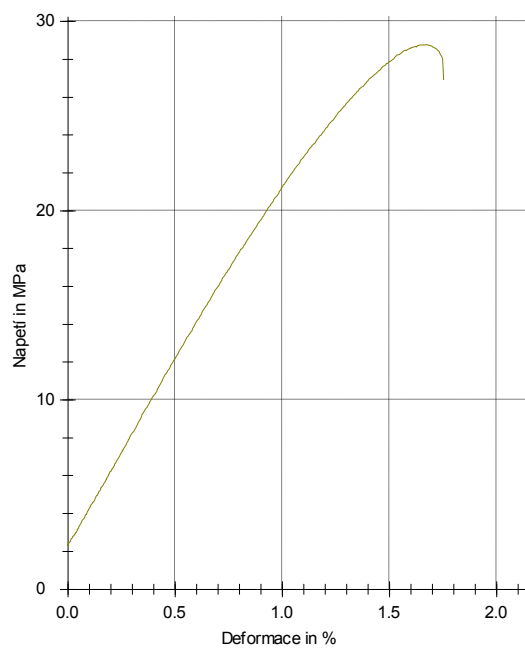
8.4.1 ABS



Obr. 42: Průběh tahové zkoušky pro ABS v závislosti napětí na deformaci

Z tahové zkoušky u ABS byla stanovena průměrná hodnota modulu pružnosti v tahu 1772 MPa, přičemž průměrná hodnota maximálního napětí na mezi pevnosti byla 38,3 MPa a prodloužení na mezi pevnosti bylo 2,6 %.

8.4.2 PC/ABS



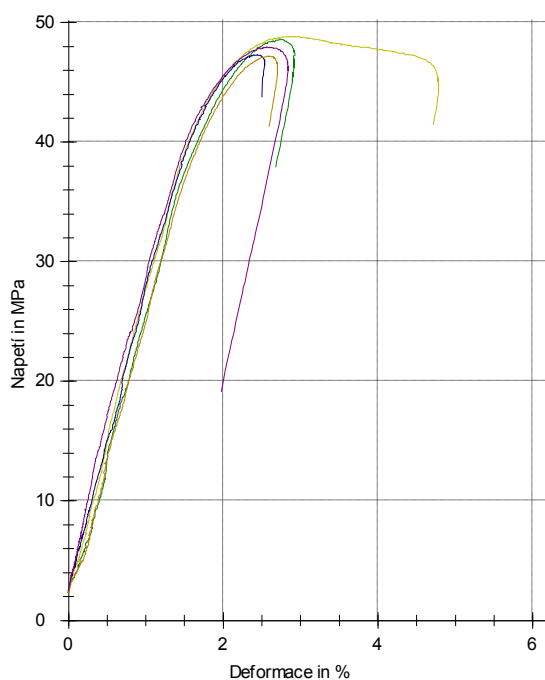
Obr. 43: Průběh tahové zkoušky pro PC/ABS v závislosti napětí na deformaci

Při měření průběhu tahové zkoušky u tiskové struny z materiálu PC/ABS byl naměřen modul pružnosti 1993 MPa, dále bylo stanoveno maximální napětí na mezi pevnosti na 28,8 MPa, při prodloužení na mezi pevnosti 1,7 %.

Pro měření průběhu tahové zkoušky byly pro tento typ materiálu vyzkoušeny jak mechanické tak i pneumatické čelisti. Kvůli vysoké křehkosti materiálu hrozilo rozdrčení filamentu při uchycení v čelistech a při použití průtahoměru. Z důvodu nedostatečného množství materiálu bylo možné vyhodnotit pouze jedno měření a to bez průtahoměru na pneumatických čelistech (kvůli možnému prokluzu). Toto měření mohlo způsobit nepřesnosti a zkreslení výsledků. Pro lepší výsledky by bylo vhodné použít jiný typ uchycovacích čelistí nebo modul pružnosti v tahu naměřit na tzv. lopatkách.

Výsledky měření a průběh tahové zkoušky, pro tento typ materiálu, jsou pouze orientační.

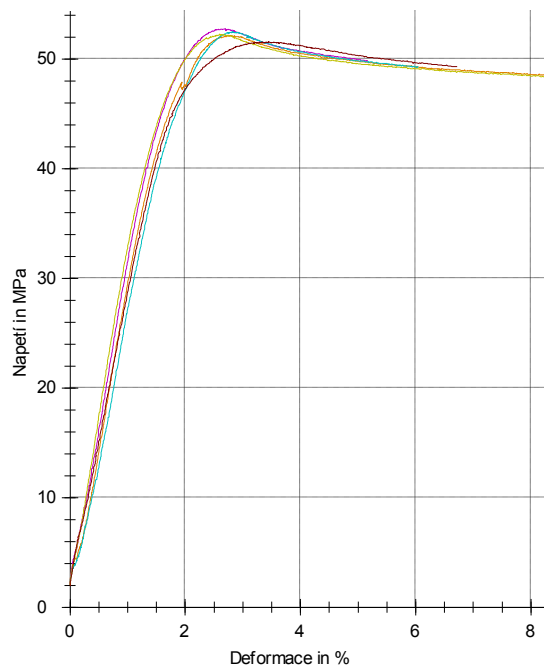
8.4.3 PLA₁



Obr. 44: Průběh tahové zkoušky pro PLA₁ v závislosti napětí na deformaci

Z průběhu tahové zkoušky měřené na materiálu z PLA, vyhodnocené z minimálního možného počtu 5 měření, byl stanoven modul pružnosti v tahu pro PLA₁ na 2370 MPa, přičemž maximální napětí na mezi pevnosti bylo 48 MPa a prodloužení na mezi pevnosti se rovnalo 2,6 %.

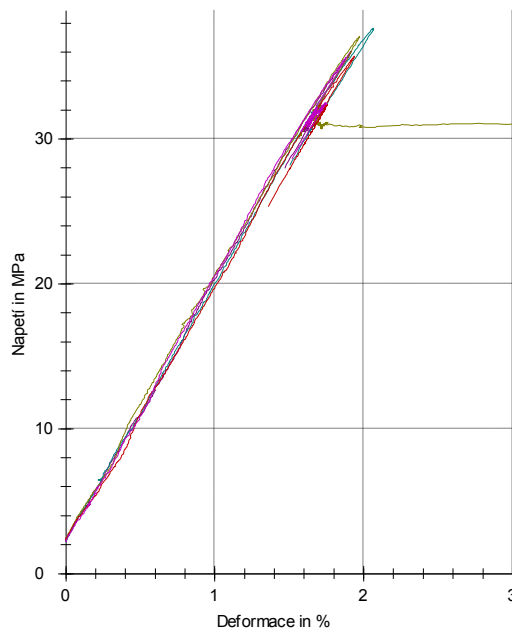
8.4.4 PLA₂



Obr. 45: Průběh tahové zkoušky pro PLA₂ v závislosti napětí na deformaci

Z průběhu tahové zkoušky měřené na materiálu z PLA, vyhodnocené z minimálního možného počtu 5 měření, byl stanoven modul pružnosti v tahu pro PLA₂ na 2726 MPa, přičemž maximální napětí na mezi pevnosti bylo 52,2 MPa a prodloužení na mezi pevnosti se rovnalo 2,8 %.

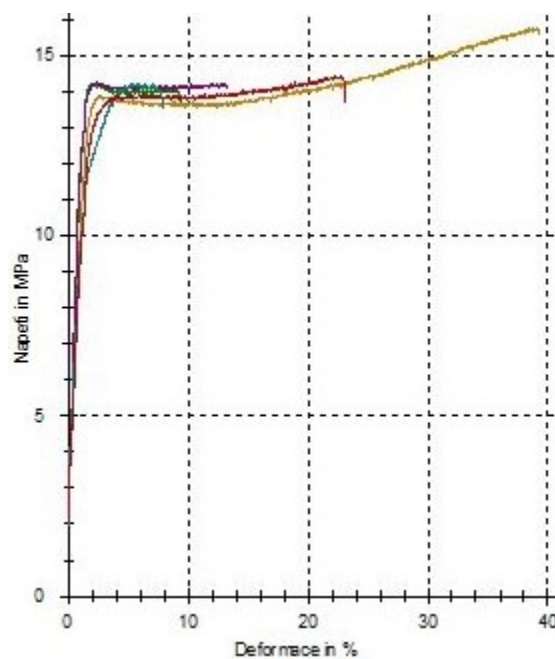
8.4.5 PETG



Obr. 46: Průběh tahové zkoušky pro PETG v závislosti napětí na deformaci

Naměřený průběh tahové zkoušky materiálu PETG ukázal modul pružnosti na 1772 MPa. Maximální napětí naměřené na mezi pevnosti bylo 36,4 MPa a prodloužení na mezi pevnosti bylo 2 %.

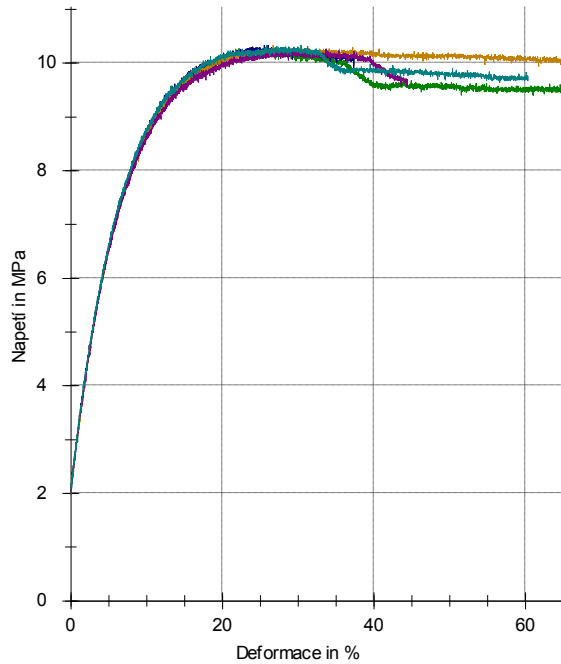
8.4.6 HiPS



Obr. 47: Průběh tahové zkoušky pro HiPS v závislosti napětí na deformaci

Z průběhu tahové zkoušky na trhacím stroji Zwick byl pro materiál HiPS naměřen a softwarem testXpert vyhodnocen modul pružnosti 781,1 MPa, maximální napětí na mezi pevnosti na 14,6 MPa a prodloužení na mezi pevnosti 14,4 %.

8.4.7 Flexfill



Obr. 48: Průběh tahové zkoušky pro Flexfill v závislosti napětí na deformaci

Provedením tahové zkoušky byl vyhodnocen modul pružnosti pro materiál Flexfill na 108,2 MPa. Maximální napětí na mezi pevnosti bylo naměřeno 10,3 MPa a prodloužení na mezi pevnosti bylo 25,6 %. Chování tohoto materiálu se dalo předpokládat, protože se jedná o elastické flexibilní vlákno, které se po vyjmutí z čelistí opět vrátilo do původního tvaru.

Tab. 9: Shrnutí vlastností průběhu tahové zkoušky

Materiál	Modul pružnosti v tahu [MPa]	Max. napětí na mezi pevnosti [Mpa]	Prodloužení na mezi pevnosti [%]	Průměr struny [mm]
ABS	1772	38,30	2,6	1,75
PLA ₁	2370	48,0	2,6	
PLA ₂	2726	52,2	2,8	
HiPS	781	14,6	14,4	
Flexfill	107,6	11,20	28,1	
PC/ABS	1993	28,8	1,7	
PETG	1772	36,4	2,0	

Z Tab. 9 je zřejmé, že nejvyšší modul pružnosti v tahu byl naměřen u materiálů z PLA, přičemž při porovnávání výsledků obou materiálů PLA je zřejmé, že modul pružnosti v tahu, je o cca 350 MPa větší pro PLA₂, než pro PLA₁. Toto může být následkem jiného technologického postupu výroby filamentu nebo přidáním pigmentem. Naopak nejmenší modul pružnosti v tahu vykazoval materiál Flexfill, kdy byla naměřena hodnota kolem 107 MPa

Výsledky naměřených hodnot mohou být zkreslené kvůli použití pouze minimálního množství materiálu, přičemž u materiálu PC/ABS nebylo možno ani toto zajistit. Pro naměření přesných výsledků a zmenšení chyby měření by bylo vhodné použít vyšší počet tiskových strun.

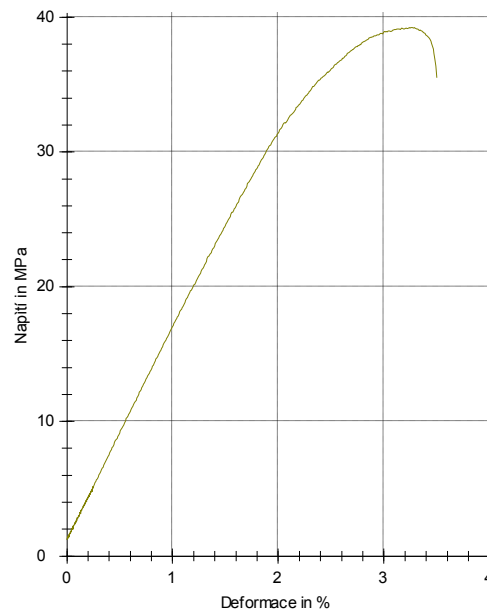
Výrobci uvádějí hodnoty naměřené tahové zkoušky podle normy ISO 527, přičemž typický produkt vyrobený FDM metodou vykazuje nižší pevnost v tahu než pevnost materiálu získaného metodou ISO 527 určenou pro stanovení tahových vlastností. Například 3D vytištěné vzorky z ABS vykazují 60-80% pevnosti vstřikovaného ABS, kde pevnost materiálu je indikována dle ISO 527. Metody uvedené v tomto standardu se získávají s použitím vzorků, které mohou být buď vylisovány podle zvoleného rozměru, nebo vyfrézovány, vyříznuty nebo děrovány ze vstřikovaných nebo lisovaných desek. Navíc během procesu FDM existuje mnoho faktorů (tloušťka tiskové vrstvy, teplota tisku, typ a procento výplně, atd.), které mohou ovlivnit mechanické vlastnosti konečné tištěné části. [51]

8.5 Tříbodová ohybová zkouška

Kvůli nesplnění minimálního vhodného počtu měřených vzorků, způsobeného nedostatečným množstvím zkoumaného materiálu, jsou uvedené průběhy ohybových zkoušek a vypočtené hodnoty u lisovaných tělísek, vyhodnocené softwarem testXpert, pouze orientační a jsou zde uvedeny pouze pro představu průběhu ohybové zkoušky.

Pouze u materiálu PETG bylo zajištěno dostatečné množství materiálu a tak mohla být lisovaná tělíska zhotovena, alespoň v minimálním možném počtu, pro měření průběhu ohybové zkoušky.

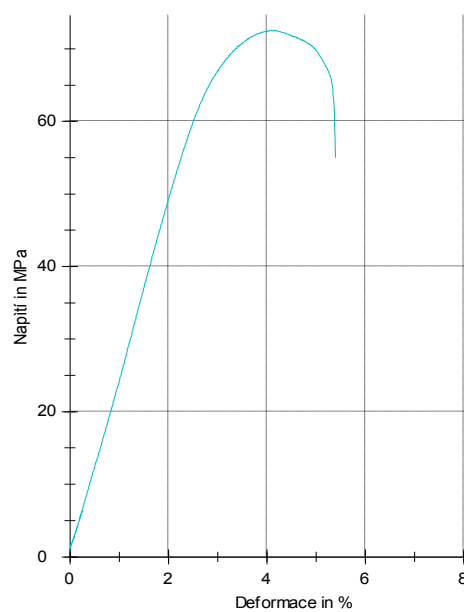
8.5.1 ABS



Obr. 49: Průběh ohybové zkoušky pro ABS v závislosti napětí na deformaci

Pro lisované tělísko z materiálu ABS byl z průběhu ohybové zkoušky změřen modul pružnosti 1560 MPa, maximální napětí na mezi pevnosti 39,24 MPa a prodloužení na mezi pevnosti bylo stanoveno na 3,3 %.

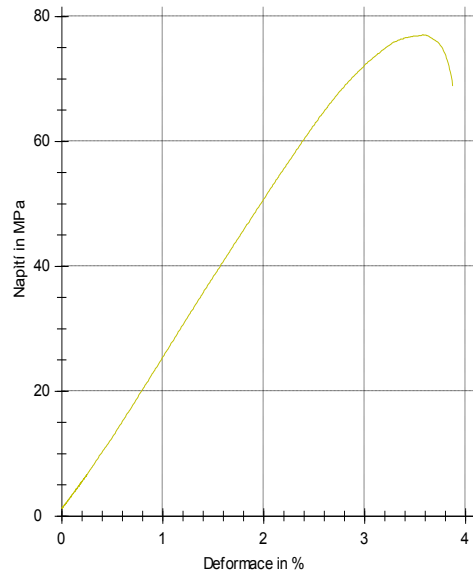
8.5.2 PC/ABS



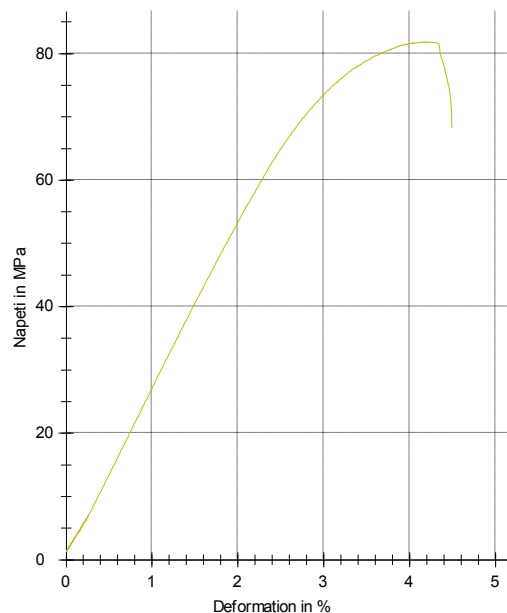
Obr. 50: Průběh ohybové zkoušky pro PC/ABS v závislosti napětí na deformaci

Pro lisované tělísko z materiálu PC/ABS byl z průběhu ohybové zkoušky změřen modul pružnosti 2140 MPa, maximální napětí na mezi pevnosti 72,53 MPa a prodloužení na mezi pevnosti bylo stanoveno na 4,1 %.

8.5.3 PLA₁ a PLA₂ – Lisovaná tělíska



Obr. 51: Průběh ohybové zkoušky pro PLA₁ v závislosti napětí na deformaci



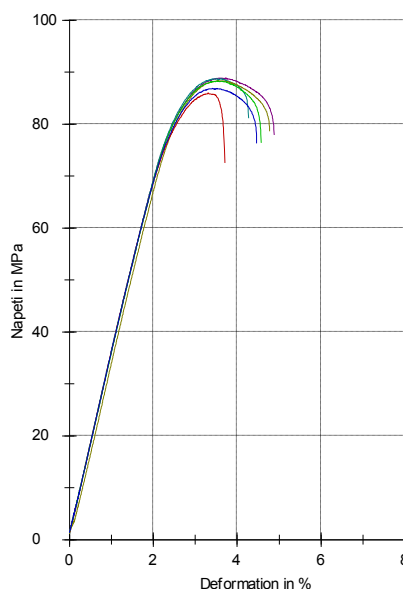
Obr. 52: Průběh ohybové zkoušky pro PLA₂ v závislosti napětí na deformaci

Pro lisovaná tělíska z materiálu PLA byl z průběhu ohybové zkoušky naměřen modul pružnosti, maximální napětí na mezi pevnosti a prodloužení na mezi pevnosti. Pro PLA₁ byl mo-

dul pružnosti v ohybu 2210 MPa a pro PLA₂ byl 2170 MPa, maximální napětí na mezi pevnosti pro PLA₁ bylo naměřeno 77,06 MPa a pro PLA₂ bylo naměřeno 81,8 MPa a prodloužení na mezi pevnosti bylo stanoveno pro PLA₁ na 3,6 % a pro PLA₂ na 4,2 %. Při srovnání obou druhů použitých PLA materiálů bylo zřejmé, že modul pružnosti zůstal víceméně stejný. Změnili se pouze hodnoty u maximálního napětí na mezi pevnosti a prodloužení na mezi pevnosti, což mohly způsobit jiné technologické podmínky při výrobě tiskové struny, přítomnost odlišného pigmentu, či pravděpodobněji jiných přísad (např. separační činidlo). Vzorek PLA₁ vykazoval dle RTG i DSC analýzy výraznější pík při 26,6°2 θ , který zřejmě přináší nějaké přísadě, než PLA₂. To se shoduje i s pozorováním mechanických vlastností, kdy s vyšší mírou uspořádanosti klesá prodloužení na mezi pevnosti, což je logické vzhledem k tomu, že ubývá neuspořádané fáze, která je zodpovědná za deformaci.

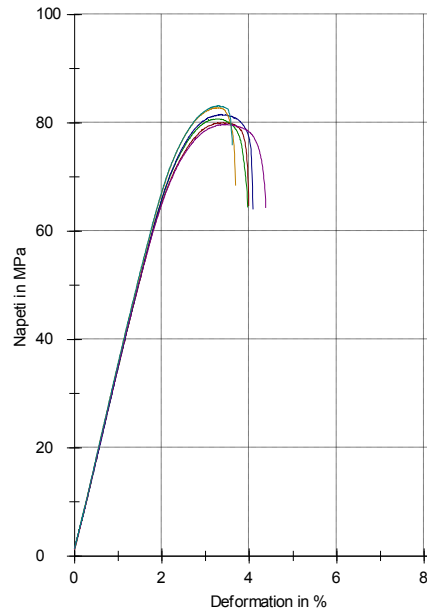
8.5.4 PLA₁ – Vytištěná tělíska

Průběh tříbodové ohybové zkoušky pro materiál PLA byl měřen na vytisknutých tělíscích, při definovaných tloušťkách tiskových vrstev. Měření probíhalo pro každou sérii (pro jednotlivé tiskové vrstvy) po 5 měřeních.



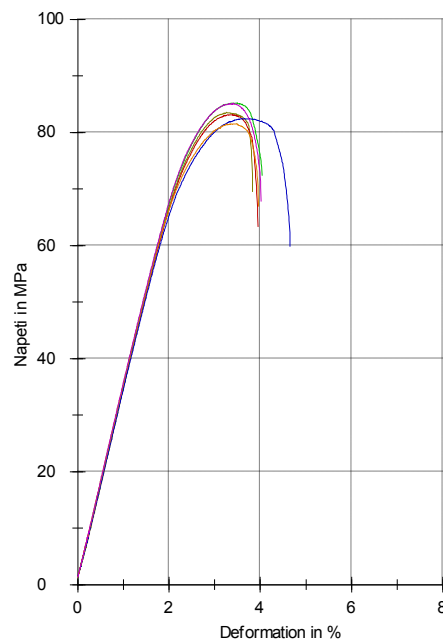
Obr. 53: Průběh ohybové zkoušky pro tištěné tělísko PLA₁ o tiskové vrstvě 0,08 mm v závislosti napětí na deformaci

Průběhem ohybové zkoušky byl změřen a stanoven modul pružnosti v ohybu pro PLA₁ s tiskovou vrstvou 0,08 mm na 3250 MPa, maximální napětí na mezi pevnosti 87,8 MPa a prodloužení na mezi pevnosti bylo stanoveno na 3,5 %.



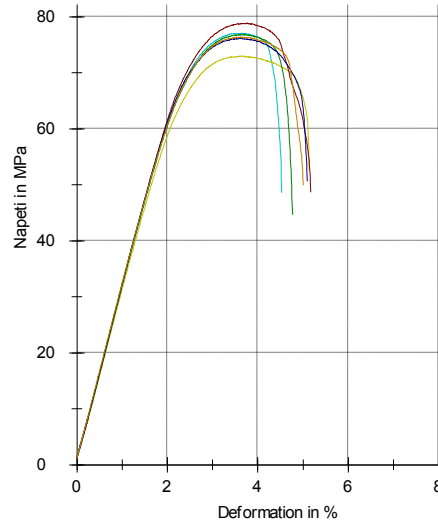
Obr. 54: Průběh ohybové zkoušky pro tištěné tělísko PLA₁ o tiskové vrstvě 0,10 mm v závislosti napětí na deformaci

Průběh ohybové zkoušky udává naměřený modul pružnosti v ohybu pro PLA₁ s tloušťkou tiskové vrstvy 0,10 mm, který byl 3250 MPa, maximální napětí na mezi pevnosti 81,3 MPa a prodloužení na mezi pevnosti bylo stanoveno na 3,3 %.



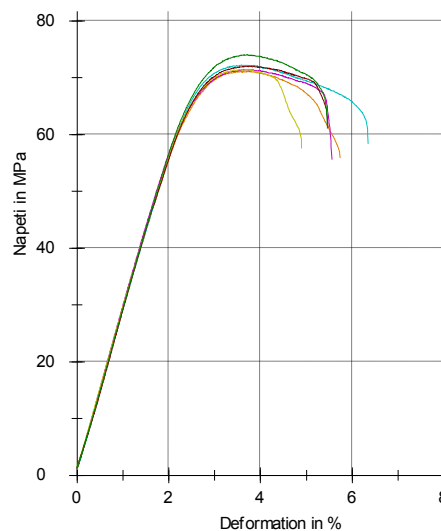
Obr. 55: Průběh ohybové zkoušky pro tištěné tělísko PLA₁ o tiskové vrstvě 0,15 mm v závislosti napětí na deformaci

Z průběhu ohybové zkoušky byl změřen modul pružnosti v ohybu pro PLA₁ s tiskovou vrstvou 0,15 mm na 3240 MPa. Maximální napětí na mezi pevnosti bylo naměřeno 83,5 MPa a prodloužení na mezi pevnosti bylo stanoveno na 3,4 %.



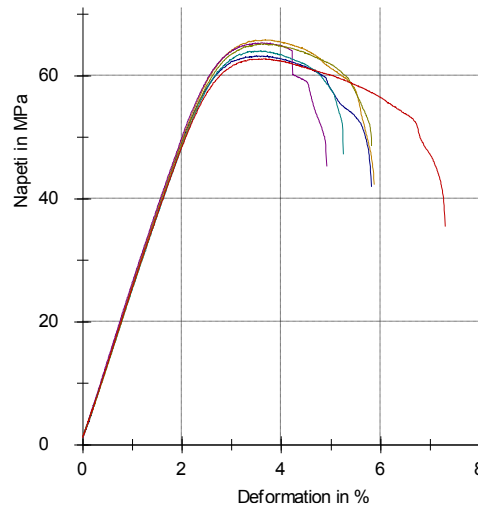
Obr. 56: Průběh ohybové zkoušky pro tištěné tělísko PLA₁ o tiskové vrstvě 0,20 mm v závislosti napětí na deformaci

Průběhem ohybové zkoušky byl změřen modul pružnosti v ohybu pro PLA₁ s tiskovou vrstvou 0,20 mm na 2900 MPa. Maximální napětí na mezi pevnosti bylo naměřeno 76,4 MPa a prodloužení na mezi pevnosti bylo stanoveno na 3,7 %.



Obr. 57: Průběh ohybové zkoušky pro tištěné tělísko PLA₁ o tiskové vrstvě 0,25 mm v závislosti napětí na deformaci

Z průběhu ohybové zkoušky byl změřen modul pružnosti v ohybu pro PLA₁ s tiskovou vrstvou 0,25 mm a stanoven na 2660 MPa. Pro maximální napětí na mezi pevnosti bylo naměřeno 72 MPa a měřením bylo prodloužení na mezi pevnosti stanoven na 3,6 %.

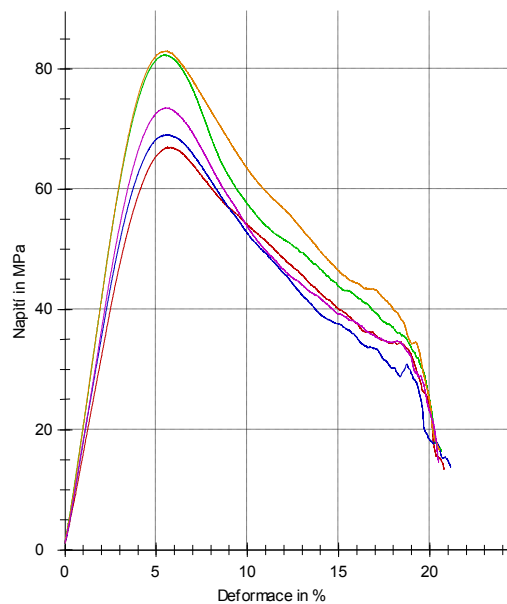


Obr. 58: Průběh ohybové zkoušky pro tištěné tělísko PLA₁ o tiskové vrstvě 0,30 mm v závislosti napětí na deformaci

Modul pružnosti pro PLA₁ s tiskovou vrstvou 0,30 mm byl 2340 MPa. Maximální napětí na mezi pevnosti bylo naměřeno 64,4 MPa a prodloužení na mezi pevnosti bylo 3,6 %.

8.5.5 PETG

- Lisovaná tělíska:

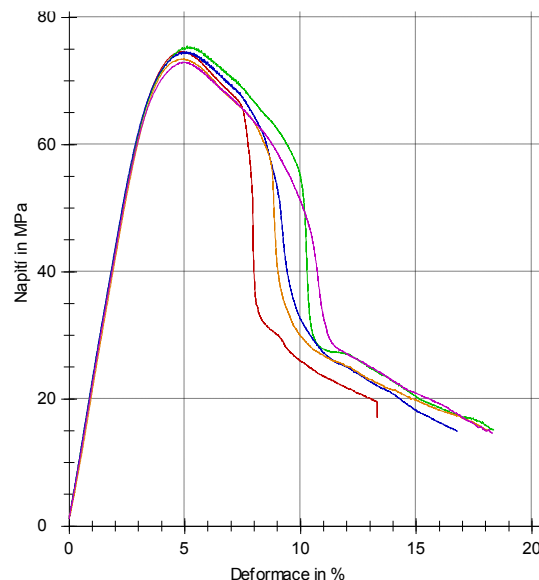


Obr. 59: Průběh ohybové zkoušky pro PETG v závislosti napětí na deformaci

Pro lisované tělíčko z materiálu PETG byl z průběhu ohybové zkoušky změřen modul pružnosti 1550 MPa, maximální napětí na mezi pevnosti 74,98 MPa a prodloužení na mezi pevnosti bylo stanoveno na 5,5 %. Na Obr. 59 je vidět rozdíl napětí, které bylo při ohybu dvou tělísek z pěti o cca 10 MPa větší. Toto mohlo být způsobeno výrobou tělísek, špatnou návažkou, spojením roztaveného materiálu ve formě nebo špatným vyjmutím tělísek z formy. Pro zjištění správných hodnot napětí by bylo vhodné použít a naměřit na tříbodovém ohybu více tělísek.

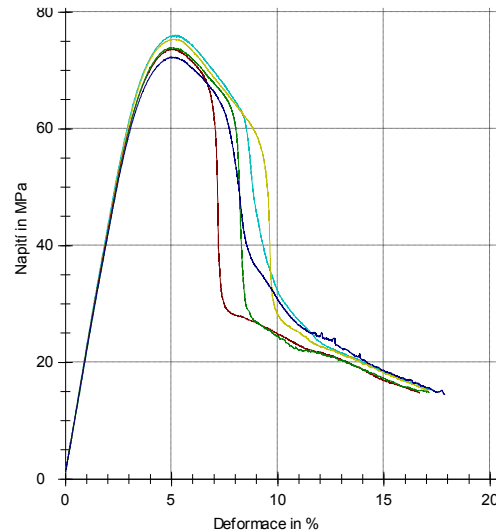
- Vytištěná tělíska:

Průběh tříbodové ohybové zkoušky materiálu PETG byl naměřen na vytisknutých tělískách při definovaných tloušťkách tiskových vrstev. Měření probíhalo pro každou sérii (pro jednotlivé tiskové vrstvy) po 5 měřeních.



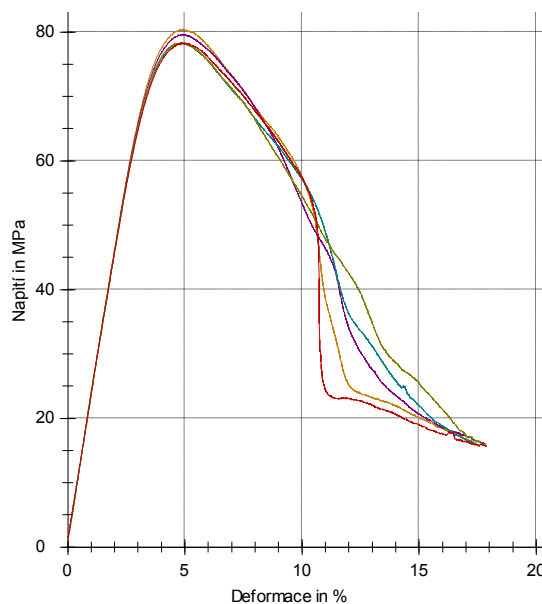
Obr. 60: Průběh ohybové zkoušky pro tištěné tělíčko PETG o tiskové vrstvě 0,05 mm v závislosti napětí na deformaci

Při průběhu ohybové zkoušky byl změřen modul pružnosti v ohybu pro vytištěné tělíčko PETG s tiskovou vrstvou 0,05 mm a stanoven na 2010 MPa, maximální napětí na mezi pevnosti 74,24 MPa a prodloužení na mezi pevnosti bylo stanoveno na 5,0 %.



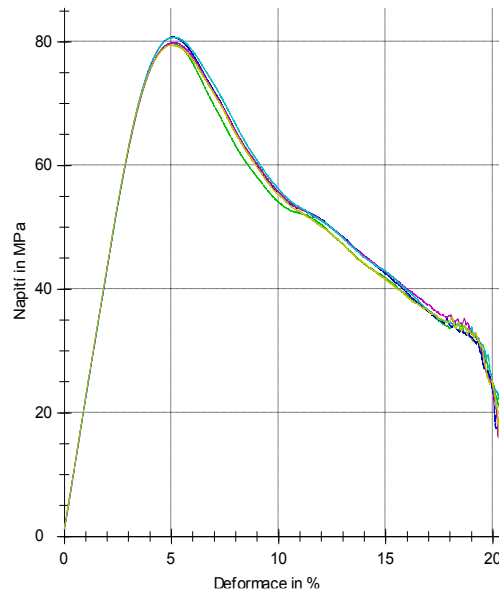
Obr. 61: Průběh ohybové zkoušky pro tištěné tělísko PETG o tiskové vrstvě 0,08 mm v závislosti napětí na deformaci

Pro vytištěné tělísko PETG s tiskovou vrstvou 0,08 mm byl z průběhu ohybové zkoušky změřen modul pružnosti v ohybu, který je 2040 MPa, maximální napětí na mezi pevnosti 74,26 MPa a prodloužení na mezi pevnosti bylo stanoveno na 5,0 %.



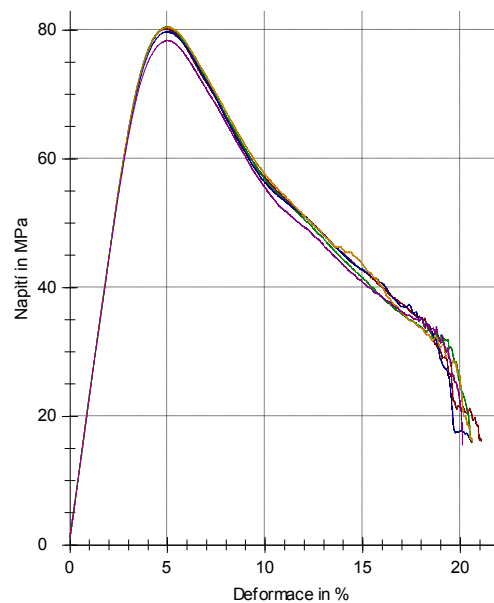
Obr. 62: Průběh ohybové zkoušky pro tištěné tělísko PETG o tiskové vrstvě 0,10 mm v závislosti napětí na deformaci

Modul pružnosti v ohybu pro vytištěné tělísko PETG s tiskovou vrstvou 0,10 mm byl 2180 MPa, maximální napětí na mezi pevnosti 79,02 MPa a prodloužení na mezi pevnosti bylo stanoveno na 4,9 %.



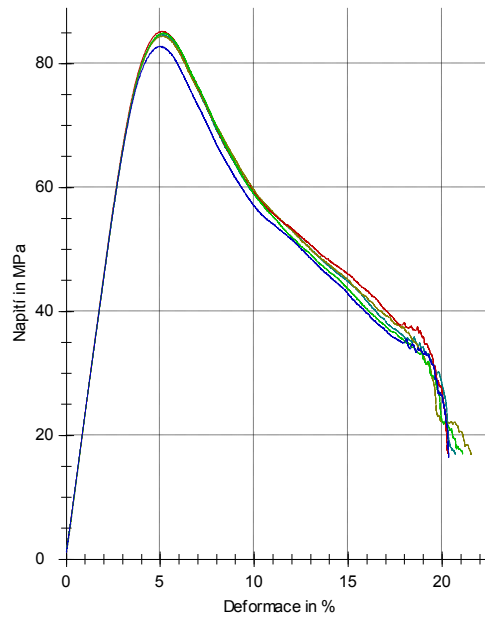
Obr. 63: Průběh ohybové zkoušky pro tištěné tělísko PETG o tiskové vrstvě 0,15 mm v závislosti napětí na deformaci

Modul pružnosti, naměřený z průběhu ohybové zkoušky pro vytištěné tělísko PETG s tiskovou vrstvou 0,15 mm byl 2070 MPa, maximální napětí na mezi pevnosti 80,16 MPa a prodloužení na mezi pevnosti bylo stanoveno na 5,0 %.



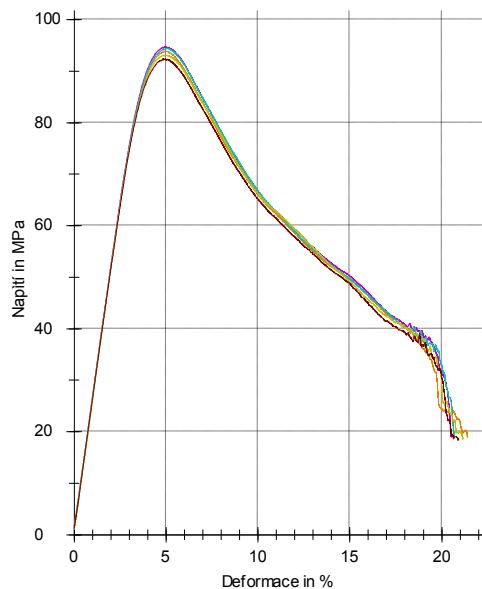
Obr. 64: Průběh ohybové zkoušky pro tištěné tělísko PETG o tiskové vrstvě 0,20 mm v závislosti napětí na deformaci

Pro vytištěné tělísko PETG s tiskovou vrstvou 0,20 mm byl naměřen modul pružnosti 2130 MPa, maximální napětí na mezi pevnosti 79,89 MPa a prodloužení na mezi pevnosti bylo stanoveno na 5,0 %.



Obr. 65: Průběh ohybové zkoušky pro tištěné tělísko PETG o tiskové vrstvě 0,25 mm v závislosti napětí na deformaci

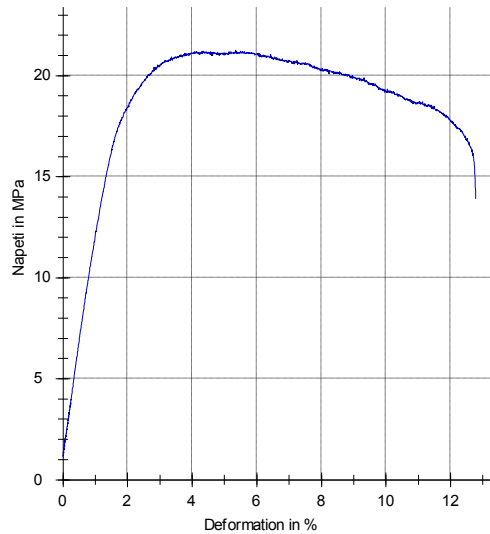
Naměřený modul pružnosti v ohybu pro vytištěné tělísko PETG s tiskovou vrstvou 0,25 mm byl 2130 MPa, maximální napětí na mezi pevnosti 84,42 MPa a prodloužení na mezi pevnosti bylo 5,1 %.



Obr. 66: Průběh ohybové zkoušky pro tištěné tělísko PETG o tiskové vrstvě 0,30 mm v závislosti napětí na deformaci

Modul pružnosti v ohybu pro vytištěné tělísko PETG s tiskovou vrstvou 0,30 mm byl 2380 MPa, maximální napětí na mezi pevnosti 93,72 MPa a prodloužení na mezi pevnosti bylo 4,9 %.

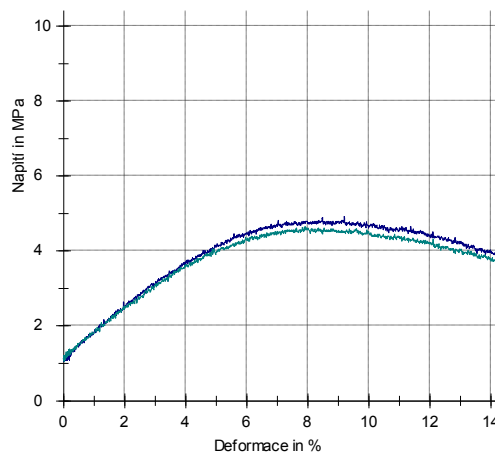
8.5.6 HiPS



Obr. 67: Průběh ohybové zkoušky pro PETG v závislosti napětí na deformaci

Pro lisované tělísko z materiálu HiPS, byl z průběhu ohybové zkoušky změřen modul pružnosti 1100 MPa, maximální napětí na mezi pevnosti 21,3 MPa a prodloužení na mezi pevnosti bylo stanoveno na 5,3 %.

8.5.7 Flexfill



Obr. 68: Průběh ohybové zkoušky pro PETG v závislosti napětí na deformaci

Pro lisované tělísko z materiálu Flexfill, byl z průběhu ohybové zkoušky změřen modul pružnosti 75 MPa. Naměřené maximální napětí na mezi pevnosti bylo 5,16 MPa a prodloužení na mezi pevnosti bylo 12 %. Jelikož se jedná o flexibilní materiál, tak zkušební tělíska vyrobená z tohoto filamentu se po odložení opět vrátila do původního tvaru.

Tab. 10: Shrnutí vlastností z průběhu ohybové zkoušky

Materiál	Modul pružnosti v ohybu [MPa]	Max. napětí na mezi pevnosti [Mpa]	Prodloužení na mezi pevnosti [%]
ABS - lisované tělísko	1560	39,24	3,3
PLA ₁ - lisované tělísko	2210	77,06	3,6
PLA ₁ - tisk., tl. vrstvy: 0,08 mm	3250	87,8	3,5
PLA ₁ - tisk., tl. vrstvy: 0,10 mm	3250	81,3	3,3
PLA ₁ - tisk., tl. vrstvy: 0,15 mm	3240	83,5	3,4
PLA ₁ - tisk., tl. vrstvy: 0,20 mm	2900	76,4	3,7
PLA ₁ - tisk., tl. vrstvy: 0,25 mm	2660	72,1	3,6
PLA ₁ - tisk., tl. vrstvy: 0,30 mm	2340	64,4	3,6
PLA ₂ - lisované tělísko	2170	81,8	4,2
HiPS - lisované tělísko	1100	21,3	5,3
Flexfill - lisované tělíška	75	5,16	12
PC/ABS - lisované tělísko	2140	72,53	4,1
PETG - lisované tělíška	1550	74,98	5,5
PETG - tisk., tl. vrstvy: 0,05 mm	2010	74,24	5,0
PETG - tisk., tl. vrstvy: 0,08 mm	2040	74,26	5,0
PETG - tisk., tl. vrstvy: 0,10 mm	2180	79,02	4,9
PETG - tisk., tl. vrstvy: 0,15 mm	2070	80,16	5,0
PETG - tisk., tl. vrstvy: 0,20 mm	2130	79,89	5,0
PETG - tisk., tl. vrstvy: 0,25 mm	2130	84,42	5,1
PETG - tisk., tl. vrstvy: 0,30 mm	2380	93,72	4,9

Z výsledků naměřeného modulu pružnosti v ohybu lze pozorovat jiné hodnoty, než udává výrobce. Toto může být ovlivněno tepelným zpracováním, tloušťkou měřeného vzorku, příp. tloušťkou tiskové vrstvy nebo také u vytištěných zkušebních tělísek, přilnavostí tisknutého materiálu k použité podložce. Další možností by bylo, že zkrácené či nepřesné hodnoty mohlo způsobit vyjímání zkušebních tělísek z formy či forma samotná. U materiálu PETG z Tab 10 vyplývá, že modul pružnosti roste s větší tloušťkou tiskové vrstvy. Naopak tomu bylo u PLA₁, kdy z naměřených hodnot vyplývá, že modul pružnosti klesá při rostoucí tiskové vrstvě. Toto je možné pouze konstatovat, protože bylo použito minimální množství tělísek k provedení ohybové zkoušky. Pro zlepšení odhadu, zda opravdu na tiskové vrstvě závisí modul pružnosti v ohybu, by bylo vhodné použít vyšší počet tělísek a měření opakovat.

ZÁVĚR

Cílem předložené bakalářské práce bylo charakterizovat strukturní a mechanické vlastnosti materiálů, které jsou používány FDM metodou při 3D tisku na RepRap 3D tiskárně.

Teoretická část práce vypovídá o polymerních materiálech, které jsou nejčastěji pro 3D tisk využívány a které byly vybrány pro měření v této bakalářské práci. Byly popsány jejich charakteristické vlastnosti. Vlastnosti daných polymerních materiálů jsou pro 3D tisk velmi důležité, proto je výběr správného polymeru rozhodující pro vytištění součásti a to obzvláště, pokud má součást funkční využití v rámci konkrétního výrobku.

Praktická část byla převážně zaměřena na studium materiálových vlastností a chování polymerních materiálů při různých zátěžových zkouškách (tah a ohyb). K experimentu bylo vybráno 6 druhů polymerních materiálů ve formě tiskových strun. Pro zjišťování strukturních vlastností daných materiálů byly provedeny RTG a DSC analýzy, ke zjištění roztékavosti materiálu bylo využito metody splitting index a dále byla provedena tahová zkouška. Ze strun byla poté vylisována zkušební tělíska pro měření některých mechanických zkoušek a RTG analýza. Pro srovnání mechanických vlastností materiálů lisovaných tělísek byla ve spolupráci s Ing. arch. Martinem Hřibem a Ing. Petrem Krátkým získána vytištěná tělíska z materiálu PLA a PETG.

Pro měření RTG analýzy byly použity tiskové struny, lisovaná i vytištěná tělíska. Z naměřené RTG analýzy vyplývá, že se výrobci snaží vyrábět filamenty spíše s amorfni strukturou, která je lepší pro roztékavost materiálu při samotném 3D tisku a to, i když se v daných polymerních materiálech nachází malé procento krystalické struktury.

Nejčastěji se pík vyznačující podíl krystalické struktury vyskytoval při hodnotách kolem $26,5^{\circ}2\Theta$, což mohlo být zapříčiněno nějakou přísadou. Z měření RTG u obou vzorků PLA vyplývá, že by se mohlo jednat o přísadu určenou pro snadnější zpracovávání struny (např. separační činidlo), kdy se při úhlu $2\Theta(^{\circ})$ na grafu z RTG analýzy vyskytují píky na stejném místě, přičemž vzorky obsahují odlišný pigment.

Fakt, že se výrobci snaží vyrábět filamenty s téměř amorfni strukturou, ukazovala i DSC analýza, která zkoumá termické vlastnosti polymerů. DSC záznamy měřených vzorků vykazují malý podíl krystalického uspořádání ve hmotě. Charakteristické teploty jednotlivých materiálů byly v případě prvního i druhého ohřevu téměř totožné, což značí, že výrobci vytváří předpoklady pro ideální podmínky chlazení. Jedinou výjimkou byl PETG, kdy teplota

tání při prvním ohřevu byla 77,33 °C a při druhém 83,83 °C, což by znamenalo velký rozdíl ve velikosti krystalů, ovšem celková krystalinita PETG byla velmi nízká. Zajímavé chování vykazoval PLA, který při obou ohřevech nejprve tál, pak proběhla tzv. studená krystalizace následovaná druhým táním. Při chlazení PLA vykazoval pouze teplotu skelného přechodu pod teplotou prvního tání. Toto odpovídá záznamům z RTG analýzy, kde byl PLA téměř amorfni.

Měření tokových vlastností vzhledem k minimálnímu množství vzorku probíhalo pomocí metody splitting index za definovaných podmínek při 200 °C po dobu 5 minut, kdy bylo použito závaží o hmotnosti 200g. Nejvyšší hodnotu splitting indexu vykázal materiál PETG.

Tahová zkouška, která byla prováděna na tiskových strunách, prokázala, že nejvyšší modul pružnosti v tahu a zároveň i nejvyšší hodnotu maximálního napětí na mezi pevnosti má materiál PLA₁ i PLA₂.

Z výsledků naměřeného modulu pružnosti v ohybu měřených na zkušebních těliscích lze pozorovat jiné hodnoty, než udává výrobce. Toto může být ovlivněno tepelným zpracováním, tloušťkou měřeného vzorku, příp. tloušťkou tiskové vrstvy nebo také u vytištěných zkušebních tělísek přilnavostí tisknutého materiálu k použité podložce. Nepřesné hodnoty také mohlo způsobit vyjímání zkušebních tělísek z formy či forma samotná. U vytištěných tělísek z materiálu PETG modul pružnosti roste s větší tloušťkou tiskové vrstvy. Naopak tomu bylo u vytištěných tělísek z PLA, konkrétně u PLA₁, kdy modul pružnosti klesá při rostoucí tiskové vrstvě. Toto je možné pouze konstatovat z naměřených hodnot, protože bylo použito minimální množství tělísek k provedení ohybové zkoušky. Pro zlepšení odhadu, zda opravdu na tiskové vrstvě závisí modul pružnosti v ohybu, by bylo vhodné použít vyšší počet tělísek a měření opakovat.

Z důvodu nedostatečného množství materiálu a také vyrobených lisovaných tělísek z ABS, PLA₁, PLA₂, HiPS, Flexfill a PC/ABS, nemohl být splněn minimální potřebný počet měření, proto výsledné hodnoty mohou být nepřesné a jsou uvedeny pouze jako orientační.

Porovnáním výsledných hodnot z ohybové zkoušky u vylisovaných a vytištěných tělísek bylo zřejmé, že vytištěná tělíska jsou mnohem odolnější a pevnější (v závislosti na tloušťce tiskové vrstvy).

Z RTG analýzy vyplývá, že vlivem tepelného zpracování se podíl krystalinity u lisovaných tělísek PLA₁ snížil víc oproti vytištěnému tělísku.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] HŘIB, Martin. FDM, FFD, FFF, PJP – 3D tisk vytlačovaným termoplastickým polymerním vláknem. Zlín, 2016.
- [2] HOMOLA, Jan. 3D tisk. In: 3D tisk [online]. Brno: Nová média, c2014 [cit. 2017-02-03]. Dostupné z: <http://www.3d-tisk.cz/3d-tisk/>.
- [3] KEREČANINOVÁ, Zuzana a Jaroslav ŘASA. Nekonenční metody obrábění 9. díl. Mmspektrum [online]. 2008, (11), str. 50 [cit. 2017-02-03]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvenncni-metody-obrabeni-9-dil.html>.
- [4] CHLEBO, Martin. Budoucnost materiálů pro 3D tisk. In: Historie 3D tisku [online]. Imanica [cit. 2017-02-03]. Dostupné z: <http://www.o3d.cz/3d-tisk/%C5%A1t%C3%ADtky/historie-3d-tisku/>.
- [5] 3D tisk. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2016 [cit. 2017-02-03]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/3D_tisk#cite_note-3.
- [6] WANG, Wego. Reverse Engineering: Technology of Reinvention. 1. vyd. Boca Raton, Florida: Taylor & Francis Group, 2011, ISBN 978-1-4398-0630-2.
- [7] Fakta o 3D tisku. In: 3Dstruny.cz [online]. Benešov u Prahy: Náplně.com & Toner 1, [2009] [cit. 2017-02-03]. Dostupné z: http://www.3dstruny.cz/Fakta-o-3D-tisku-a5_10.htm.
- [8] RepRap. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2018-04-12]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/RepRap>.
- [9] Fused deposition modeling [online]. In Wikipedia, The Free Encyclopedia, upraveno 2015, [cit. 2018-04-10]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Fused_deposition_modeling&oldid=661029019.
- [10] BARRY, Carol et al. UNDERGRADUATE MODULES FOR BIO-BASED PLASTICS [online]. Massachusetts, 2016 [cit. 2018-05-11]. Dostupné z: <http://read.nxtbook.com/wiley/plasticsengineering/march2016/technicalpaper.html>

- [11] BĚHÁLEK, Luboš. Přejížděcí teploty polymerů. *Polymery* [online]. © Code Creator, 2016 [cit. 2018-04-29]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/06.html>.
- [12] ABS Akrylonitrilbutadienstyren. In: ABS [online]. Most: SITTECH CZ [cit. 2017-02-04]. Dostupné z: <http://sittech.cz/abs-akrylonitrilbutadienstyren>.
- [13] High Impact Polystyrene (HIPS). High Impact Polystyrene (HIPS) [online]. Houston: Blackwell Plastics, c2009-2012 [cit. 2017-02-04]. Dostupné z: <http://www.blackwellplastics.com/HIPS.html>.
- [14] GRIESER, Franz. PLA vs ABS: Filaments for 3D Printing Explained & Compared. In: PLA vs. ABS.. [online]. Německo: All3DP, 2014 [cit. 2017-02-05]. Dostupné z: <https://all3dp.com/pla-abs-3d-printer-filaments-compared/>.
- [15] PLA. In: PLA » 3D tisk [online]. Brno: Nová média, c2014 [cit. 2017-02-05]. Dostupné z: <http://www.3d-tisk.cz/pla/>.
- [16] PUENTES, Alexis. Don't Waste Material Add Support Efficiently. In: 3Dprinterchat.com [online]. SWEDEN, 2017 [cit. 2018-04-12]. Dostupné z: <https://3dprinterchat.com/2016/03/3dprinting-supportonmeshmixer/>.
- [17] GORIN, Arielle. LEGO: IS THIS TIME REALLY DIFFERENT? In: Saybrook Partners [online]. New Canaan: Saybrook Partners, 2016 [cit. 2017-02-05]. Dostupné z: <https://www.saybrookpartners.com/single-post/2016/09/26/Lego-Is-this-time-really-different>.
- [18] PC/ABS - polykarbonát/akrylonitril-butadién-styrén. In: PC/ABS [online]. Praha: RESINEX Group, c2017 [cit. 2017-02-05]. Dostupné z: <http://www.resinex.cz/polymerove-typy/pc-abs.html>.
- [19] Prodávané materiály. In: 3Dstruny.cz [online]. Benešov u Prahy: Náplně.com & Toner 1, 2009 [cit. 2017-02-05]. Dostupné z: http://www.3dstruny.cz/Prodavane-materialy-a5_9.htm.
- [20] KRAMOLIŠ, Zdeněk. Vliv vnějších polí na přechod II - I u isotaktického PB - 1 [online]. Zlín, 2014 [cit. 2018-04-12]. Dostupné z: https://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/28679/kramoliš_2014_dp.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Vedoucí práce Martina Hřibová.

- [21] KUBIŠOVÁ, Milena. Srovnání Spliting indexu a Indexu toku taveniny polymerů [online]. Zlín, 2012 [cit. 2018-04-12]. Dostupné z: https://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/22944/kubisova_2012_bp.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Bakalářská práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Vedoucí práce Martina Hřibová.
- [22] KOSLOW, Tyler. New Multi-Material Upgrade Released For Prusa i3 MK2 3D Printer. In: *3DPRINT.COM...* [online]. 2016 [cit. 2018-04-24]. Dostupné z: <https://3dprint.com/150853/multi-material-prusa-upgrade/>.
- [23] CHEMPOINT: Termická analýza – Diferenční kompenzační kalorimetrie (DSC) [online]. [cit. 2018-04-12]. Dostupné z: <http://www.chempoint.cz/kucerik-2>.
- [24] VYČICHL, Jan a Michal MICKA. Tvorba modelu přilby z 3D skenování. In: *Mech.f.d.cvut.cz* [online]. Praha: ČVUT, 2009 [cit. 2018-04-12]. Dostupné z: <http://mech.f.d.cvut.cz/presentation/other/tvorba-modelu-prilby-z-3d-skenovani/>.
- [25] TERMICKÉ ANALÝZY [online]. [cit. 2018-04-11]. Dostupné z: http://ufmi.ft.utb.cz/texty/kzm/KZM_06.pdf.
- [26] FDM 3D Printing materials compared. In: *3D HUBS* [online]. Amsterdam, The Netherlands: 3D Matter, c2018 [cit. 2018-05-07]. Dostupné z: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/fdm-3d-printing-materials-compared>.
- [27] KOCIÁNOVÁ, Magdaléna. Slideplayer: Analytické metody využívající X-Rays [online]. 2016 [cit. 2018-04-12]. Dostupné z: <http://slideplayer.cz/slide/12549974/>.
- [28] Krystalografická soustava. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2018-04-12]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Krystalografick%C3%A1_soustava.
- [29] MATĚJKA, Pavel. Strukturní a povrchová analýza: Metody strukturní a povrchové analýzy - od roku 2009/10 [online]. [cit. 2018-04-12]. Dostupné z: <https://old.vscht.cz/anl/matejka/05-RTG-difrakce-09.pdf>. Prezentace. Vysoká škola chemicko-technologická v Praze.
- [30] ČAPKOVÁ, Pavla. Vyukove_texty_XRD.pdf: RTG DIFRAKCE V MATERIÁLOVÉM VÝZKUMU [online]. Ústí nad Labem, 2011 [cit. 2018-04-

- 12]. Dostupné z: http://www.kmt.tul.cz/edu/podklady_kmt_magis-tri/MSS/Vyukove_texty_XRD.pdf. Studijní materiály. Přírodovědecká fakulta Univerzity J.E. Purkyně V Ústí nad Labem.
- [31] PUENTES, Alexis. Don't Waste Material Add Support Efficiently. In: 3Dprinterchat.com [online]. SWEDEN, 2017 [cit. 2018-04-12]. Dostupné z: <https://3dprinterchat.com/2016/03/3dprinting-supportonmeshmixer/>.
- [32] ŘASA, Jaroslav a Zuzana KEREČANINOVÁ. Nekonvenční metody obrábění 9. díl. MM Průmyslové spektrum [online]. Praha: SEND Předplatné s.r.o, 2008, č. 11 [cit. 2018-04-08]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-9-dil.html>.
- [33] Stereolithography. Custompart [online]. 2008 [cit. 2018-04-08]. Dostupné z: <http://www.custompartnet.com/wu/stereolithography>.
- [34] CUSTOMPART: Manufacturing Cost Estimation [online]. c2018 [cit. 2018-04-12]. Dostupné z: <http://www.custompartnet.com/>.
- [35] RepRap Project [online]. In: Wikipedia, The Free Encyclopedia, upraveno 25. 3. 2018, [cit. 2018-04-10]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/RepRap_Project.
- [36] MLEZIVA, Josef a Jaromír ŠŇUPÁREK. Polymery: výroba, struktura, vlastnosti a použití. 2. přeprac. vyd. Praha: SOBOTÁLES, 2000, 537 s. ISBN 80-85920-72-7.
- [37] STARÝ, Miroslav, Ivan POHL, Boris KAŠÍK a Bedřich ŠTEKNER. Termopolymery ABS, zpracování a použití. 1 vyd. Praha: SNTL, 1977.
- [38] 3D tisk-metody. 14220 [online]. 2013 [cit. 2018-04-12]. Dostupné z: <http://www.14220.cz/technologie/3d-tisk-metody/>.
- [39] PTÁČEK, Luděk. Nauka o materiálu I. 2., opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, c2003, xii, 516 s. ISBN 80-7204-283-1.
- [40] RYAN C.DIZON, John, et al. *Additive Manufacturing: Mechanical characterization of 3D-printed polymers*[online]. 2018 [cit. 2018-05-07]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214860417302749>.
- [41] PODPŮRNÉ MATERIÁLY - FILAMENTY. *MATERIALPRO 3D* [online]. Brno, c2018 [cit. 2018-04-23]. Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/3d-podpurny-material/>.

- [42] 3D tisk. *VÚTS LIBEREC* [online]. Liberec, c2013 [cit. 2018-04-23]. Dostupné z: <http://www.vuts.cz/3d-tisk-2.html>.
- [43] Limonen. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2017 [cit. 2018-04-27]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Limonen>.
- [44] Need A Different 3D Printer Filament Color... In: *Fabbaloo* [online]. 2015 [cit. 2018-04-25]. Dostupné z: <http://www.fabbaloo.com/blog/2015/12/23/need-a-different-3d-printer-filament-color-colorilab-has-over-180>.
- [45] Thermoplastic polyurethane. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2018 [cit. 2018-04-27]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Thermoplastic_polyurethane.
- [46] MICHÁLEK, Radim. *Vliv fázového složení isotaktického PB-1 na vybrané mechanické vlastnosti* [online]. Zlín, 2017 [cit. 2018-04-29]. Dostupné z: https://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/40720/michalek_2017_dp.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Vedoucí práce Martina Hřibová.
- [47] ROZDÍL MEZI ABS, PLA, PETG: ABS VS. PLA VS. PET-G. *MATERIALPRO 3D* [online]. Brno, 2017 [cit. 2018-04-29]. Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/blog/rozdily-abs-pla-petg/>.
- [48] ZÁHORA, J., Š. LÝSKOVÁ a T. JAKUBEC. *Difrakce elektronů v krystalech, zobrazování atomů* [online]. [cit. 2018-04-29]. Dostupné z: <http://tydenvedy.fjfi.cvut.cz/2012/cd/prispevky/sbpdf/difrel.pdf>.
- [49] BĚHÁLEK, Luboš. *Mechanické vlastnosti polymerů – statické namáhání. Polymery* [online]. © Code Creator, 2016 [cit. 2018-04-29]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/09.html>.
- [50] ALEXANDER, L. E. *X-ray diffraction methods in polymer science*. New York: Wiley-Interscience, 1969. ISBN 04-710-2183-0.
- [51] MALOCH, Jaroslav, Eva HNÁTKOVÁ, Milan ŽALUDEK a Petr KRÁTKÝ. Effect of Processing Parameters on Mechanical Properties of 3D Printed Samples. *Materials Science Forum*. 2018, **919**, 230-235. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.919.230. ISSN 1662-9752. Dostupné také z: <https://www.scientific.net/MSF.919.230>.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

ABS	Akrylonitrilbutadienstyren
ASA	Akrylonitril-styren-akrylát
CAD	Computer Aided Design
DLP	Digital Light Processing
DSC	Diferenciální Skenovací Kalorimetrie
DTA	Diferenční Termická Analýza
E	Modul pružnosti
eV	elektronvolt
F	Síla působící na těleso
FDM	Fused Deposition Modeling
FFF	Fused Filament Fabrication
Flexfill	elastické flexibilní vlákno
HiPS	Hight Impact PolyStyren
ITT	Index Toku Taveniny
keV	kilo-elektronvolt
LOM	Laminated Object Manufacturing
Obr.	Obrázek
PC	Polykarbonát
PC/ABS	směs polykarbonátu a akrylonitril-butadienu-styrenu
PET	Polyethylentereftalát
PETG	Polyethylentereftalát - Glykol
PLA	Polylactid Acid
PLA ₁	Materiál z polylaktidu s šedým pigmentem
PLA ₂	Materiál z polylaktidu s černým pigmentem

PMMA	Polymethylmethakrylát
PVA	Polyvinylalkohol
RepRap	Replicating Rapid Prototyper.
RP	Rapid Prototyping
RTG	Rentgen
SI	Spliting Index
SLA	Stereolitografie
SLS	Selective Laser Sintering
STL	Formát pro Stereolitografii
Tab.	Tabulka
T_c	Teplota krystalizace
T_{cc}	Teplota studené krystalizace
T_f	Teplota viskózního toku
T_g	Teplota skelného přechodu
T_m	Teplota tání
T_p	Teplota tisku
TPU	Termoplastický Polyuretan
UV	Ultrafialové záření
V	Objem
X	Krystalinita
3D	Trojdimenzionální rozměr
Θ	úhel dopadu paprsku na krystalickou rovinu
σ	napětí
σ_m	Napětí na mezi pevnosti
σ_y	Napětí na mezi kluzu

σ_b	Napětí při přetržení
ε	Prodloužení
ε_m	Prodloužení na mezi pevnosti
ε_y	Prodloužení na mezi kluzu
ε_b	Prodloužení při přetržení
λ	vlnová délka
τ	velikost uspořádaných (krystalických) domén
ρ	Hustota

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1: 3D model přilby ve formátu STL, vytvořený rovinnými trojúhelníky [24].....</i>	13
<i>Obr. 2: Přehled typů monomerních / polymerních materiálů, způsoby zpracování a aditivní výrobní metody 3D tisku [40]</i>	13
<i>Obr. 3: Princip metody Stereolitografie [33]</i>	14
<i>Obr. 4: Princip metody Selective Laser Sintering [34]</i>	15
<i>Obr. 5: Princip metody Laminated Object Manufacturing [34]</i>	16
<i>Obr. 6: Princip metody Fused Deposition Modeling [34]</i>	17
<i>Obr. 7: RepRap 1.0 Darwin [8]</i>	19
<i>Obr. 8: Původní 3D tiskárna Mendel a levnější varianta 3D tiskárny Prusa Mendel [8]</i>	19
<i>Obr. 9: Prusa i3 [8]</i>	20
<i>Obr. 10: Barevný 3D tisk na Prusa i3 MK2 Multi Material upgrade [22]</i>	21
<i>Obr. 11: Požadavky na vlastnosti materiálů [26]</i>	22
<i>Obr. 12: Tiskové struny [44]</i>	23
<i>Obr. 13: Lego [17]</i>	25
<i>Obr. 14: Tisk výrobku s podpůrnou konstrukcí [31]</i>	27
<i>Obr. 15: Vlnová interference [29]</i>	29
<i>Obr. 16: Grafické znázornění Braggovy podmínky [48]</i>	30
<i>Obr. 17: Princip RTG záření [27]</i>	30
<i>Obr. 18: Krystalové mřížky [28]</i>	31
<i>Obr. 19: Vlevo Millerovy indexy rovin, vpravo Millerovy indexy směrů [27]</i>	32
<i>Obr. 20: Schématická křivka polymeru vykreslená DSC přístrojem [25]</i>	33
<i>Obr. 21: Znázornění T_g a T_m DSC přístrojem [25]</i>	33
<i>Obr. 22: Typické křivky polymerů při deformaci v tahu [49]</i>	36
<i>Obr. 23: Tahová křivka typická pro semikrystalické polymery [49]</i>	37
<i>Obr. 24: Typické křivky polymerů při deformaci v tahu [49]</i>	38
<i>Obr. 25: Příklad vylišovaných zkušebních tělísek Flexfill a ABS</i>	45
<i>Obr. 26: Trhací stroj Zwick 1456 nastavený na tahovou zkoušku a způsob upnutí ...</i>	48
<i>Obr. 27: Způsob uchycení při ohybové zkoušce</i>	49
<i>Obr. 28: Graf RTG difrakční analýzy pro ABS</i>	50
<i>Obr. 29: Graf RTG difrakční analýzy pro PC/ABS</i>	51
<i>Obr. 30: Graf RTG difrakční analýzy pro PLA₁</i>	51

<i>Obr. 31: Graf RTG difrakční analýzy pro PLA₂</i>	52
<i>Obr. 32: Graf RTG difrakční analýzy pro PETG</i>	52
<i>Obr. 33: Graf RTG difrakční analýzy pro HIPS</i>	53
<i>Obr. 34: Graf RTG difrakční analýzy pro FlexFill</i>	53
<i>Obr. 35: Záznam DSC křivky pro ABS</i>	55
<i>Obr. 36: Záznam DSC křivky pro PC/ABS</i>	56
<i>Obr. 37: Záznam DSC křivky pro PLA₁</i>	57
<i>Obr. 38: Záznam DSC křivky pro PLA₂</i>	58
<i>Obr. 39: Záznam DSC křivky pro PETG</i>	59
<i>Obr. 40: Záznam DSC křivky pro HiPS</i>	60
<i>Obr. 41: Záznam DSC křivky pro Flexfill</i>	61
<i>Obr. 42: Průběh tahové zkoušky pro ABS v závislosti napětí na deformaci</i>	64
<i>Obr. 43: Průběh tahové zkoušky pro PC/ABS v závislosti napětí na deformaci</i>	64
<i>Obr. 44: Průběh tahové zkoušky pro PLA₁ v závislosti napětí na deformaci</i>	65
<i>Obr. 45: Průběh tahové zkoušky pro PLA₂ v závislosti napětí na deformaci</i>	66
<i>Obr. 46: Průběh tahové zkoušky pro PETG v závislosti napětí na deformaci</i>	67
<i>Obr. 47: Průběh tahové zkoušky pro HiPS v závislosti napětí na deformaci</i>	67
<i>Obr. 48: Průběh tahové zkoušky pro Flexfill v závislosti napětí na deformaci</i>	68
<i>Obr. 49: Průběh ohybové zkoušky pro ABS v závislosti napětí na deformaci</i>	70
<i>Obr. 50: Průběh ohybové zkoušky pro PC/ABS v závislosti napětí na deformaci</i>	70
<i>Obr. 51: Průběh ohybové zkoušky pro PLA₁ v závislosti napětí na deformaci</i>	71
<i>Obr. 52: Průběh ohybové zkoušky pro PLA₂ v závislosti napětí na deformaci</i>	71
<i>Obr. 53: Průběh ohybové zkoušky pro tištěné tělísko PLA₁ o tiskové vrstvě 0,08 mm v závislosti napětí na deformaci</i>	72
<i>Obr. 54: Průběh ohybové zkoušky pro tištěné tělísko PLA₁ o tiskové vrstvě 0,10 mm v závislosti napětí na deformaci</i>	73
<i>Obr. 55: Průběh ohybové zkoušky pro tištěné tělísko PLA₁ o tiskové vrstvě 0,15 mm v závislosti napětí na deformaci</i>	73
<i>Obr. 56: Průběh ohybové zkoušky pro tištěné tělísko PLA₁ o tiskové vrstvě 0,20 mm v závislosti napětí na deformaci</i>	74
<i>Obr. 57: Průběh ohybové zkoušky pro tištěné tělísko PLA₁ o tiskové vrstvě 0,25 mm v závislosti napětí na deformaci</i>	74

<i>Obr. 58: Průběh ohybové zkoušky pro tištěné tělísko PLA₁ o tiskové vrstvě 0,30 mm v závislosti napětí na deformaci</i>	<i>75</i>
<i>Obr. 59: Průběh ohybové zkoušky pro PETG v závislosti napětí na deformaci.....</i>	<i>75</i>
<i>Obr. 60: Průběh ohybové zkoušky pro tištěné tělísko PETG o tiskové vrstvě 0,05 mm v závislosti napětí na deformaci</i>	<i>76</i>
<i>Obr. 61: Průběh ohybové zkoušky pro tištěné tělísko PETG o tiskové vrstvě 0,08 mm v závislosti napětí na deformaci</i>	<i>77</i>
<i>Obr. 62: Průběh ohybové zkoušky pro tištěné tělísko PETG o tiskové vrstvě 0,10 mm v závislosti napětí na deformaci</i>	<i>77</i>
<i>Obr. 63: Průběh ohybové zkoušky pro tištěné tělísko PETG o tiskové vrstvě 0,15 mm v závislosti napětí na deformaci</i>	<i>78</i>
<i>Obr. 64: Průběh ohybové zkoušky pro tištěné tělísko PETG o tiskové vrstvě 0,20 mm v závislosti napětí na deformaci</i>	<i>78</i>
<i>Obr. 65: Průběh ohybové zkoušky pro tištěné tělísko PETG o tiskové vrstvě 0,25 mm v závislosti napětí na deformaci</i>	<i>79</i>
<i>Obr. 66: Průběh ohybové zkoušky pro tištěné tělísko PETG o tiskové vrstvě 0,30 mm v závislosti napětí na deformaci</i>	<i>79</i>
<i>Obr. 67: Průběh ohybové zkoušky pro PETG v závislosti napětí na deformaci.....</i>	<i>80</i>
<i>Obr. 68: Průběh ohybové zkoušky pro PETG v závislosti napětí na deformaci.....</i>	<i>80</i>

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1: Navážka pro jednotlivé materiály</i>	<i>44</i>
<i>Tab. 2: Parametry vytištěných tělísek PLA₁</i>	<i>45</i>
<i>Tab. 3: Parametry vytištěných tělísek PETG</i>	<i>46</i>
<i>Tab. 4: Technické údaje trhacího stroje</i>	<i>49</i>
<i>Tab. 5: Shrnutí vlastností polymerů z RTG analýzy</i>	<i>54</i>
<i>Tab. 6: Charakteristické teploty vyhodnocené pomocí DSC</i>	<i>61</i>
<i>Tab. 7: Naměřená data pro stanovení SI (1. část)</i>	<i>63</i>
<i>Tab. 8: Naměřená data pro stanovení SI (2. část)</i>	<i>63</i>
<i>Tab. 9: Shrnutí vlastností průběhu tahové zkoušky</i>	<i>68</i>
<i>Tab. 10: Shrnutí vlastností z průběhu ohybové zkoušky</i>	<i>81</i>

SEZNAM PŘÍLOH

PI CD ROM