

Multifunkční konstrukční plasty s aplikačním potenciálem v oblasti 3D tisku

Tomáš Jelínek

Diplomová práce
2022



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická
Ústav inženýrství polymerů

Akademický rok: 2021/2022

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	Tomáš Jelínek
Osobní číslo:	T20830
Studijní program:	N0722A130001 Inženýrství polymerů
Forma studia:	Kombinovaná
Téma práce:	Multifunkční konstrukční plasty s aplikačním potenciálem v oblasti 3D tisku

Zásady pro vypracování

V rámci diplomové práce bude připravena detailní rešerše představující polymerní materiály aktuálně využívané v aplikacích 3D tisku. S cílem rozšíření možnosti 3D tisku doposud málo využívaných plastů bude pozornost zaměřena na multifunkční materiály využitelné pro inovativní návrhy konstrukčních dílů 3D tiskáren jako jsou např. trysky či podložky pro tisk 3D prototypů. Cílem praktické části bude připravit vhodné receptury polymerních materiálů se zvýšenou úrovní magnetických vlastností a teplotní vodivosti, a následně využít tyto směsi pro přípravu zkušebních konstrukčních částí 3D tiskáren.

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

Seznam doporučené literatury:

- 1) R. F. Quero, G.D.da Silveira, J. A. F. da Silva and D. P. de Jesus, Understanding and improving FDM 3D printing to fabricate high-resolution and optically transparent microfluidic devices, Lab on a Chip, 2021
- 2) M. Ortner, C. Huber, N. Vollert, J. Pilz, D. Suss, Application of 3D-Printed Magnets for Magnetic Position Detection Systems, IEEE Sensors, 2017
- 3) C.Y. Hsia, Y. T. Chou, Application of CAD/CAE/3D Printing to Development of Magnetic Foldable Hanger, IEEE International Conference on Advanced Materials for Science and Engineering, 2016
- 4) Z. Y. Ji, C.Y. Yan, CY, F. Zhouh, Multimaterials 3D Printing for Free Assembly Manufacturing of Magnetic Driving Soft Actuator, Advanced materials interface 4, 2017
- 5) C. Q. Zhang, X. J. Li, Y. Chen, 3D Printing of Functional Magnetic Materials: From Design to Applications, Advanced functional materials 31, 2021

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Tomáš Sedláček, Ph.D.**
Ústav inženýrství polymerů

Datum zadání diplomové práce: **1. února 2022**
Termín odevzdání diplomové práce: **13. května 2022**

prof. Ing. Roman Čermák, Ph.D. v.r.
děkan

L.S.

Ing. Jana Navrátilová, Ph.D. v.r.
ředitel ústavu

Ve Zlíně dne 1. dubna 2022

PROHLÁŠENÍ AUTORA DIPLOMOVÉ PRÁCE

Beru na vědomí, že:

- diplomová práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému a dostupná k nahlédnutí;
- na moji diplomovou 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;
- podle § 60 odst. 1 autorského zákona má Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užít své dílo – diplomovou 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);
- pokud bylo k vypracování diplomové práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tj. k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové práce využít ke komerčním účelům;
- pokud je výstupem diplomové 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.

Prohlašuji,

- že jsem diplomové práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou obsahově totožné.

Ve Zlíně dne:

Jméno a příjmení studenta: Tomáš Jelínek

.....
podpis studenta

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá polymerními materiály, které jsou využívány v aplikacích 3D tisku. Teoretická část je věnována rešerši používaných materiálů. Praktická část je zaměřená na vývoj vhodného materiálu na tiskovou podložku pro 3D tiskárny založené na technologii FFF/FDM (Fused Filament Fabrication/ Fused Deposition Modeling). V současné době se nejčastěji využívá ocelových plechů potažených Ultemem. Jejich výroba je ale poměrně obtížná a tím i relativně drahá. Pokud by se povedlo najít materiál na výrobu pomocí vstřikování, výroba by se značně zjednodušila.

Klíčová slova: 3D tiskárna, 3D tisk, filament, tisková podložka, magnetická podložka, magnetické vlastnosti

ABSTRACT

This diploma thesis deals with polymeric materials that are used in 3D printing applications. The theoretical part is devoted to the search of various polymeric materials. The practical part is focused on the development of a suitable material for the printing substrate for 3D printers based on FFF / FDM (Fused Filament Fabrication / Fused Deposition Modeling) technology. Currently, the most commonly used steel sheets are coated with Ultem polymeric material. However, their production is relatively difficult and thus relatively expensive. If an injection material were found, production would be greatly simplified.

Keywords: 3D printer, 3D printing, filament, bed, magnetic bed, magnetic heatbed, flexible spring-steel sheet

Chtěl bych poděkovat vedoucímu své diplomové práce doc. Ing. Tomáš Sedláček, Ph.D. za odborné vedení, za pomoc a rady při zpracování této práce.

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

OBSAH

ÚVOD.....	9
I TEORETICKÁ ČÁST	15
1 TECHNOLOGIE 3D TISKU	16
2 POLYMERNÍ MATERIÁLY PRO 3D TISKÁRNY.....	20
2.1 ABS (AKRYLONITRILBUTADIENSTYREN).....	26
2.2 ABS-T (AKRYLONITRILBUTADIENSTYREN + METHYL-METHACRYLATE	28
2.3 PLA (POLYLACTIC ACID).....	28
2.4 PET (POLYETHYLENE TEREPHTHALATE), PETG (POLYETHYLENE TEREPHTHALATE GLYCOL), CPE (CO-POLYESTER)	30
2.5 HIPS (HIGH IMPACT POLYSTYRENE).....	33
2.6 PVA (POLYVINYL ALCOHOL).....	36
2.7 ASA (ACRYLIC STYRENE ACRYLONITRILE).....	37
2.8 FLEX.....	39
2.8.1 TPU (ThermoPlastic Polyurethane)	41
2.8.2 TPE (ThermoPlastic Elastomer)	43
2.8.3 TPS (ThermoPlastic Starch).....	44
2.9 INDUSTRIAL.....	45
2.9.1 PA (PolyAmide).....	45
2.9.2 PC (PolyCarbonate)	47
2.9.3 PP (PolyPropylene)	48
2.9.4 PMMA (PolyMethyl MethAcrylate).....	49
2.9.5 PEEK (PolyEtherEtherKetone).....	51
2.9.6 PEKK (PolyEtherKetoneKetone).....	52
2.9.8 PSU (PolySulfon), PPSF/PPSU (PolyFenylSulFon), PPS (PolyFenylen Sulfid)	54
2.9.9 PVDF (PolyVinyliDenFluorid).....	54
2.9.10 Materiály s uhlíkovými vlákny	55
2.10 OSTATNÍ MATERIÁLY	55
2.10.1 Materiály s příměsí dřeva.....	55
2.10.2 Materiály s příměsí kovu.....	55
2.10.3 Materiály s magnetickými vlastnostmi	56
2.10.4 Materiály vodivé a antistatické	56
2.10.5 Materiály pro odlévání kovů	57
2.10.6 Ostatní speciální materiály	58
II PRAKTICKÁ ČÁST	59
3.1 PODLOŽKY ZE SKLA.....	62
3.1.1 Zajištění přilnavosti výtisku.....	65
3.2 ADHEZNÍ MATERIÁL PŘÍMO NA VYHŘÍVANÉ PODLOŽCE	67
3.3 PRUŽNÉ PODLOŽKY	67

3.4	VÝROBA VLASTNÍ PODLOŽKY	68
3.5	TEPELNÁ VODIVOST	71
3.6	DSC (DIFFERENTIAL SCANNING CALORIMETRY).....	72
3.7	MĚŘENÍ PRŮHYBU	76
3.8	MĚŘENÍ REOLOGICKÝCH VLASTNOSTÍ MATERIÁLŮ	77
3.9	ELEKTRONOVÝ MIKROSKOP	79
3.10	MAGNETICKÉ VLASTNOSTI.....	81
3.11	VÝBĚR VHODNÉHO MATERIÁLU	83
3.12	ZKUŠEBNÍ TISK.....	86
3.13	MĚŘENÍ DRSNOSTI POVRCHU	87
	ZÁVĚR	89
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	90
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	93
	SEZNAM OBRÁZKŮ	94
	SEZNAM TABULEK.....	97
	SEZNAM PŘÍLOH.....	98

ÚVOD

Aditivní technologie zaznamenávají v posledních letech velký rozvoj. Firmy u 3D tiskáren oceňují především jejich rychlost a dostupnost výroby prototypů i funkčních dílů a unikátní mechanické vlastnosti vytištěných výrobků. Pro 3D tiskárny není třeba problém vytvářet náhradní díly ke strojům. Příkladem toho může být veřejná zakázka Českých drah na dodávku náhradních dílů pro železniční vozidla této společnosti, které budou tištěny na 3D tiskárnách. Nástup 3D tiskáren v průmyslu zatím neznamena zánik tradičních technologií, jakými jsou obrábění, odlévání nebo vstřikování do forem. 3D tisk možnosti výroby rozšiřuje a stávající technologie doplňuje. Firmy dnes díky 3D tisku ročně ušetří statisíce až miliony korun, investice do 3D tiskáren se rychle vracejí.

Zatímco ještě před několika lety byly 3D tiskárny doménou nadšenců a vizionářů, dnes si aditivní technologie našly cestu do mnoha odvětví lidské činnosti. Nejde jen o výrobu prototypů a vývoj, ale tyto technologie se už uplatňují i přímo v sériové výrobě. Mnohdy přináší taková výroba nové možnosti. Může jít třeba o personalizaci výrobků. Velmi často je 3D tisk využíván třeba pro výrobu různých přípravků, které usnadňují výrobu.

Aditivní technologie umožňují výrobu z různých materiálů, nejčastěji se jedná o polymerní materiály. Velkým rozvojem prochází tisk kovových materiálů, keramiky, stavebních hmot, písku, dřeva nebo třeba struktur tvořených živými buňkami. Portfolio materiálů, které lze využít u různých aditivních technologií se neustále rozšiřuje tak, jak se tyto technologie rozšiřují do různých oborů.

Stále častěji se třeba mluví o inteligentních (nebo také chytrých) materiálech a jejich 3D tisku. V tomto případě se pak můžeme setkat s pojmem 4D tisk. Technologie 4D tisku využívá stejný tiskový proces jako 3D tisk, jediným rozdílem mezi těmito dvěma výrobními technikami je použitý tiskový materiál. Pokud 3D tisk dnes zásadně mění svět průmyslu, může být 4D tisk další velkou revolucí. Jde o to, že tento proces umožňuje vytváření více než jen statických struktur.

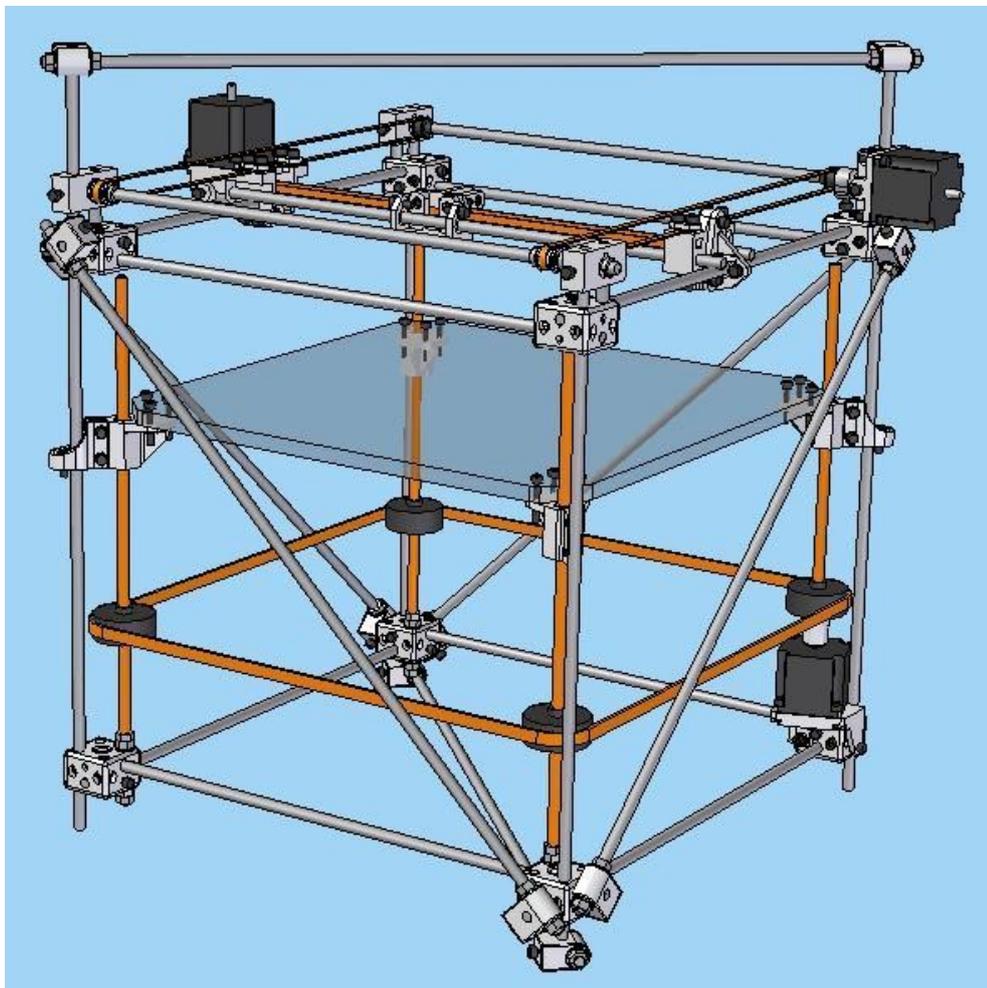
Chytré materiály jsou materiály reagující na vnější podněty a mají jednu nebo více vlastností. Mohli bychom je také nazvat responzivními materiály. Takové objekty mohou měnit tvar nebo chování na základě změny teploty, tlaku, chemického složení okolí, světla apod.

To, že stroje něco nového vytvářejí, není až zas tak zajímavé. V souvislosti s 3D tiskem ale veřejnost zaujalo něco jiného. Především pro novináře bylo zajímavé psát o tom, že 3D

tiskárna dokáže tisknout další 3D tiskárny. V této souvislosti je asi nejznámější projekt RepRap. RepRap (Replication Rapid prototyper) je britský projekt založený v roce 2005, jehož cílem je vyrobit 3D tiskárnu schopnou tisknout další funkční 3D tiskárny.

Na začátku 21. století byly 3D tiskárny monstra velikosti slona, která stála desítky tisíc dolarů. Nyní existují velcí výrobci malých FDM/FFF (Fused Filament Fabrication/ Fused Deposition Modeling) 3D tiskáren jako Ultimaker, Makerbot, Creality a Prusa Research hlavně díky projektu RepRap.

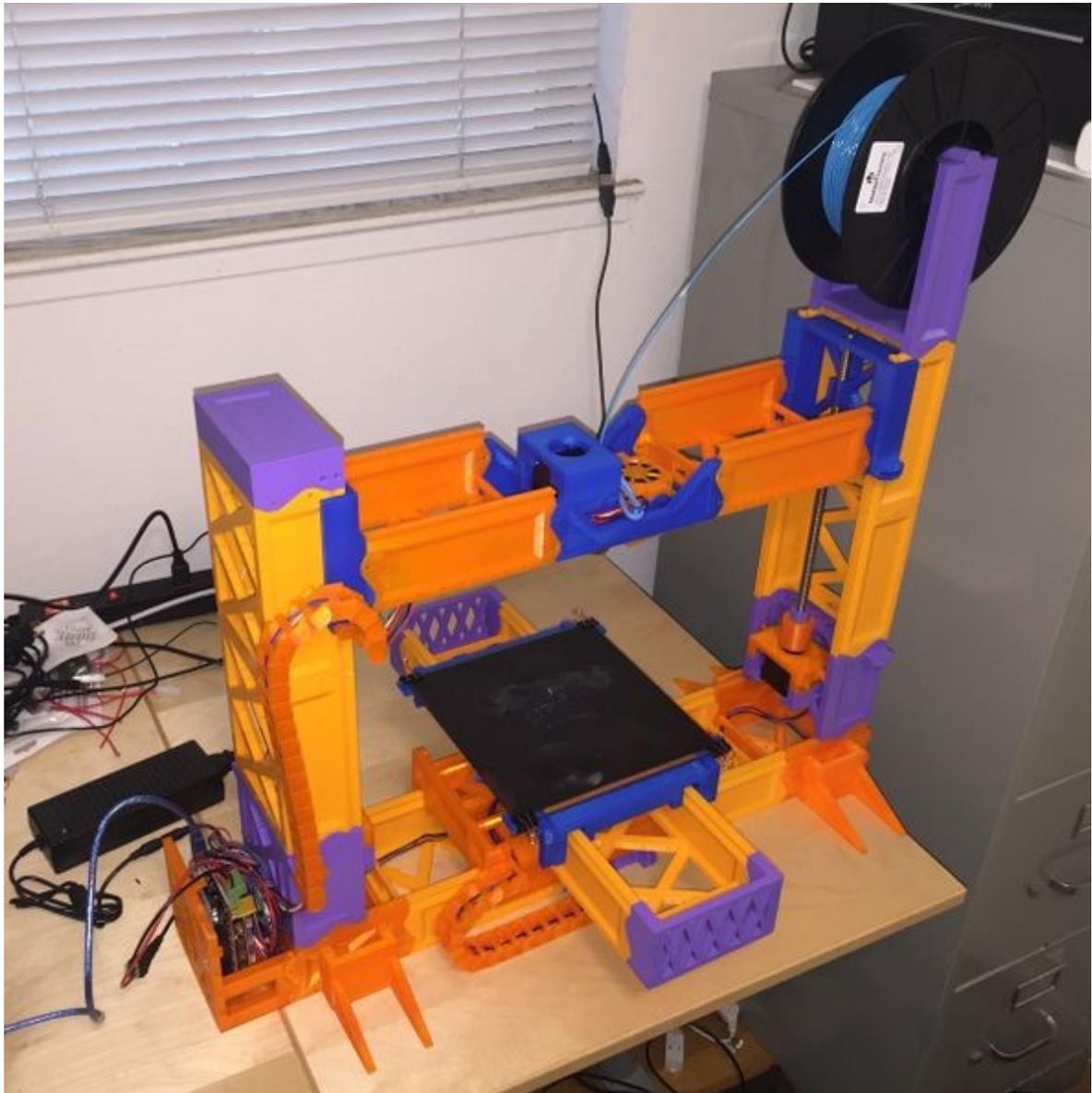
Myšlenka RepRapu je jednoduchá: *3D tiskárny, které se mohou samy replikovat a tisknout díly, aby bylo možné vyrobit více 3D tiskáren RepRap. Tyto nové tiskárny RepRap pak mohou tisknout další tiskárny RepRap a tak dále.* [1]



Obrázek 1 3D tiskárna RepRap Darwin [2]

Projekt RepRap začal tiskárnou Darwin (obrázek 1), strojem s rámem vyrobeným téměř výhradně ze závitových tyčí. Následoval model Mendel s mírně vyšším podílem tištěných dílů. Kolem roku 2011 šel cíl sebe-replikace trochu stranou poté, co do projektu začaly

plynout investice. Postupně se projekt zaměřil spíš na snižování ceny výroby tiskáren, ale naznamená to, že původní myšlenka sebe-replikace je zcela mrtvá.



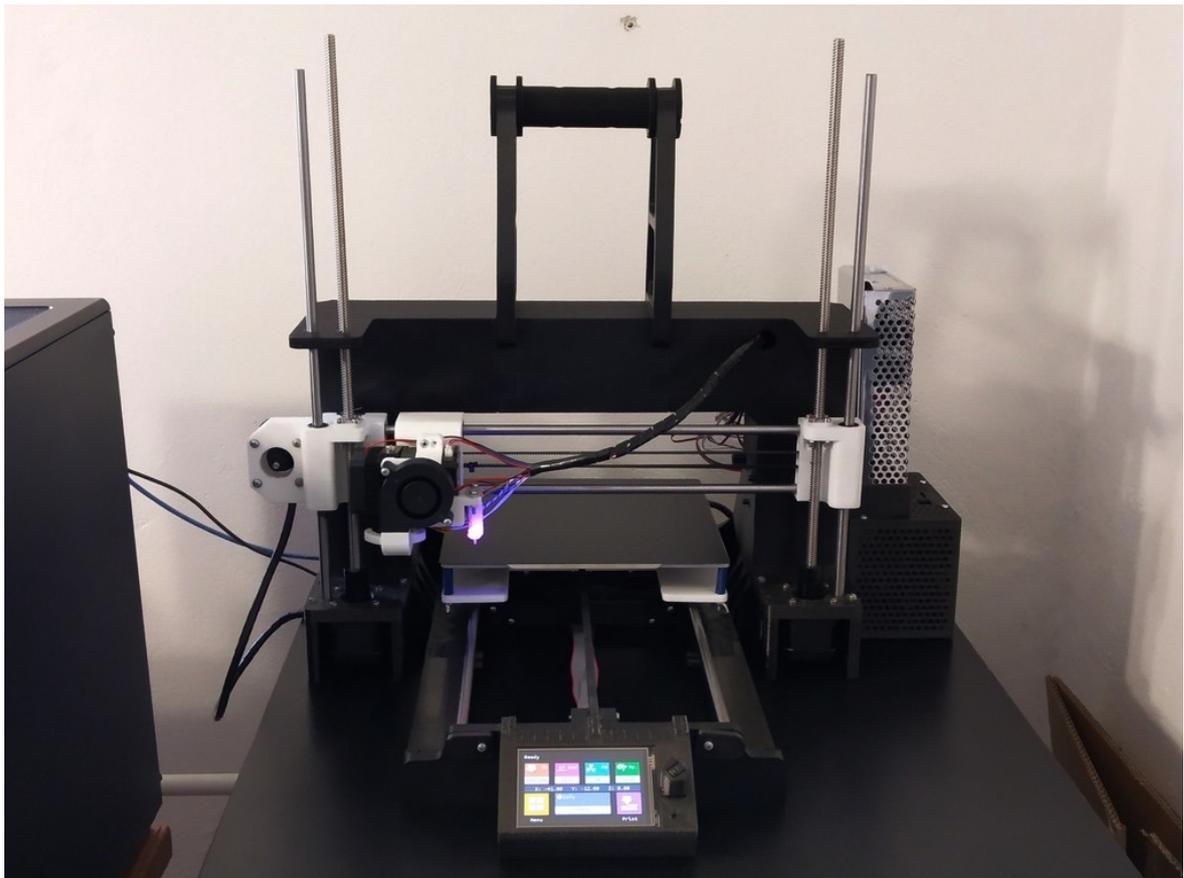
Obrázek 2 3D tiskárna RepRap Snappy[3]

Existuje třeba model RepRap Snappy (obrázek 2) - 3D tiskárna, která je postavena téměř výhradně z 3D tištěných dílů. Snappy je Open Source 3D tiskárna navržena společností RevarBat. Celá tiskárna je vytvořena tak, aby potřebovala co nejméně komponent, které se nedají vytisknout na 3D tiskárně metodou FDM/FFF. V roce 2017 se tato tiskárna dostal do Guinnessovi knihy rekordů jako tiskárna s největším podílem tištěných dílů na světě. [3] Dalšími tiskárnami založenými na myšlenkách sebe-replikace jsou třeba RepRap Morgan nebo RepRap Simpson (obrázek 4), který má zajímavou kinematiku.



Obrázek 3 3D tiskárna RepRap Simpson [4]

V České republice se vývoji sebe-replikujících tiskáren věnuje třeba Adam Janeček. Podklady k tvorbě jeho tiskárny Reppy (obrázek 4) si už stáhli stovky lidí z celého světa. Na sebe-replikaci založila svůj marketing také společnost Prusa Research. Na „farmě“ 3D tiskáren (obrázek 5) se tak tisknou plastové díly pro vyrábění 3D tiskáren a tato skutečnost je v marketingu formy zdůrazňována, a to i když zhruba v posledních 2 letech je část těchto dílů nahrazována díly, které jsou vyráběné na vstřikovacích strojích. V roce 2019 společnost shromáždila všechny FDM/FFF tiskárny, které používá pro výrobu a vývoj, do jedné místnosti a tím vznikl nový světový rekord v počtu tiskáren tisknoucích zároveň v jedné místnosti. Podle zástupce Guinnessovy knihy rekordů jich bylo 1096. 3D tisk komponent pro výrobu umožňuje rychlou změnu a úpravu vyráběných dílů.



Obrázek 4 3D tiskárna Reppy (foto: Adam Janeček)



Obrázek 5 Farma 3D tiskáren na tisk komponent pro vyrábění 3D tiskárny společnosti Prusa Research

Aditivní výroba samozřejmě není jen o vlastních tiskárnách, ale velmi důležité jsou také materiály, které se pro výrobu používají. To je hlavním důvodem vzniku této diplomové práce.

V teoretické části této diplomové práce se budu věnovat rešerši různých polymerních materiálů a aditivním technologiím, které jsou s nimi spojené. Přestože má být tato část teoretická, ve skutečnosti jsem v této části práce do značné míry vycházel z vlastních zkušeností a experimentů, které jsem se svými 7 domácími a mnoha dalšími FFF 3D tiskárnami v uplynulých víc než 5 letech provedl.

Praktickou část jsem zaměřil především na vývoj tiskové podložky pro 3D tiskárny založené na technologii FFF/FDM. Právě podložky jsou klíčovým prvkem 3D tiskáren a jejich vývoj stále pokračuje. Během výzkumu se povedlo vytvořit také materiál, který bychom mohli zařadit mezi materiály pro 4D tisk. Při vývoji se povedlo vyrobit vzorek magneticky tvrdého materiálu, který by mohl sloužit k tisku magnetů.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 TECHNOLOGIE 3D TISKU

Koncept 3D tisku byl vymyšlen v 70. letech 20. století. První experimenty se datují do roku 1981. První pokusy o 3D tisk provedl Dr. Kodama. Jako první popsal výrobu vrstvy po vrstvě, čímž vytvořil předchůdce dnešních SLA (Stereolithography) tiskáren. Ty fungují na principu vytvrzování fotocitlivých pryskyřic pomocí UV světla. [5]

O několik let později se o stereolitografii zajímal francouzský tým složený z trojice inženýrů Alain Le Méhauté, Olivier de Witte a Jean-Claude André. Ti ale kvůli nedostatku obchodní perspektivy myšlenku brzo opustili.[5]

V roce 1986 Charles Hull předložil první patent na stereolitografii (SLA). Založil 3D Systems Corporation a v roce 1988 vydal SLA-1, první komerční produkt této společnosti. [5]

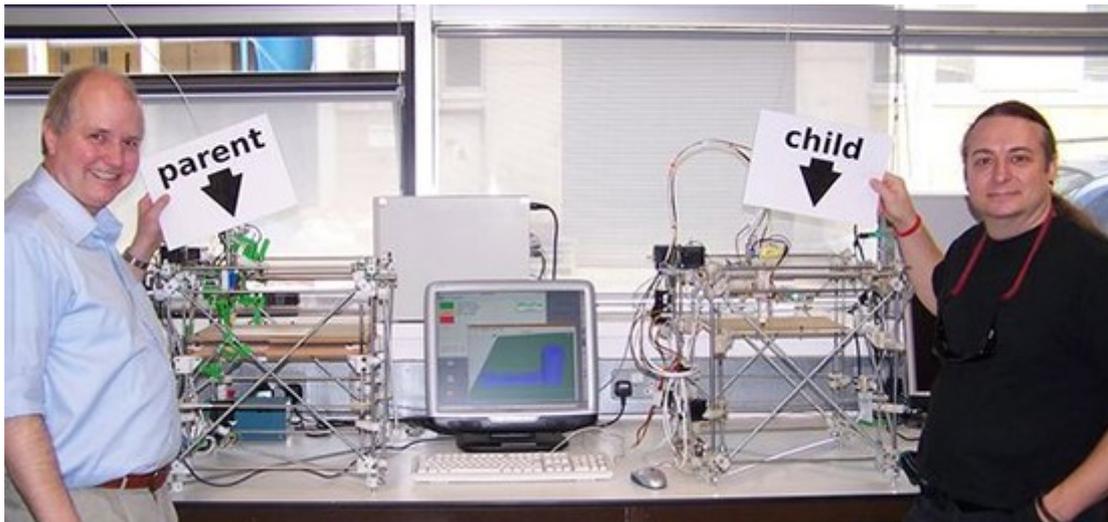
V roce 1988 Carl Deckard z univerzity v Texasu podal patent na technologii SLS, další 3D tiskovou technologii, ve které se prášková zrna lokálně spékají laserem.[5]

Mezitím Steven Scott Crump, spoluzakladatel společnosti Stratasys Inc., podal patent na Fused Deposition Modeling (FDM). Za necelých deset let byly patentovány tři různé technologie 3D tisku a základ dnešních tří nejrozšířenějších 3D tiskových technologií byl na světě. [5]

Přestože existují různé tiskové technologie, stále nejrozšířenější je technologie FDM/FFF. Proč je tato technologie někdy označována FDM a jindy FFF? Společnost Stratasys Inc. si technologii FDM patentovala. Přestože platnost patentu už vypršela, stále se jedná o ochrannou známku této technologie tisku, vlastněnou touto firmou. Proto vzniklo označení FFF, které označuje stejnou technologii a není vázáno na žádného výrobce a je volně k dispozici.

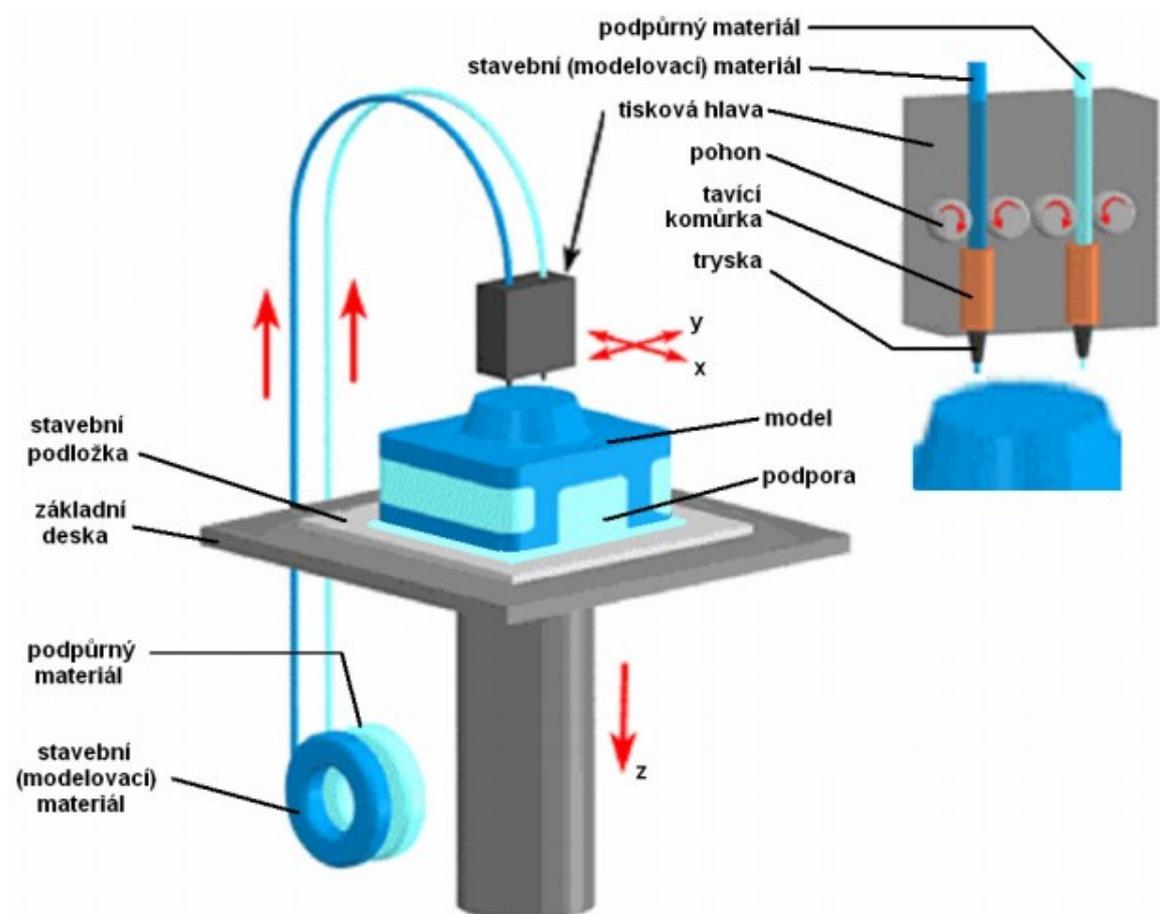
Stratasys vyrábí 3D tiskárny od 1992. Tím, že Stratasys držel patent, ve vývoji FDM tiskáren se poměrně dlouho neodehrával zásadnější konkurenční boj a paralelně vznikaly další technologie 3D tisku. *Zlom přichází až po roce 2009, kdy patent vypršel a firmy se specializací na FDM/FFF začaly vznikat jak houby po dešti: MarkerBot (2009), Ultimaker (2011), Prusa Research (2012). [6]*

Nastupující konkurence způsobila pád cen této tiskové technologie. Zároveň se objevil již zmíněný projekt RepRap, který založil Brit Adrian Bowyer (obrázek 6). To způsobilo další tlak na ceny tiskáren.

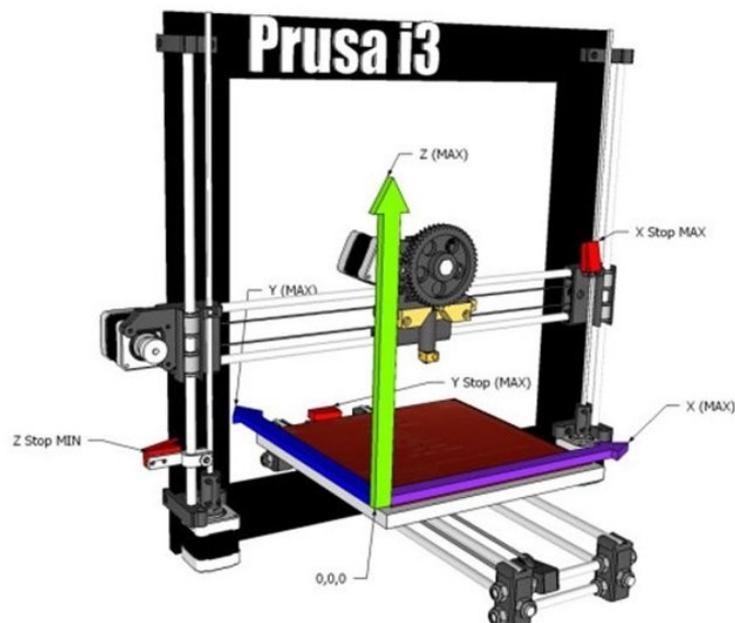


Obrázek 6 Adrian Bowyer, zakladatel RepRapu (na obrázku vlevo) [6]

Vlastní FFF technologie 3D tisku funguje na principu roztavování termoplastického materiálu, který je vytlačován v tekutém stavu z trysky na podložku (obrázek 7).



Obrázek 7 Princip FFF 3D tisku [7]



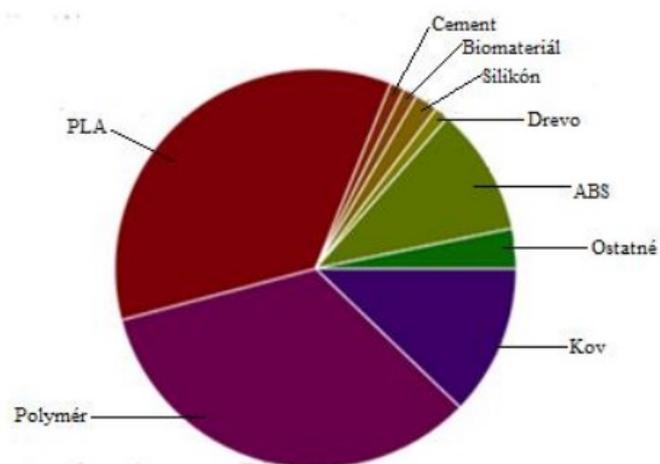
Obrázek 8 Pohyb podložky a hlavy u tiskárny Prusa i3 [8]

Vytlačovací tryska se pohybuje nad tiskovou podložkou. V hlavě tiskárny se termoplast zahřívá přes bod tání a poté je vytlačen ven, aby se vytvořil 3D objekt nanášením jednotlivých vrstev materiálu na sebe. Jak tištěný objekt získává tvar, je vidět každá vrstva jako horizontální průřez. Po dokončení jedné vrstvy se tryska tiskárny posune o výšku tištěné vrstvy a začne se tisknout další vrstva.[9] Na obrázku 8 je vidět, jak se jednotlivé části tiskárny pohybují. Podrobně se fungování a zprovoznění tiskárny věnuje třeba Michal Stanko ve své bakalářské práci [10], Alicia Gibb v [11], Maggie Murphy v [12] nebo Nick Kloski, Liza Wallach Kloski v [13].

FFF technologie je asi nejrozšířenější a neustále roste její využívání a objevují se nové aplikace. Také podle grafu, který má ve své diplomové práci Michal Stanko [10] (obrázek 9), jsou nejvíc používanými materiály v 3D tisku termoplasty.

Co vše lze vytvořit pomocí FFF technologie hlavně v oblasti umění je možné vidět v publikaci Jitky Kratochvílové [14]. Jak je možné 3D tisk využít při vzdělávání zrakově postižených pak popisuje Vít Voženílek v [15]. Možných aplikací je mnoho a další se stále objevují. Stejně tak se stále objevují nové materiály.

Ne všichni se na FFF tiskárny dívají jen pozitivně. Začínají se také objevovat pochybnosti o zdravotní nezávadnosti tohoto druhu 3D tisku, které jsou spojené s tzv. „mikroplasty“. Tomuto tématu se věnují třeba Wojtyła, Klama, Spiewak a Baran v [16].



Obrázek 9 Graf znázorňující nejpoužívanější materiály pro 3D tisk v roce 2016 podle Michala Stanka [10]

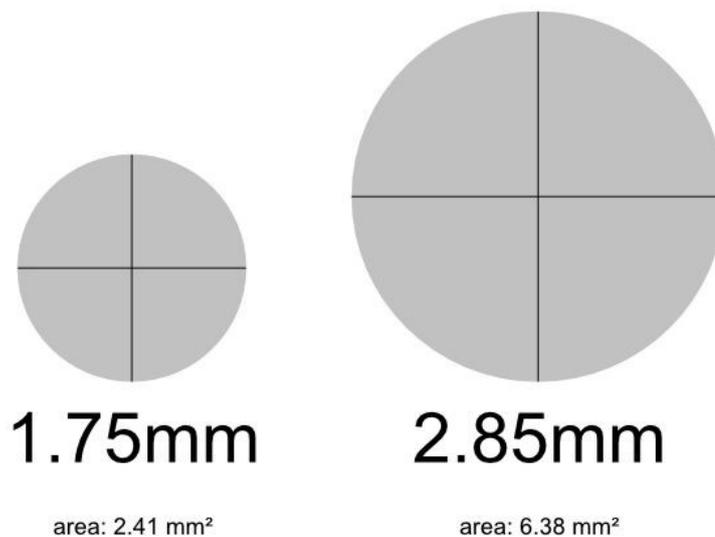
2 POLYMERNÍ MATERIÁLY PRO 3D TISKÁRNY

Materiály dostupné pro FFF 3D tisk prošly od počátků této technologie dlouhou cestu. Existuje široká škála různých typů materiálů, které jsou dodávány v různých stavech (filament, granule, pásy atd.). Přesto naprostá většina uživatelů FFF 3D tiskáren používá filament.

Co je to ten filament? Slovo filament se používá v mnoha oborech, jako astronomie, biologie, fyzika apod. V 3D tisku se jedná o vlákno nebo strunu. Ta je vyrobená z materiálu, který lze roztavit.

První 3D tiskárny používající filament byly samozřejmě od Stratasysu. Jak už bylo uvedeno, společnost vynalezla proces FDM v 80. letech 20. století a díky patentům tak byla řadu let výhradním výrobcem filamentů pro 3D tisk. Jejich proprietární vlákno mělo a stále má průměr 1,78 mm.[17]

Nikde se mi nepodařilo zjistit, proč si Stratasys vybral tento konkrétní formát filamentu, ale postupem času se ukázalo, že to byl velmi dobře zvolený průměr pro filament. Vzhledem k jeho proprietární povaze jej však nikdo jiný nemohl dlouho používat. Proto jej kromě několika společností vyrábějících neoriginální materiály pro 3D tiskárny Stratasys nikdo jiný nevyráběl.

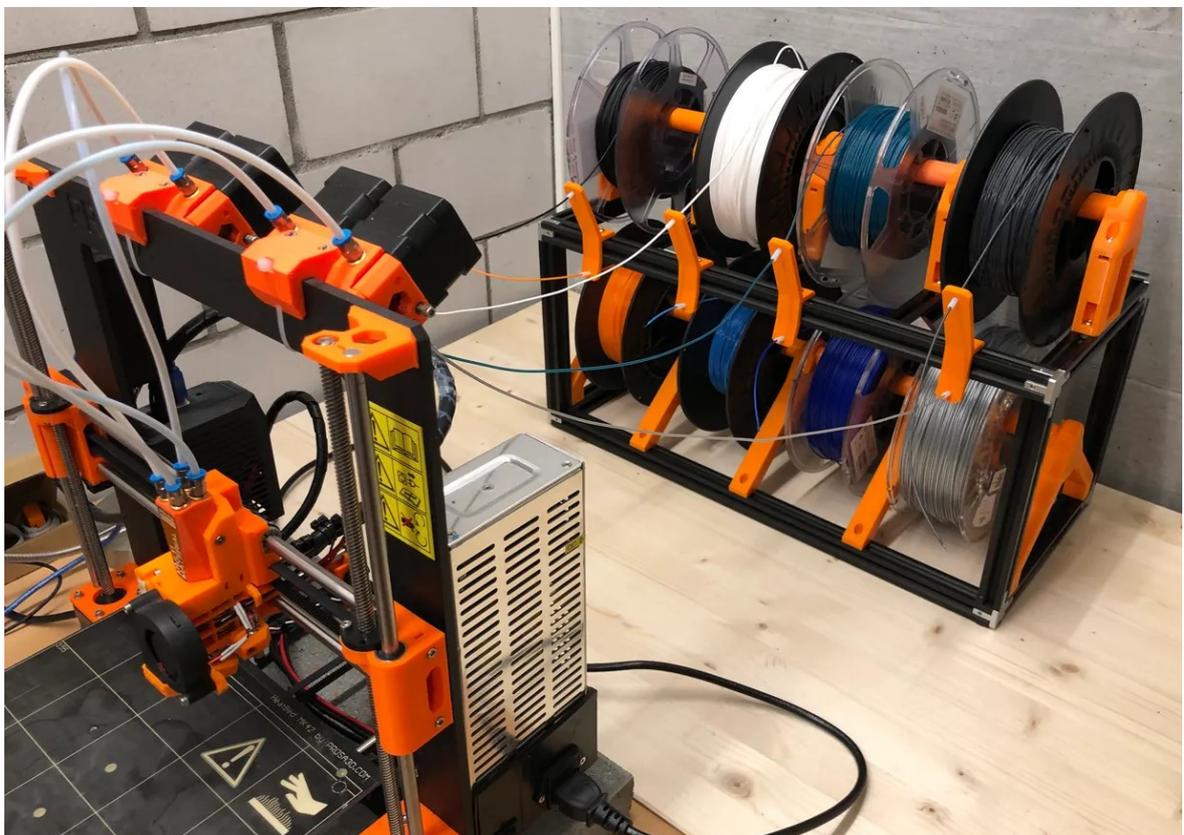


Obrázek 10 Dva hlavní formáty vláken pro FFF 3D tiskárny o průměru 1,75 mm a 2,85 mm [17]

Když vypršel patent společnosti Stratasys na FDM proces 3D tisku, a další výrobci se vrhly na trh s 3D tiskárnami, nastal problém s materiálem. Často se jednalo o malé firmy nebo nadšence, kteří si vyráběli tiskárny doma. Vytvořit pro takové tvůrce samotnou tiskárnu bylo mnohdy náročné. Věnovat se ještě vývoji materiálu bylo naprosto nereálné. Je nutné si uvědomit, že v té době neexistoval trh s materiálem pro FFF 3D tisk. Proto tvůrci hledali nějaké řešení a našli ho v podobě plastové struny určené ke svařování plastů. Taková struna byla dostupná v průměru 3 mm a pro 3D tisk se hodila struna z materiálu ABS, která se začala používat.

Materiál původně nebyl určen pro 3D tisk, ale pro úplně jinou aplikaci, takže konzistence průměru vlákna na cívce byla špatná. Rozdílný průměr svářečům plastu nevadil, ale 3D tiskařům způsoboval problémy. I kdyby bylo vlákno konzistentní, bylo i tak příliš velké.

První návrhy 3D tiskáren jednoduše přiváděly holé vlákno do extrudérů s přímým pohonem, nové návrhy vyžadovaly použití podávacích hadičky (pohon byl mimo hlavu tiskárny, aby se zjednodušila konstrukce a celá hlava byla lehčí). Zařízení vyžadovalo vedení filamentu teflonovou hadičkou.



Obrázek 11 3D tiskárna Prusa i3 MK2 s rozšířením pro tisk více materiálů, motory jsou umístěné na rámu a filament je veden teflonovými hadičkami

Běžně dostupné teflonové hadičky měly vnitřní průměr 3 mm. To znamenalo, že 3 mm vlákno nemělo v hadičce žádnou vůli, a to způsobovalo zasekávání filamentu. V té době se to tvůrci snažili řešit mazáním filamentu, ale ani to nepomohlo. Struna navíc neměla konzistentní průměr, takže se mohlo stát a také se to stávalo, že struna prostě měla větší průměr, než byl vnitřní průměr teflonové hadičky.

Tvůrci 3D tiskáren se intenzivně snažili najít nějaké řešení. Nakonec se jako nejrozumnější ukázala výroba filamentu o průměru 2,85 mm, který dobře procházel běžně dostupnými teflonovými hadičkami o vnitřním průměru 3 mm. Je nutné poznamenat, že vzhledem k obtížnosti výroby teflonových hadiček bylo pořád jednodušší vyrábět strunu z ABS o menším průměru než větší teflonovou hadičku.

Otvory v tryskách 3D tiskáren se postupně začal zmenšovat a ustálil se nejčastější průměr otvoru v trysce 0,4 mm. Tak jako v jiných oborech se tvůrci snažili neustále tisk vylepšovat a průměr 2,85 mm se jim zdál jako příliš velký. Vycházely z toho, že při tomto průměru se špatně reguluje průtok tryskami o menším průměru, takže navrhli filament o průměru 1,75 mm.



Obrázek 12 Nejčastěji používané trysky u FFF 3D tiskáren o různém průměru

Výrobci materiálů začaly vyrábět jak struny o průměru 2,85 mm tak 1,75 mm. Popularita materiálu 1,75 mm rychle rostla a dnes se většina materiálu vyrábí právě v tomto průměru a

průměr 2,85 mm je na ústupu. Velmi populární se stal průměr 1,75 mm ve chvíli, kdy se místo nejčastěji používaného materiálu ABS začal používat materiál PLA. Materiál PLA je totiž křehký a průměr struny 2,85 mm se mnohem lépe lámal, zatímco průměr 1,75 mm byl mnohem flexibilnější.

Kerry Stevenson v [17] tyto materiály srovnává. Uvádí, že vlákno o průměru 1,75 mm má tyto výhody:

- *Největší dostupnost*
- *Vlákno je víc flexibilní při pokojové teplotě [17]*

Vlákno 2,85 mm má tyto výhody:

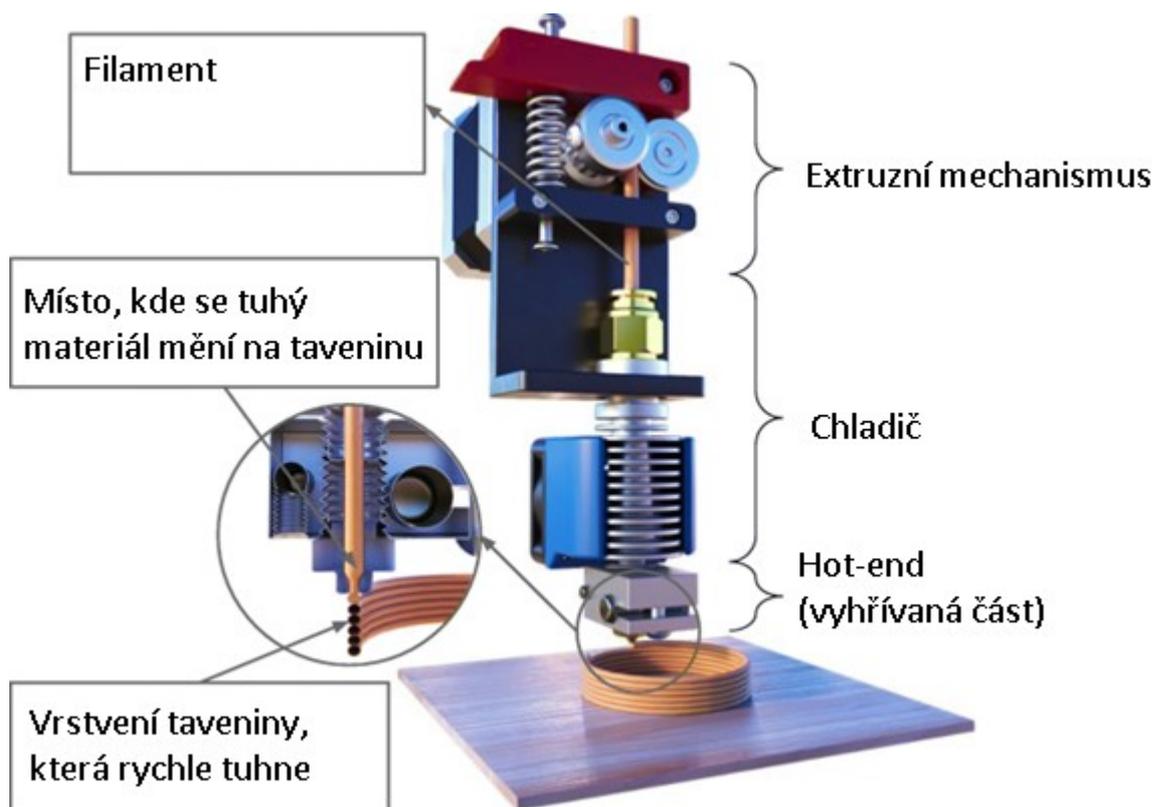
- *Tužší vlákno pro průchod teflonovými hadičkami*
- *Lepší dodávka materiálu pro větší trysky [17]*

Prvním materiálem, který se pro 3D tiskárnu začal zpracovávat do formy filamentu byl materiál ABS. Následovaly další materiály. Dnes je možné koupit desítky různých druhů a modifikací tiskových materiálů. Stejně tak jsou nabízeny různé velikosti balení. Nejběžnější je balení na cívkách s hmotností materiálu 1 kg.

S příchodem projektu RepRap se začaly tyto materiály používat k vytváření 3D tiskáren. Nejprve to byl materiál ABS, později se přešlo na materiál PET, se kterým se lépe pracuje.

Na obrázku 13 je vidět konstrukce hlavy tiskárny. Je to jedna z možných konstrukcí. V tomto případě je motor pro pohyb filamentu umístěn přímo na hlavě. A pomocí 2 drážkovaných koleček pohybuje s filamentem (na obrázku 13 součástí extruzního mechanismu, na obrázku 14 pak detail možného provedení).

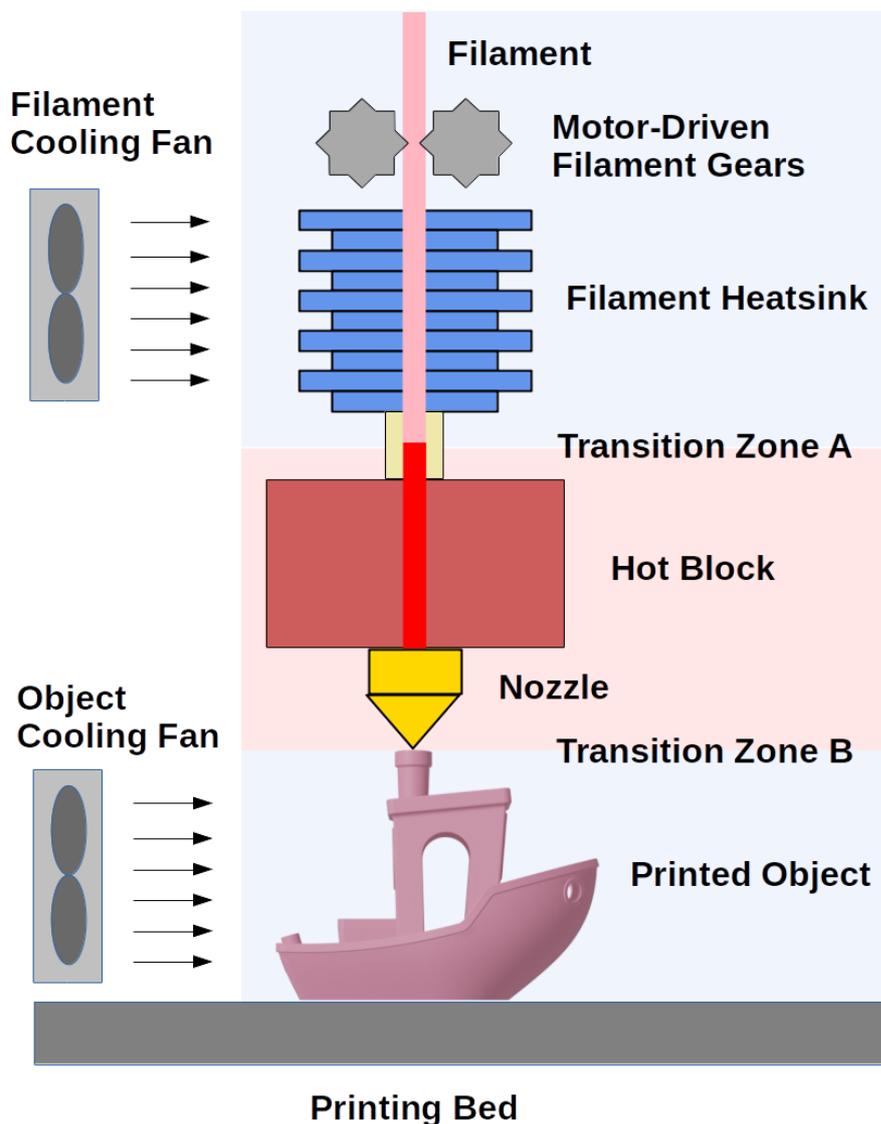
Většina tiskáren je vybavena 2 ventilátory. Jeden fouká vzduch na chladič, který je na vstupu do horké části hlavy a druhý fouká studený vzduch do míst, kam je vytlačována tavenina. V následujícím textu jsou popsány jednotlivé materiály, ze kterých je vyráběn filament a je u nich zmíněno, jestli je potřeba vytlačovaný materiál chladit nebo ne. Pokud je potřeba chladit, je potřeba zapnout nejen ventilátor ochlazující chladič, ale i ventilátor ochlazující vytlačovaný materiál. Materiál pak rychleji tuhne a výsledky jsou lepší. Rozdíl je vidět na obrázku 16.



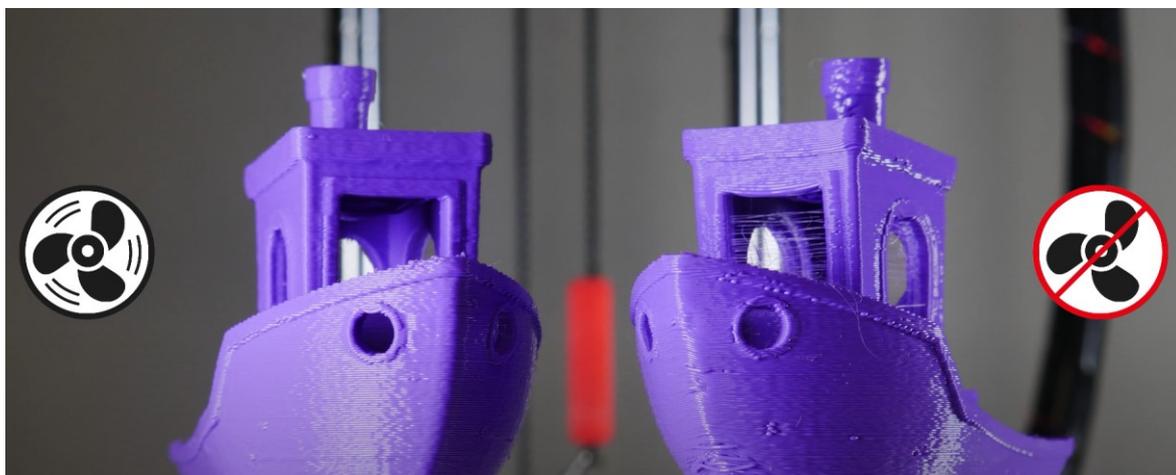
Obrázek 13 Konstrukce hlavy tiskárny a průchod filamentu hlavou



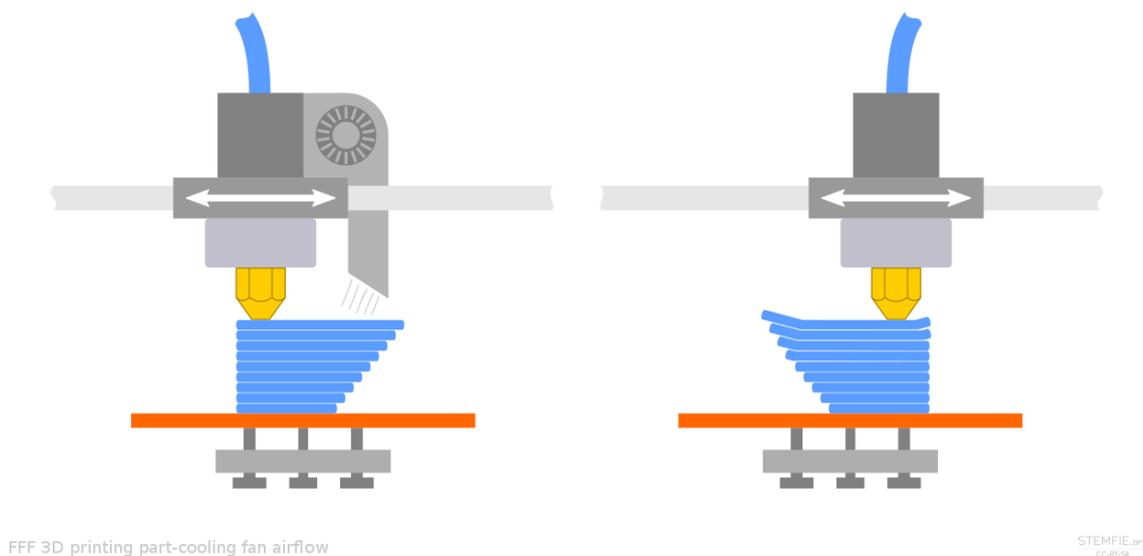
Obrázek 14 Bontech kolečka, která pohybují s filamentem



Obrázek 15 Ventilátory na tiskárně a jejich použití [18]

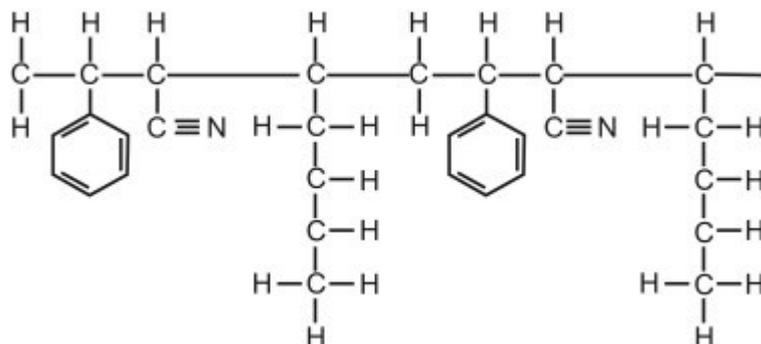


Obrázek 16 Rozdíl mezi výtiskem, který byl chlazený ventilátorem a nechlazeným výtiskem



Obrázek 17 Rozdíl mezi výtiskem, který byl chlazený ventilátorem a nechlazeným výtiskem (zdroj: wikimedia.org)

2.1 ABS (akrylonitrilbutadienstyren)



Obrázek 18 Chemická struktura ABS

ABS se vyrábí z akrylonitrilu, butadienu a styrenu. Jedná se o materiál běžně používaný v 3D tisku technologií FFF. ABS je lehký a má dobrou rázovou houževnatost, je odolný proti oděru a cenově dostupný. Teplota skelného přechodu plastu ABS je 105 °C Široce se používá při výrobě velkého množství zboží denní potřeby, příkladem jsou třeba klávesy na klávesnici. ABS se používá, pokud díly vyžadují zvýšenou pevnost a tepelnou odolnost.

Výhody

- Pevnost a odolnost
- Recyklovatelnost
- Snadné následné zpracování a barvení

- Odolný proti otěru
- Odolává vyšším teplotám kolem 100 °C (tisk dílů do interiéru automobilu)
- Mnoho dostupných barev a kompozitů
- Nízká cena
- Po vytištění je možné modely vyhladit pomocí acetonových par

Nevýhody

- Není odolný UV
- Vyšší teplota tisku
- Obtížnější na tisk (potřebuje vyhřívanou podložku nebo komoru tiskárny, deformuje se při tisku)
- Po zahřátí vytváří nepříjemný štiplavý zápach
- Nasává vlhkost ze vzduchu
- Díly mají tendenci se smršťovat, což vede k rozměrové nepřesnosti

Požadavky na tiskárnu

- Teplota podložky 95–110 °C
- Teplota hot-endu 220–250 °C
- Vyhřívaná podložka nebo uzavřená vyhřívaná komora
- Chlazení při tisku není vyžadováno
- Ideálně na podložce kaptonovou pásku, PVA lepidlo nebo vrstva ABS. Ta se nanáší tak, že se v rozpouštědle rozpustí ABS (prodává se jako ABS Juice, Glue, Slurry nebo česky označované jako „džusík“, ale je možné si tuto tekutinu připravit svépomocí)

S masovým rozšířením 3D tisku začalo tiskařům vadit, že tisk není úplně jednoduchý, a hlavně začátečníci používají jiné materiály, nejčastěji materiál PLA, který se neodlepjuje od podložky a tolik se nedeformuje.

Nejstarší metoda je nanesení rozpuštěného materiálu ABS na podložku v tenké vrstvě. To zajistí dobrou přilnavost k podložce. Tiskaři, kteří pracují s materiálem ABS si pak často připravují tři různé hustoty (ABS juice, glue a slurry – Obrázek 19).

ABS juice je nejlepším způsobem, jak zajistit, aby výtisky z ABS přilnuly k tiskové podložce. Vzhledem k tomu, že obsahuje aceton, je potřeba aplikovat ho jen na podložky, které jsou k tomu vhodné, třeba na kaptonovou pásku nebo na sklo. Plastové nebo plastem potažené podložky nejsou vhodné.[19]



Obrázek 19 ABS juice, glue a slurry [19]

Hustější varianty jako ABS (glue, slurry) se pak spíše používají jako lepidlo na lepení objektů složených s více dílů tištěných samostatně nebo jako tmel. Podrobný návod na výrobu je možné najít na [19].

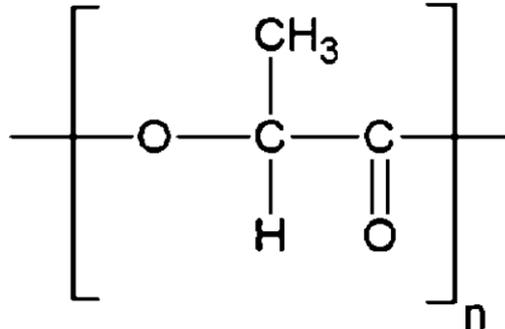
2.2 ABS-T (akrylonitrilbutadienstyren + methyl-methacrylate)

ABS-T je materiál, který má menší smrštění než ABS, a proto z něj lze tisknout objekty větší velikosti. Barvy jsou lesklé a některé transparentní. Klasické ABS se vyznačuje smrštivostí a barvy jsou matné. ABS-T (akrylonitrilbutadienstyren + methyl-methacrylate) je ABS obohacené o MMA. Vlastnosti materiálu a používané teploty jsou podobné jako u ABS.

2.3 PLA (polylactic acid)

PLA (kyselina polylactická) je nejpoužívanějším materiálem pro 3D tisk. Je to základní materiál pro většinu 3D tiskáren založených na FFF technologii, protože jej lze tisknout při nízké teplotě a nevyžaduje vyhřívání lůžka. PLA je skvělý první materiál pro začátečníky, když se učí používat 3D tiskárnu, protože se snadno tiskne, je levný a vytváří díly, které lze použít pro širokou škálu aplikací. Někdy je uváděno, že je to jeden z neekologičtějších

filamentů na současném trhu. PLA se vyrábí z kukuřice a cukrové třtiny tzn. jedná se o obnovitelný zdroj rostlinného původu. Materiál při tisku nevydává nepříjemný zápach, jako ABS.



Obrázek 20 Chemická struktura PLA

Výhody

- Jednotlivé vrstvy se velmi dobře nanášejí, povrch pak vypadá lépe, než u jiných materiálů
- Snadné následné zpracování
- Biologicky odbouratelný
- Vyrábí se v mnoha barvách a lze jej snadno barvit
- Pro zlepšení pevnosti jej lze temperovat
- Snadno a rychle se tiskne
- Nižší teplota tisku
- Malé smrštění
- Nízká cena
- Materiál je pevný, ale má tendenci se lámat v malých tloušťkách, stejně tak se může lámat filament
- Výborná rozměrová přesnost
- Díky minimální tepelné roztažnosti je PLA skvělou volbou na větší tisky. Nedochází ke kroucení nebo separaci vrstev

Nevýhody

- Nízká tepelní odolnost výtisků (pokud výtisk v létě zapomenete ve sluncem rozpáleném autě, zdeformuje se)

- Vlákno křehne a láme se
- Materiál není UV odolný, nehodí se používat ho na výtisky určené do venkovního prostředí
- Při teplotách nad 50 °C se výtisky začínají deformovat
- Citlivý na vzdušnou vlhkost
- V létě se u některých tiskáren zhoršuje kvalita nebo se objekty vůbec nedaří tisknout

Požadavky na tiskárnu

- Teplota podložky 45–60 °C (pokud je vyhřívána)
- Teplota hot-endu 190–220 °C
- Vyhřívána podložka nebo uzavřená vyhřívána komora není potřeba
- Chlazení při tisku na 100 % otáček

Chlazení je jedním z nejdůležitějších aspektů tisku PLA. Mít vyladěný chladicí ventilátor znamená obrovský rozdíl v kvalitě tištěných dílů (obrázek 16). Čerstvě extrudovaný plast potřebuje co nejrychleji vychladnout pod teplotu skelného přechodu. To zabrání deformaci plastu. Ventilátor by se měl otáčet na 100 % otáček, mimo 1-2 prvních vrstev. Tyto první vrstvy slouží k tomu, aby výtisk přilnul k tiskové podložce. Hlavně při tisku malých dílů, kde je plocha jednotlivých vrstev velmi malá, je nutné zajistit dostatečné chlazení. Toho je možné dosáhnout snížením rychlosti tisku nebo nastavením pauzy mezi vrstvami.

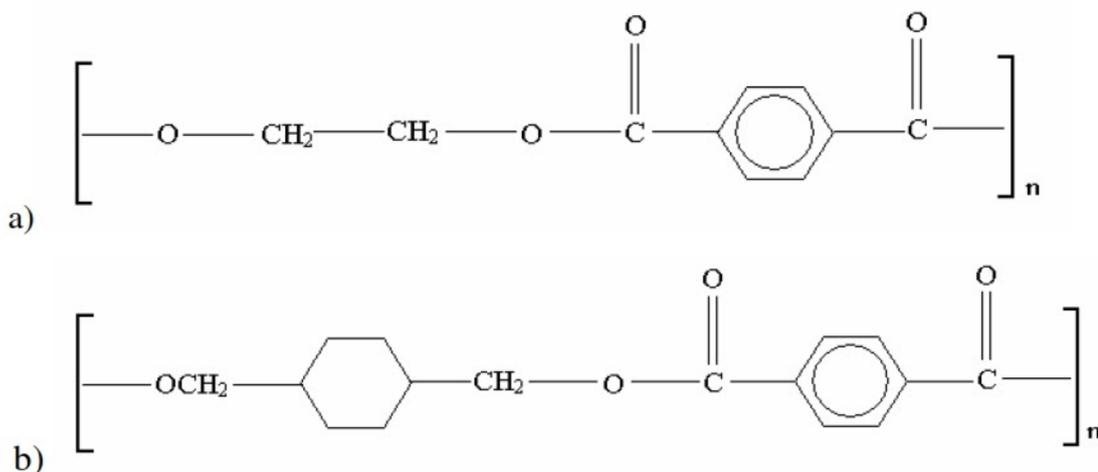
Některé tiskárny mají problém s tiskem PLA především v letních měsících (nebo v místnostech, kde je vyšší teplota).

Výrobci často prodávají mimo PLA také materiály, které jsou na PLA založené. V závislosti na značce jej najdete jako „PLA+“, „PLA Plus“ nebo „PLA Pro“ apod. Tyto názvy se většinou používají pro varianty PLA, jejichž materiálové vlastnosti byly vylepšeny použitím aditiv nad rámec jeho tradičního složení. PLA+ je stále PLA, protože má stejné základní složení. Aditivy se jen výrobce snaží vylepšit jeho vlastnosti, jako je třeba teplotní odolnost.

2.4 PET (PolyEthylene Terephthalate), PETG (PolyEthylene Terephthalate Glycol), CPE (Co-PolyEster)

Materiál PETG je ve své podstatě stejný, jako materiál PET. PET je termoplastický polymer z rodiny polyesterů. Je kombinován ze dvou monomerů a široce používán téměř na všechno

(lahve, oblečení apod.). Písmeno G v PETG označuje glykol, který se přidává během výrobního procesu. Glykol modifikuje vlastnosti materiálu PET, aby byl méně křehký a snadněji se tisknul. PETG je pevný a houževnatý materiál, který se vyznačuje dobrou tepelnou stálostí. PETG má mechanické a teplotní vlastnosti blízké ABS, ale pokud jde o tisk, vlastnosti se blíží spíše PLA. Díky malému smrštění při tisku je PETG vhodný materiál pro tisk velkých objektů.



Obrázek 21 Chemická struktura PET/PETG

Výhody

- Může být certifikovaný pro styk s potravinami, možno i sterilizovat
- Vrstvy vypadají hezky a jsou hladké
- Materiál je částečně flexibilní
- Není citlivý na vlhkost
- Materiál je recyklovatelný a lze jej znovu použít i když se s každým znovupoužitím mírně zhoršují vlastnosti
- Pevný a odolný proti nárazu
- Může být průhledný
- Nízká cena
- Je jednoduchý na tisk

- Teploty při tisku se pohybují mezi PLA a ABS
- Dobře drží na podložce
- Při tisku většinou bez zápachu

Nevýhody

- Při tisku mění barvu (z průsvitné na poloprůhlednou)
- Pokud je teplota při tisku příliš vysoká, zkréhne (PETG je odolnější)
- Měkne při teplotách nad 70 °C
- Špatně se tisknou mosty
- Výtisky mohou být chlupaté (obrázek 22)

Požadavky na tiskárnu

- Teplota podložky 75–90 °C (pokud je vyhřívána, ale není potřeba vyhřívat)
- Teplota hot-endu 230–250 °C
- Vyhřívána podložka nebo uzavřená vyhřívána komora není potřeba, ale pak je potřeba použít PVA lepidlo nebo třeba papírovou malířskou pásku na povrch tiskové podložky
- Chlazení při tisku je nutností
- Výtisky jsou lesklé, barvy často poloprůhledné

CPE neboli kopolyester je materiál na bázi kyseliny tereftalové. Jedná se o vylepšený PET (PETG) filament. Toto označení používá jen několik málo výrobců. Jejich cílem je vylepšit PET/PETG tak, aby se tento nový materiál co nejvíce svými vlastnostmi přiblížil materiálu ABS.

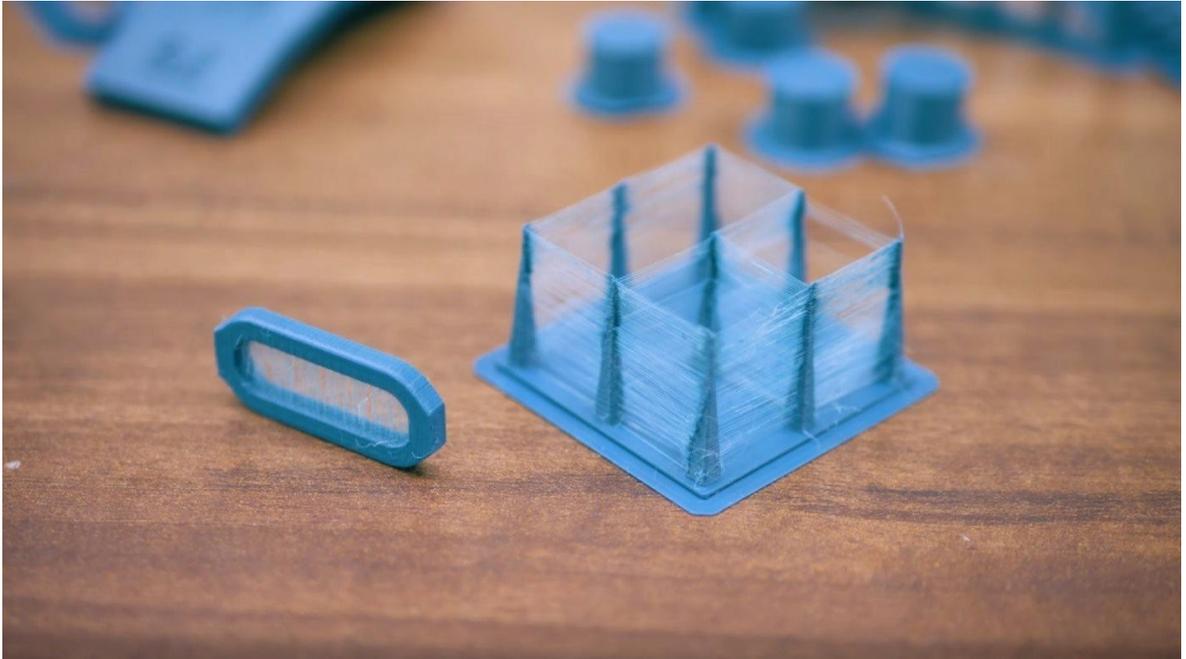
Požadavky na tiskárnu

- Teplota podložky 70–90 °C (pokud je vyhřívána, ale není potřeba vyhřívat)
- Teplota hot-endu 245–275 °C

Jinak jsou vlastnosti podobné PET/PETG. CPE jsou je pevný a všestranný materiál s rostoucí oblibou. Také jej rád používám, protože nese výhody PET a má o něco lepší vlastnosti.

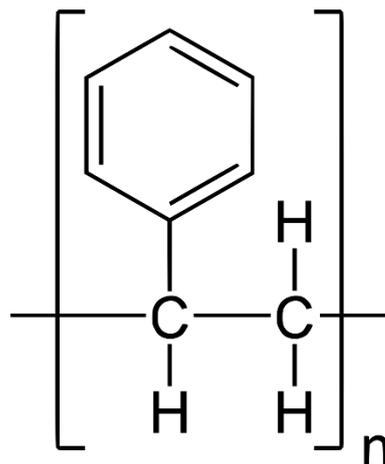
Všechna vlákna PETG spadají do kategorie kopolyesterů. PETG má přidáný glykol, který odstraňuje křehkost způsobenou krystalizací při zahřívání standardních PET filamentů.

Je také možné se setkat s označením CPE+ nebo PCTG. CPE+ a PCTG vylepšuje původní CPE tím, že nabízí zvýšenou teplotní odolnost až do 100 °C a ještě vyšší rázovou houževnatost (860 J/m), pevnost v ohybu (64 MPa) a tvrdost (Rockwell 111). Vyšší je ale také cena CPE+.



Obrázek 22 Chloupky a vlákna u výtisků z PET/PETG

2.5 HIPS (High Impact PolyStyrene)



Obrázek 23 Chemická struktura HIPS



Obrázek 24 Rozpouštění podpory z HIPS

HIPS je lehký materiál nejčastěji používaný jako rozpustný podpurný materiál pro modely z jiného materiálu, hlavně ABS. HIPS neboli High Impact PolyStyrene je rozpustný pevný materiál, který má dvojí využití. Buď je možné tento materiál použít přímo pro tisk modelů nebo je možné využít rozpustnost a snadnou opracovatelnost tohoto materiálu a využít ho pro tisk rozpustných podpor (obrázek 24 ukazuje, jak se rozpouští podpora z HIPS v d-limonene). Při použití jako podpurný materiál lze HIPS rozpustit v d-limonene, takže výtisk nebude mít žádné stopy způsobené odstraněním podpor. Práce s HIPS se při tisku hodně podobá práci s ABS, díky čemuž je logickým partnerem pro duální tisk. HIPS je nejen skvělý pro podporu ABS tisků, ale je také rozměrově stabilnější a o něco lehčí než ABS, takže je skvělou volbou pro díly, které nemají mít dlouhou životnost nebo pro aplikace, které vyžadují nižší hmotnost výtisků.

Velkou výhodou je také velmi snadná opracovatelnost. HIPS je poměrně křehký a snadno se láme. Toho lze využít při odlamování podpor. Přestože lze HIPS rozpustit v d-limonene, je vhodné podpory nejprve zkusit mechanicky odlámat. D-limonene je poměrně drahé rozpouštědlo a odlamáním co největšího množství podpurného materiálu je pak možné dosáhnout značné finanční úspory. Je samozřejmě nutné pracovat opatrně, aby nedošlo k poškození modelu.

Materiál HIPS se také snadno brousí, toho je možné využít při post-processingu a úpravách výtisků. HIPS se snadno lepí.

Výhody

- Odolný proti nárazu
- Odolný vlhkosti
- Materiál je lehký
- Rozpustný v d-Limonenu
- Snadno opracovatelný
- Nízká cena, jeden z nejlevnějších materiálů
- Lze dodatečně opracovat a lakovat
- Stejná teplota podložky jako ABS

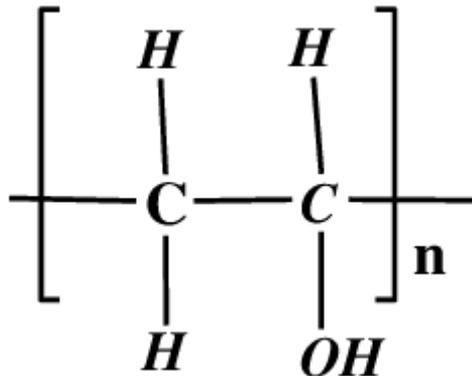
Nevýhody

- Zápach styrenu při tisku
- Nutno větrat
- Vysoká teplota tisku
- Obtížnější na tisk (potřebuje vyhřívanou podložku nebo komoru tiskárny, deformuje se při tisku)
- Není UV odolný

Požadavky na tiskárnu

- Teplota podložky 100–115 °C
- Teplota hot-endu 230–245 °C
- Nutno používat vyhřívanou podložku nebo vyhřívanou komoru
- Chlazení při tisku není nutné
- Vhodné použít skleněnou desku případně s kaptonovou vrstvou potřenou PVA lepidlem, případně PET fólii nalepenou na tiskovou podložku, lze ale tisknout i přímo na podložku

2.6 PVA (PolyVinyl Alcohol)



Obrázek 25 Chemická struktura PVA

PVA neboli PolyVinyl Alcohol je měkký a biologicky odbouratelný polymer, který je vysoce citlivý na vlhkost. PVA je běžně známý pro svou schopnost rozpouštět se ve vodě a často se používá jako podpůrný materiál pro složité tisky. Na rozdíl od HIPS se jedná o materiál, který lze rozpustit v obyčejné vodě. Tento materiál je ale problematictější skladovat, protože je velmi náchylný na vlhkost. Navíc je jeho cena asi 5násobná oproti HIPS. PVA lze snadno odstranit rozpuštěním v teplé vodě. Využití PVA pro tisk modelů na rozdíl od HIPS nedává smysl, pokud se nemá jednat o nějaké speciální modely, které by využily rozpustnost ve vodě jako podstatnou vlastnost.

Výhody

- Ve vodě rozpustný podpůrný materiál
- Nejsou nutná žádná speciální rozpouštědla
- Není potřeba žádný další hardware

Nevýhody

- Velmi citlivý na vzdušnou vlhkost
- Jsou potřeba vzduchotěsné skladovací nádoby
- Větší šance na ucpání, pokud je tryska ponechána horká, když se netiskne (degraduje)
- Vysoká cena

Požadavky na tiskárnu

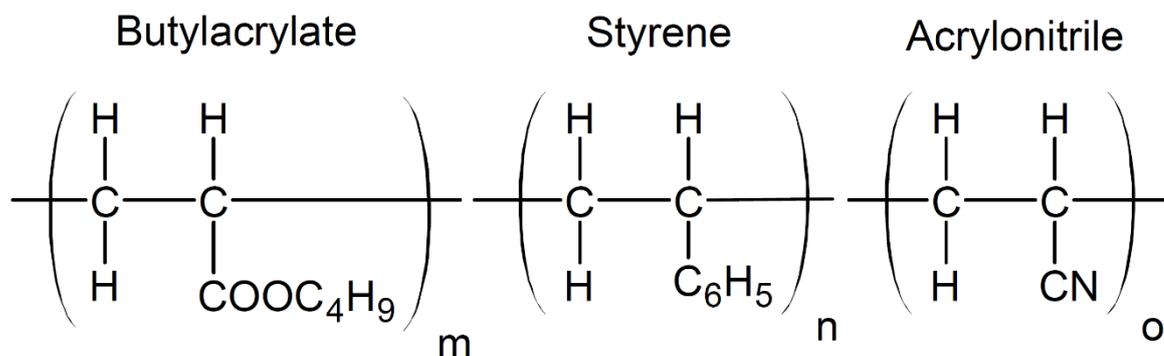
- Teplota podložky 45–60 °C (pokud je vyhřívána, ale není potřeba vyhřívát)
- Teplota hot-endu 185–200 °C

- Chlazení při tisku je nutné
- Drží prakticky na všem

PVA bylo v této práci již zmíněno, a to v souvislosti s tyčinkovými lepidly, které se běžně používají na lepení papíru a tiskaři je používají ke zlepšení adheze výtisku k podložce. Tato lepidla jsou obvykle vyrobena z navlhčeného PVA.

Tak jako v případě PLA, existují modifikace PLA označované třeba jako PLA+ apod. Většinou se výrobci snaží zvýšit odolnost proti vzdušné vlhkosti a zachovat tak co nejdéle vlastnosti materiálu.

2.7 ASA (Acrylic Styrene Acrylonitrile)



Obrázek 26 Chemická struktura ASA

ASA je běžnou alternativou ABS a jedná se o výborný materiál pro venkovní aplikace díky vysoké odolnosti vůči UV záření, teplotě a nárazu. ASA, také známý jako Acrylic Styrene Acrylonitril, je 3D tisknutelný plast s vlastnostmi podobnými ABS. Původně byl vyvinut jako alternativa k ABS, která by byla odolnější vůči UV záření změnou ve složení. ASA je známá vysokou odolností proti nárazu, vyšší teplotní odolností a obtížnějším tiskem. Běžně se používá ve venkovních aplikacích místo ABS díky své vynikající odolnosti vůči UV záření a drsným povětrnostním podmínkám. ASA si stále zachovává problematické vlastnosti pro tisk známé u ABS. Stejně jako ABS se z něj uvolňuje nepříjemný zápach a má velkou smrštitivost při změně teploty.

ASA má také dobrou chemickou odolnost a vysokou rázovou houževnatost. Jeho mechanické vlastnosti jsou velmi podobné ABS. Na rozdíl od kaučuku na bázi butadienu však ASA nemá v základním řetězci polymeru žádné dvojné vazby, což má za následek

výrazně lepší odolnost vůči povětrnostním vlivům a UV záření a také lepší dlouhodobou tepelnou a chemickou odolnost ve srovnání s dienovými kaučuky.

ASA se často používá na plastové díly v automobilovém průmyslu, sportovní zboží, ruční nářadí, zahradní techniku, rozvaděče apod.

Výhody

- Tuhost a odolnost
- Velká odolnost proti UV záření a povětrnostním podmínkám, ale může měnit barvu
- Snadné následné zpracování a barvení
- Odolává vyšším teplotám kolem 100 °C (vhodné třeba pro tisk dílů do interiéru automobilu) i teplotám pod bodem mrazu
- Vysoká teplota skelného přechodu
- Odolnější prasknutí při napětí než ABS

Nevýhody

- Vyšší teplota tisku
- Obtížnější na tisk (potřebuje vyhřívanou podložku nebo komoru tiskárny, deformuje se při tisku)
- Vyžaduje větrání kvůli potenciálně nebezpečným výparům
- Dražší materiál
- Díly mají tendenci se smršťovat, což vede k rozměrové nepřesnosti

Požadavky na tiskárnu

- Teplota podložky 90–110 °C
- Teplota hot-endu 220–245 °C
- Vyhřívaná podložka nebo uzavřená vyhřívaná komora je nutností
- Chlazení při tisku nutné
- Tisknout na kaptonovou vrstvu potřenou PVA lepidlem, případně PET folii nalepenou na tiskovou podložku, lze ale tisknout i přímo na podložku potaženou Ultemem

2.8 FLEX

Jako Flex výrobci filamentů označují materiály běžně označované jako TPU, TPE případně TPS, které jsou známé svou pružností, která umožňuje materiálu snadno se natahovat a ohýbat.

Filamenty označované jako FLEX jsou vyrobeny z termoplastických elastomerů, které jsou směsí tvrdého plastu a pryže. Jak název napovídá, tento materiál je svou povahou elastický a umožňuje snadné natahování a ohýbání plastu. Stupeň elasticity v plastu závisí na typu a chemickém složení. Některá vlákna mohou být například částečně ohebná jako automobilová pneumatika a jiná mohou být elastická a plně ohebná jako gumička.

TPU se oproti TPE o něco lépe tiskne a zachovává si elastické vlastnosti při nižších teplotách.

Stupnice tvrdosti flexi filamentů podle Shore

	měkké				středně tvrdé		tvrdé			
A	65	70	75	80	85	90	95	100		
D	19	22	25	29	33	39	46	58	60	
		70 A Recreus	75 A Herz		30 D Fiberlogy	85 A Verbatim	90 A Fillamentum Spectrum	95 A Polymaker	98 A Fillamentum Spectrum	
					82 A Recreus		88 A Filament PM	93 A Smartfil	96 A Fillamentum	
					32 D Filament PM			92 A Fillamentum	55 D Devil design Colorfabb	
								40 D Fiberlogy		

Obrázek 27 Přehled flexibilních materiálů na českém trhu podle tvrdosti Shore, zdroj: materialpro3d.cz

12% 30% 50%

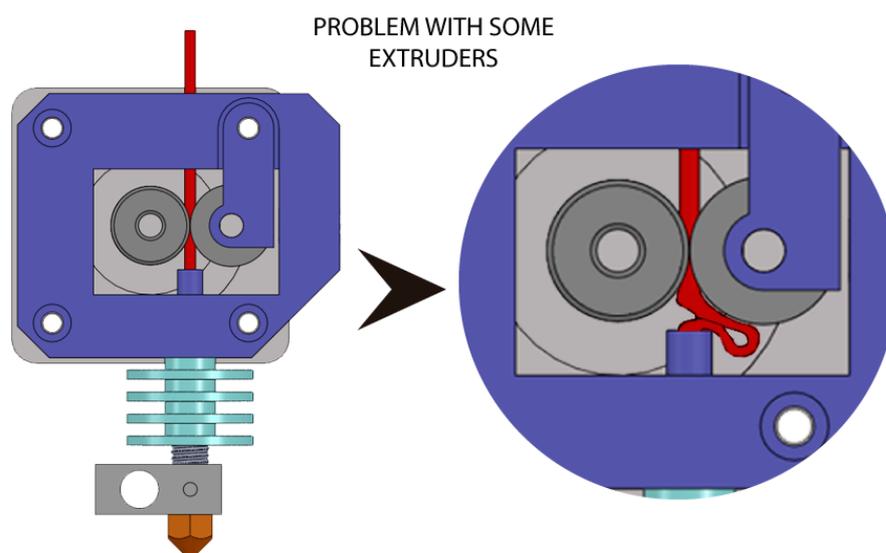


Obrázek 28 Ukázka možnosti změny vlastností materiálu pomocí vnitřní struktury 3D výtisku, zdroj: filament2print.com

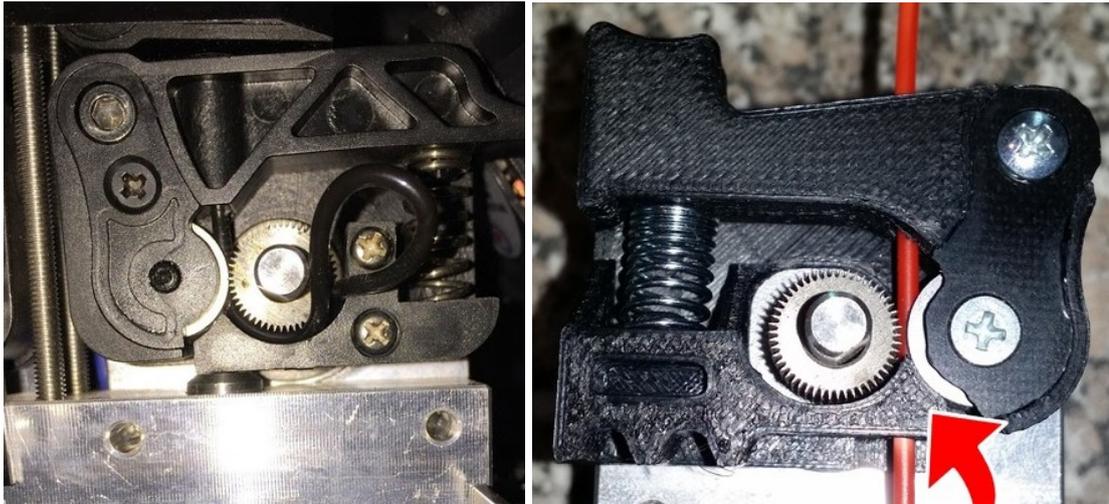
Na obrázku 27 je vidět přehled na našem trhu nabízených filamentů různých výrobců. Jsou seřazeny podle tvrdosti Shore (některý výrobce uvádí Shore A, jiný Shore D). Flexibilita těchto materiálů je vynikající, ale záleží také na nastavení softwaru pro 3D tisk. 3D tisk totiž na rozdíl od jiných technologií (třeba vstřikování) umožňuje regulaci také tím, že vyráběný objekt nebude mít 100% výplň. Když použijeme nízkou úroveň výplně, 3D tištěný objekt bude flexibilnější (obrázek 28). To umožňuje vytvářet objekty, které jsou pružnější nebo tužší, a přitom používat jen jeden materiál. Pokud jde o 3D tisk, FLEX filamenty vyžaduje přenos většího množství tepelné energie než mnoho jiných filamentů.

Tisk flexibilních materiálů na 3D tiskárnách je mnohem obtížnější než třeba tisk PLA. Materiál je měkký a struna nedrží přímý tvar. Když prochází hlavou tiskárny, má tendenci se ohnout a opustit dráhu, kterou má procházet (obrázek 29). Motor pak nedokáže strunu protlačit do horké části a tisk neprobíhá. Řešení je mnohdy obtížné a je nutné s flexibilním materiálem počítat už při konstrukci tiskárny. Na obrázku 30 je vidět rozdíl mezi špatně a dobře navrženou dráhou pro filament v hlavě tiskárny. Také je potřeba správně nastavit vůle podávacích koleček (Bontech) a dalších prvků hlavy tiskárny. Tisk u tiskáren s trubičkou z teflonu je často úplně nemožný.

Druhým problémem je to, že flexibilní materiály až příliš drží na podložce, takže je vhodné použít tyčinkové PVA lepidlo nebo třeba papírovou malířskou lepicí pásku jako separátor. Především tam, kde může dojít k poškození povrchu tiskové podložky (plechy s nalepenou PEI fólií).

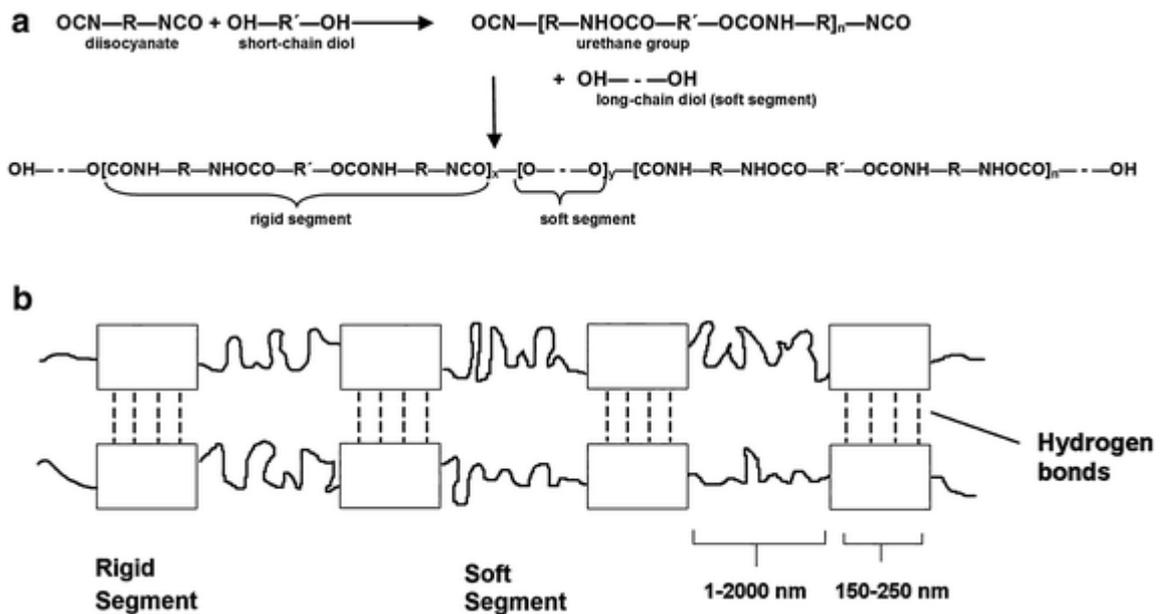


Obrázek 29 Typický problém při tisku flexibilních materiálů, struna nedrží tvar a v dráze, kterou má procházet se začne deformovat a neposouvá se do horké části



Obrázek 30 Obrázek vlevo ukazuje špatně a obrázek vpravo dobře navrženou hlavu tiskárny pro flexibilní materiál

2.8.1 TPU (ThermoPlastic Polyurethane)



Obrázek 31 Chemická reakce termoplastického polyuretanu (TPU) (a) a konfigurace blokové struktury (b) [20]

Termoplastický polyuretan (TPU) je flexibilní materiál, který je velmi odolný vůči chemickým látkám. Je odolný vůči oděru, oleji, chemikáliím a opotřebení, díky čemuž je ideální pro použití v průmyslových odvětvích, jako je automobilový průmysl. 3D tištěné díly s TPU jsou odolné a mají schopnost odolat okolní teplotě až 80 °C.

Výhody

- Pružný
- Dobře tlumí vibrace
- Odolává teplotám až 80 °C
- Výborná odolnost proti nárazu
- Odolává vyšším teplotám kolem 100 °C (vhodné třeba pro tisk dílů do interiéru automobilu)
- Mnoho dostupných barev a kompozitů
- Nízká cena
- Po vytištění je možné modely vyhladit pomocí acetonových par
- Výborná trvanlivost

Nevýhody

- Hůř se tiskne
- Špatně se tisknou mosty
- Na výtisku mohou být kapky apod.
- Ne každá tiskárna jej zvládne tisknout, nutnost důkladného vyladění tiskárny
- Vyšší cena

Požadavky na tiskárnu

- Teplota podložky 45–60 °C (není nutná vyhřívaná podložka)
- Teplota hot-endu 220–245 °C
- Vyhřívaná podložka nebo uzavřená vyhřívaná komora není nutností
- Chlazení při tisku nutné
- Materiál na podložce drží až moc, je vhodné zvážit, zda nepoužít třeba papírovou lepicí pásku jako separátor
- Rychlost tisku: 5-30 mm/s (je vhodné snížit rychlost tisku, protože flexibilní materiály se hůř tisknou a pomalejší tisk snižuje riziko problémů)

2.8.2 TPE (ThermoPlastic Elastomer)



Obrázek 32 Klíč vyrobený z TPE [21]

TPE je zkratka pro „termoplastický elastomer“. Je to směs tvrdého plastu a měkké pryže, takže má termoplastické i elastické vlastnosti. TPE pokrývá širokou škálu flexibilních materiálů, včetně termoplastického polyuretanu (TPU), termoplastického kopolyesteru (TCP), termoplastického polyamidu (TPA) a dalších. TPE a TPU jsou často volně zaměňovány. To ale není dobře.



Obrázek 33 TPE je možné zmáčknout [22]

TPE i TPU jsou kategorie materiálů. TPE je širší klasifikace pro měkké materiály a zahrnuje v sobě také TPU. TPU je specifický typ TPE. Na trhu 3D tisku se prosadil až v posledních letech, protože se jednodušeji tiskne než ostatní TPE.

TPU je tvrdší než TPE a tvrdost TPU Shore je mezi 60 A a 55D, s vysokým elastickým rozsahem (typicky 600-700 %). [21] TPE má logicky větší rozsah tvrdosti než TPU.

2.8.3 TPS (ThermoPlastic Starch)

TPS (nebo také TPE-S) je styrenová směs na bázi polyolefinu a SBS, SEBS nebo SEPS. TPS patří mezi nejnovější materiály pro 3D tisk, první testy a výzkumy začaly probíhat v roce 2016. Většina firem je na trh uvedla v letech 2020-2022. Na obrázku 27 jde třeba o materiál Herz A75. Filament TPS od Herz má hodnoty Shore A 75, takže se řadí mezi nejměkčí na trhu. TPS nabízí protiskluzový měkký povrch, což mu dává jedinečnou haptiku. Charakteristiky tohoto materiálu jsou doprovázeny nízkou absorpcí vlhkosti a výbornou přilnavostí vrstvy, která vytváří speciální hladký povrch, což z něj činí perfektní volbu pro rukojeti spotřebičů, pro těsnění apod.



Obrázek 34 Typické využití TPS

Výhody

- Jemný na dotek
- Protiskluzové vlastnosti
- Absorbuje jen málo vlhkosti
- Velmi dobrá pružnost při nízkých teplotách

Nevýhody

- Hůř se tiskne
- Špatně se tisknou mosty
- Ne každá tiskárna jej zvládne tisknout, nutnost důkladného vyladění tiskárny
- Vyšší cena

Požadavky na tiskárnu

- Teplota podložky 45–90 °C (u některých výrobců není nutná vyhřívaná podložka, záleží na konkrétním složení)
- Teplota hot-endu 220–280 °C
- Chlazení při tisku nutné
- Materiál na podložce drží až moc, je vhodné zvážit, zda nepoužít třeba papírovou lepicí pásku jako separátor

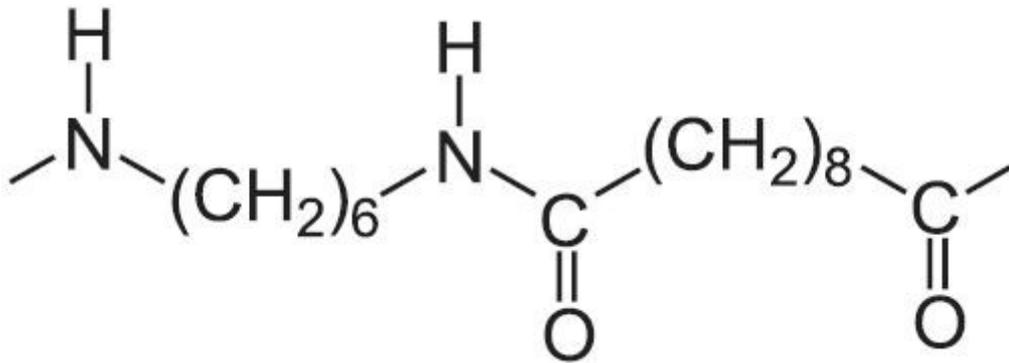
2.9 Industrial

Pod označením industrial výrobci nabízejí mnoho materiálů se zajímavými vlastnostmi. Tyto materiály se většinou hůř tisknou a vyžadují určitou zkušenost. Jejich výhodou jsou ale jejich vlastnosti.

2.9.1 PA (PolyAmide)

Materiál PA je znám jako Nylon. Nylon je oblíbený materiál v plastikářském průmyslu, známý pro svou houževnatost a pružnost. Tisk Nylonu není jednoduchý. Je hydrokopický. Pokud není materiál důkladně vysušen, kvalita tisku je špatná. Důležité je tak skladování materiálu. Jeho polo-flexibilní chování je odvozeno od Semi-krytalické struktury, která dodává pevnost a odolnost, nejlépe se hodí pro nejnáročnější technické aplikace. Nízký

koeficient tření umožňuje krátkodobé použití v kontaktu s pohyblivými částmi. Velkou výhodou je jeho teplotní odolnost až do 120 °C. Nylon je základním materiálem pro pokročilejší technologie, jako je technologie SLS (Selective Laser Sintering). Tiskne se tak, že laserový paprsek sintruje PA prášek.



Obrázek 35 Chemická struktura PA

Výhody

- Pevný a částečně pružný
- Vysoká odolnost proti nárazu
- Žádný nepříjemný zápach při tisku
- Dobrá odolnost proti oděru
- Odolává teplotám až 120 °C

Nevýhody

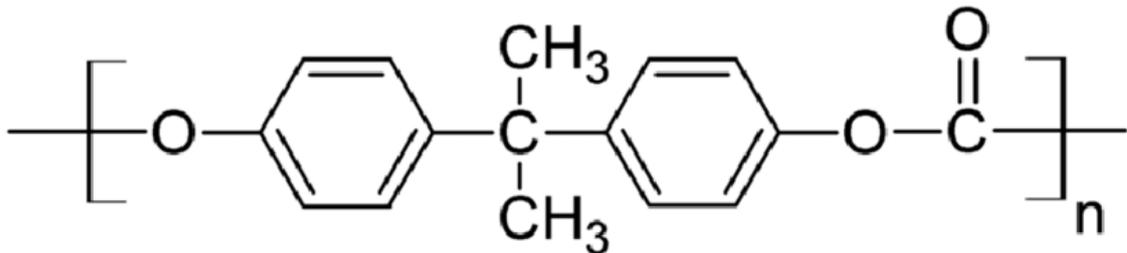
- Hůř se tiskne
- Sklon k deformaci
- Vyžaduje vzduchotěsné skladování, aby se zabránilo absorpci vody
- Nesprávně vysušený materiál může způsobit tiskové vady
- Vyšší cena

Požadavky na tiskárnu

- Teplota podložky 70–90 °C
- Teplota hot-endu 225–265 °C

- Chlazení při tisku nutné
- Ideálně na podložku z PEI nebo potřít PVA lepidlem z tyčinky

2.9.2 PC (PolyCarbonate)



Obrázek 36 chemická struktura PC

PC (někdy znám jako Lexan) je velmi pevný materiál určený pro náročná prostředí a strojírenské aplikace. Má extrémně vysokou tepelnou deformaci a odolnost proti nárazu. PC má také vysokou teplotu skelného přechodu (150 °C) a zachová si tak svou strukturální integritu až do této teploty. Lze jej ohýbat, aniž by došlo ke zlomení. Často se používá v aplikacích, kde je vyžadována určitá menší flexibilita. Většina dostupných polykarbonátových filamentů obsahuje aditiva, která umožňují tisk filamentu při nižších teplotách, takže je nutné se při tisku řídit doporučeními konkrétního výrobce.

Polykarbonát je extrémně hygroskopický, což znamená, že absorbuje vlhkost ze vzduchu. Po otevření by měl být skladován ve vzduchotěsných nádobách (nejlépe v nádobách se silikagelem). Tisk je obtížný, protože vyžaduje velmi vysoké teploty pro tisk a pokud se tiskne při příliš nízké teplotě nebo pokud je povoleno nadměrné chlazení, jednotlivé vrstvy se od sebe separují a výtisk se rozpadá. Polykarbonát se nejlépe tiskne na tiskárnách s uzavřenou komorou, které zvládnou vysoké teploty podložky a extrudéru.

Výhody

- Vysoká odolnost proti nárazu
- Přirozeně transparentní
- Ohybatelný bez zlomení
- Odolává teplotám až 150 °C

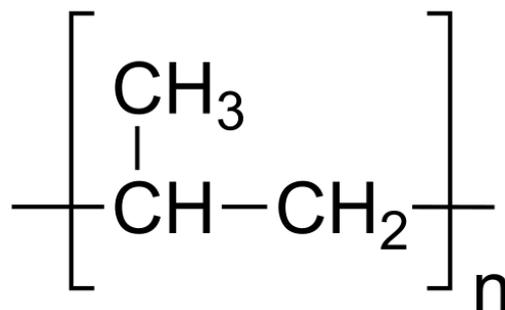
Nevýhody

- Vyžaduje velmi vysoké teploty tisku
- Náchylný k deformaci
- Velmi hyroskopický
- Nesprávně vysušený materiál může způsobit tiskové vady
- Vyšší cena, asi 3x vyšší než u PLA

Požadavky na tiskárnu

- Teplota podložky 80–120 °C
- Teplota hot-endu 260–310 °C (to už nemusí většina levných tiskáren zvládat nebo může docházet k poškození plastových dílů na hlavě tiskárny)
- Chlazení při tisku není potřeba
- Ideálně na podložku z PEI, speciální samolepicí fólie určené pro tisk PC, PVA lepidlo z tyčinky

2.9.3 PP (PolyPropylene)



Obrázek 37 Chemická struktura PC

Polypropylen je polotuhý a lehký materiál, který se běžně používá při skladování a balení (třeba uzavíratelné ZIP sáčky). Semi krystalická struktura materiálu způsobuje, že se 3D tištěné díly po ochlazení silně deformují, což komplikuje 3D tisk. Polypropylen je houževnatý a je odolný proti únavě, takže je ideální pro aplikace, jako jsou panty, popruhy, náramky, vodítka pro psy, oblečení atd.

Výhody

- Velká odolnost proti nárazu a únavě

- Dobrá tepelná odolnost
- Hladký povrch
- Vhodný pro styk s potravinami

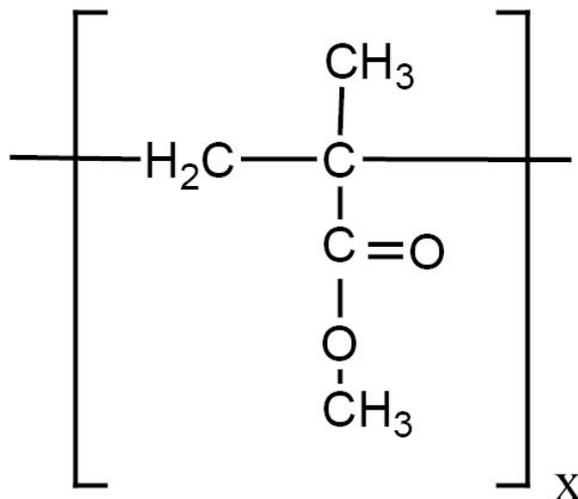
Nevýhody

- Opravdu hodně se deformuje
- Nízká pevnost
- Velmi špatně drží na podložce
- Vyšší cena, asi 2x vyšší než u PLA

Požadavky na tiskárnu

- Teplota podložky 85–100 °C
- Teplota hot-endu 220–250 °C
- Chlazení při tisku je nutné
- Materiál nedrží na podložce, je nutné použít speciální samolepící fólie nebo aspoň balící samolepící pásku nalepenou na tiskové podložce

2.9.4 PMMA (PolyMethyl MethAcrylate)



Obrázek 38 Chemická struktura PMMA

Materiál PMMA známe jako plexisklo. Používá se jako alternativa skla. Má dobrou rázovou houževnatost, výrazně vyšší než sklo, ale nižší než některé pevnější a dražší materiály, jako je polykarbonát. Má méně než poloviční hustotu než sklo, ale má srovnatelnou čírost, dobré

elektroizolační vlastnosti a propouští UV záření. Komerční uplatnění nachází jako náhražka skla tam, kde není nutná extrémně vysoká rázová houževnatost, ale je potřeba nízká hmotnost, velká průhlednost a nízká cena.

Tento materiál jsem zařadil mezi průmyslové, protože se používá poměrně málo, a hlavně ve speciálních aplikacích, kde je nutné využít jeho vlastnosti. Pro většinu aplikací stačí jiné materiály, které se mnohem snáze tisknou, třeba PET.

Výhody

- Lehký, pevný, lesklý, průsvitný termoplast odolný proti nárazu (pevnost v tahu je 65 MPa ohybová pevnost až 97 MPa)
- Tepelná odolnost do 80 °C
- Odolný vůči povětrnostním vlivům
- Propouští UV záření
- Propustnost světla je asi 92 %
- Rozpustný v acetonu, takže lze povrch vyhladit

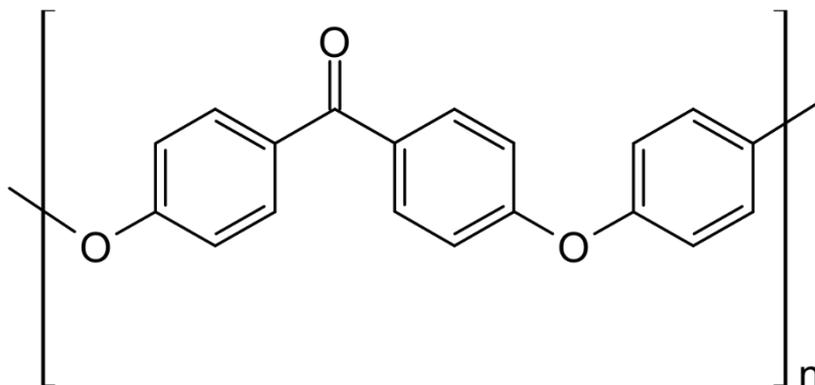
Nevýhody

- Není vhodný pro styk s potravinami
- Hodně se deformuje
- Špatně drží na podložce
- Křehký v tenkých vrstvách

Požadavky na tiskárnu

- Teplota podložky 50–90 °C
- Teplota hot-endu 220–250 °C
- Chlazení při tisku není nutné
- Podložka z PEI nebo použít PVA lepidlo z tyčinky, kapronová fólie

2.9.5 PEEK (PolyEtherEtherKetone)



Obrázek 39 Chemická struktura PEEK

PEEK udržuje své mechanické vlastnosti až do 250 °C a je odolný vůči širokému spektru chemikálií. Jde o speciální polymer ideální pro náročné aplikace. PEEK se běžně používá v automobilovém a leteckém průmyslu k výrobě trubek, těsnění, ložisek a konzol. Filament má pevnost v tahu 98 MPa, ohybový modul 3,8 GPa a rázovou pevnost 8 kJ/m². Výrobek navíc může být po tisku žihán pro zlepšení jeho vlastností. Materiál je recyklovatelný a může přijít do styku s potravinami. Jeho cena je extrémně vysoká (asi 30krát vyšší než cena PLA).

Výhody

- Výborné mechanické vlastnosti
- Tepelná odolnost do 250 °C
- Odolný vůči povětrnostním vlivům
- Recyklovatelný
- Může přijít do styku s potravinami

Nevýhody

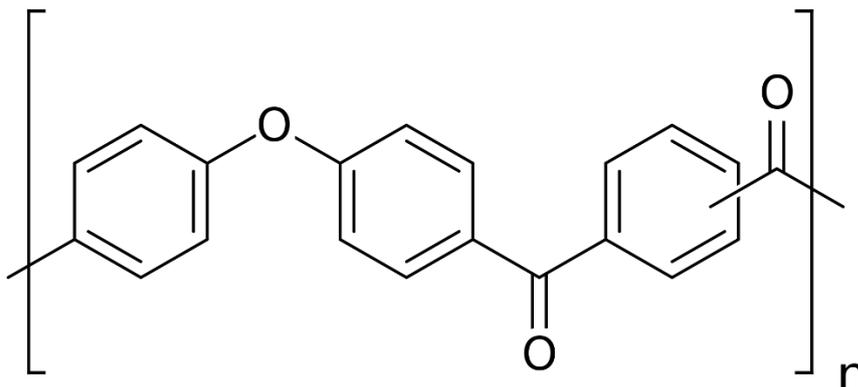
- Hydroskopický
- Hodně se deformuje
- Vyžaduje speciální tiskárny, většinou nelze tisknout na běžných tiskárnách
- Extrémně vysoká cena, jeden z nejdražších filamentů na trhu

Požadavky na tiskárnu

- Teplota podložky 230 °C

- Teplota hot-endu 350–400 °C
- Tiskárna musí tento materiál podporovat
- Chlazení při tisku nepoužívat
- Důrazně doporučovaná vyhřívaná komora

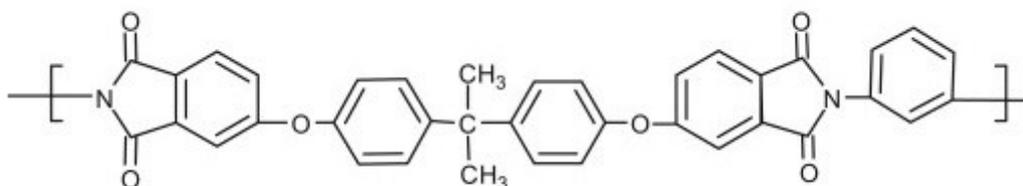
2.9.6 PEKK (PolyEtherKetoneKetone)



Obrázek 40 Chemická struktura PEKK

PEKK je naprostou špičkou, ale jedná se také o asi vůbec nejdražší materiál na trhu. Jeho cena je asi 35krát vyšší než u PLA. PEKK má nižší stupeň krystalizace než PEEK. To znamená, že po 3D tisku dílu bude méně ovlivněny procesem chlazení. PEKK se tak snáze tiskne. Vlastnosti jsou podobné jako u PEEK.

2.9.7 PEI (PolyEtherImid)



Obrázek 41 Chemická struktura PEI

PEI prodáváný pod ochrannou známkou ULTEM™ je amorfni termoplast. Má charakteristickou jantarovou průhlednou barvu a vlastnosti podobné příbuznému plasty PEEK. Ve srovnání s PEEK je PEI levnější, ale má nižší rázovou pevnost a použitelnou teplotu. Používá se především pro svou vysokou mechanickou pevnost, stabilní elektronické vlastnosti a vynikající chemickou stabilitu.

PEI vyvinul Josephem Wirthem z plastové divize společnosti GE na počátku 80. let. V současné době je materiál PEI vyráběn pod značkou ULTEM™ společností SABIC, která v roce 2007 získala divizi plastů společnosti GE.

Stejně jako PEEK, PEI je pevnější než většina ostatních 3D tiskových filamentů. PEI má pevnost v tahu 85 MPa a Youngův modul 3,2 GPa. Pro srovnání PA filament má pevnost v tahu 34 MPa a Youngův modul 0,6 GPa. Toto srovnání ukazuje obrovský rozdíl, který mezi těmito materiály je.

PEI má teplotu skelného přechodu 217 °C a začíná tát při 240 °C. Díky tomu je PEI vynikajícím materiálem pro funkční díly, které musí snášet velké teploty. Materiál je také možné snadno sterilizovat, takže se hodí pro lékařské aplikace.

PEI odolává kyselinám, zásadám a olejům.

Výhody

- Výborné mechanické vlastnosti
- Tepelná odolnost do 210 °C
- Odolný vůči povětrnostním vlivům
- Chemicky odolný
- UV odolný

Nevýhody

- Hydroskopický
- Hodně se deformuje
- Vyžaduje speciální tiskárny, většinou nelze tisknout na běžných tiskárnách
- Filament hodně náchylný k lámání, je nutné s ním zacházet opatrně
- Velmi vysoká cena (asi 15x dražší než PLA)

Požadavky na tiskárnu

- Teplota podložky 120–160 °C
- Teplota hot-endu 355–390 °C
- Tiskárna musí tento materiál podporovat

- Tisk na PEI podložku nebo kaptonovou pásku
- Chlazení při tisku nepoužívat
- Důrazně doporučovaná vyhřívaná komora

Tento materiál bude ještě zmíněn v následující kapitole, protože se používá k výrobě podložek pro 3D tisk.

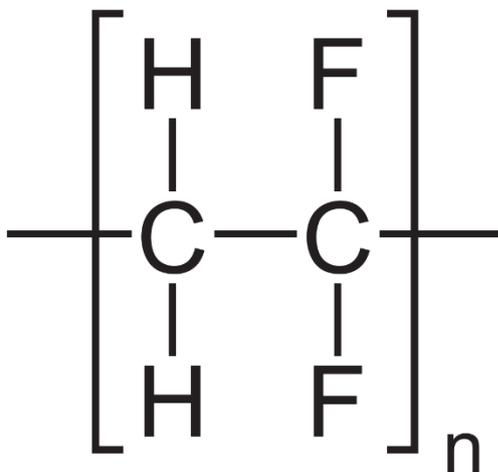
2.9.8 PSU (PolySulfon), PPSF/PPSU (PolyFenylSulFon), PPS (PolyFenylen Sulfid)

Skupina materiálů s velmi podobnými vlastnostmi jako PEI. Třeba PPS je známý jako jeden z chemicky nejodolnějších termoplastických materiálů, je nerozpustný v jakémkoli známém rozpouštědle pod 200 °C.

2.9.9 PVDF (PolyVinyliDenFluorid)

PVDF je polymer, který nabízí výjimečnou tepelnou a chemickou odolnost pro tisk v průmyslové kvalitě. Tento filament lze použít v náročných aplikacích a v nejextrémnějších podmínkách. Je určen pro použití do 150°C. PVDF je odolný vůči většině chemikálií a rozpouštědel, takže se skvěle hodí pro aplikace, které budou vystaveny drsnému prostředí.

- Teplota podložky 90–110 °C
- Teplota hot-endu 245–265 °C
- Tisk na PEI podložku nebo kaptonovou pásku, PVA lepidlo z tyčinky
- Chlazení při tisku nepoužívat
- Při teplotách nad 290 °C začíná degradovat



Obrázek 42 Chemická struktura PVDF

2.9.10 Materiály s uhlíkovými vlákny

Filamenty, které obsahují uhlíková vlákna je vhodné tisknout na tiskárnách s odolnější tryskou. Většina tiskáren má trysku z mosazi. Uhlíková vlákna se chovají abrazivně a rychle začnou zvětšovat otvor v trysce, proto je vhodnější použít třeba nerezovou nebo rubínovou trysku.

Filamenty s uhlíkovými vlákny obsahují drobná vlákna, která jsou přimíchána do základního materiálu, aby se zlepšily vlastnosti tohoto materiálu. Většinu materiálů, které se pro 3D tisk používají lze koupit s přimíchanými uhlíkovými vlákny. Tato vlákna jsou extrémně pevná a zvyšují tak pevnost a tuhosti filamentu. Výtisky z materiálů, které obsahují uhlíková vlákna jsou lehčí, pevnější a rozměrově stabilnější. Nastavení tisku, jako je teplota podložky a hot-endu a rychlost vytlačování, budou velmi podobné normálním nastavením používaným pro základní materiál, do kterého byla vlákna přidána.

2.10 Ostatní materiály

Mimo běžných a industriálních materiálů je možné najít mnoho dalších materiálů. Obvykle se jedná o materiály zaměřené třeba na biodegradability, materiály se zajímavými vzhledovými efekty, s přísadkou dřeva, kovu nebo speciálními vlastnostmi jako jsou antistatické nebo antibakteriální vlastnosti nebo magnetická detekovatelnost.

2.10.1 Materiály s příměsí dřeva

Jedná se o kompozity, které kombinují základní materiál PLA s dřevěným prachem, korkem a dalšími práškovými deriváty dřeva. Filament se obvykle skládá z přibližně 15-40 % dřevěných částic. Přítomnost těchto částic dodává 3D tištěným dílům estetiku skutečného dřeva, proto se využívají zejména v designových prvcích. Třeba při tisku květináčů apod. Filament je také méně abrazivní ve srovnání s jinými kompozitními filamenty, jako jsou filamenty plněné uhlíkovými vlákny nebo kovovými prášky. Dřevo je mnohem měkčí, přesto se doporučuje použít trysky určené pro abrazivní materiály. Vlastnosti a teploty jsou zase podobné materiálu, do kterého je dřevo přimícháno. Doporučuje se používat trysky s většími otvory, protože částice dřeva mají obvykle větší rozměry.

2.10.2 Materiály s příměsí kovu

Tyto materiály obsahují velmi jemný kovový prášek, jako je měď, bronz, mosaz a nerezová ocel. Přítomnost tohoto kovového prášku činí filament mnohem těžší než standardní plasty.

To znamená, že díly vytištěné kovem plněným filamentem budou vážit výrazně více než díly ze standardního neplněného materiálu, a to navzdory použití stejného nastavení a spotřebě stejného množství materiálu. Kovem plněné filamenty mají tendenci být velmi abrazivní. Standardní mosazná tryska je příliš měkká a rychle se opotřebuje. Je vhodné použít buď nerezovou nebo rubínovou trysku.

Použití kovů má u těchto materiálů často jen estetické důvody, protože procento plnění je poměrně nízké. Existují ale speciální materiály, které mají vyšší procento plnění a používají se dále k sintrování, kdy je polymer teplem odstraněn a zůstane jen kov, který je sintrován v peci. Takový výrobek se v sintrovací peci zmenší a s tím je potřeba počítat už při přípravě dat pro tisk.

Některé materiály jsou plněny kovovými prášky, aby získaly specifické vlastnosti.

2.10.3 Materiály s magnetickými vlastnostmi

Jednou z možností, proč je do materiálu přidáván kovový prášek mohou být magnetické vlastnosti. Příkladem takového filamentu je materiál, který lze detekovat detektory kovů. Toho lze využít třeba v potravinářském průmyslu, kde je nezbytná absence kontaminantů jakéhokoli původu.

Společnost Proto-Pasta se chlubí tím, že jejich Magnetic Iron PLA je jediný materiál na trhu, který je přitahován magnety. Stejně jako čisté železo je toto vlákno přitahováno magnetickými poli. Tento materiál také rezaví jako skutečné železo, takže je zřejmé, že obsahuje příměs železného prachu.

Při vývoji vlastního materiálu pro tiskovou podložku (praktická část této práce) se mi povedlo připravit materiál, který by byl zřejmě vhodný pro výrobu filamentu, ze kterého by bylo možné tisknout magnety. Tento materiál by sice nejdříve bylo nutné zmagnetizovat v silném magnetickém poli, ale výroba magnetů by pak byla možná.

O něco podobného už se pokusili někteří vědci, ale jejich cílem nebylo materiál prodávat ale vyřešit jeho výrobou nějaký jiný problém, který řešili.

2.10.4 Materiály vodivé a antistatické

Pomocí aditiv do běžně dostupných materiálů se vyrábějí také materiály vodivé a antistatické. Tyto materiály nacházejí velké využití hlavně ve výrobě elektroniky, kde se používají pro výrobu různých přípravků a přepravních obalů.

2.10.5 Materiály pro odlévání kovů

Tato je specifická skupina materiálů, které bychom mohli zařadit mezi průmyslové materiály. Jedná se o plastové tiskové struny s vlastnostmi vosku. Používají se pro tisk modelů pro odlévání metodou ztraceného vosku.



Obrázek 43 Vlevo model z materiálu MOLDLAY, vpravo neopracovaný odlitek z kovu
(zdroj: <https://3dprint.com/>)

Postup odlévání podle [22]:

- *Z tvrdého vosku se vyrobí trojrozměrný pozitiv odlévaného předmětu.*
- *Pozitiv se pak nastříká tenkou cementační vrstvou a poté několikrát namáčí ve speciální keramice a nechá se zaschnout, dokud nevznikne masivní forma.*
- *Potom se nechá vosk roztát a vylije se z formy. Nevadí, když něco zůstane uvnitř.*
- *Potom se forma pomalu nažhává na tavnou teplotu. Někdy v téže peci jako tavenina. Zbytky vosku se jednoduše vypaří.*
- *Potom se do formy nalije tavenina.*
- *Tavenina (odlitek) se nechá ztuhnout.*
- *Když je odlitek ztuhlý, forma se rozbije a práce je hotová.*

Pro odlévání je důležité, aby měl materiál 2 vlastnosti:

- Shořel bez vývoje sazí

- Neroztahoval se se zvyšující se teplotou, aby nedošlo k prasknutí formy z keramiky

Zkoušel jsem několik materiálů, které byly určeny pro tuto specifickou aplikaci. Nakonec se nejvíc osvědčil materiál MOLDLAY, který shořel beze stop ve formě při teplotě asi 650 °C a nezpůsobil prasknutí formy.

2.10.6 Ostatní speciální materiály

Existuje mnoho dalších speciálních materiálů, které se při 3D tisku používají. Třeba čistící materiály, materiály svítící ve tmě, materiály se specifickými povrchovými efekty apod.

Zatímco vývoj 3D tiskáren se přesunul hlavně do oblasti software, kde je cílem zlepšit uživatelskou přívětivost, vývoj nových materiálů a barevných variant je velmi dynamický. Na trhu se neustále objevují nové materiály s novými vlastnostmi, které jsou určené pro tisk na FFF tiskárnách.

Také proto není možné pokrýt v této rešerši úplně všechny dostupné materiály. Lze předpokládat, že v nejbližších letech se naplno rozjede vývoj inteligentních materiálů. Takové materiály budou vyžadovat i specifický přístup a nové postupy ve výrobě. Na některé už nebude stačit obyčejný vytlačovací stroj, ale lze předpokládat, že se začnou používat třeba ko-extruzní hlavy, které budou jádro struny vytvářet z jednoho materiálu a na povrchu bude jiný materiál. Příkladem takto vyráběných filamentů mohou být třeba filameny s antibakteriálními účinky, kdy je na povrch nanášena antibakteriální látka. Případně je filament vyroben ze 2 složek, k jejichž smíchání má dojít až přímo v tiskárně.

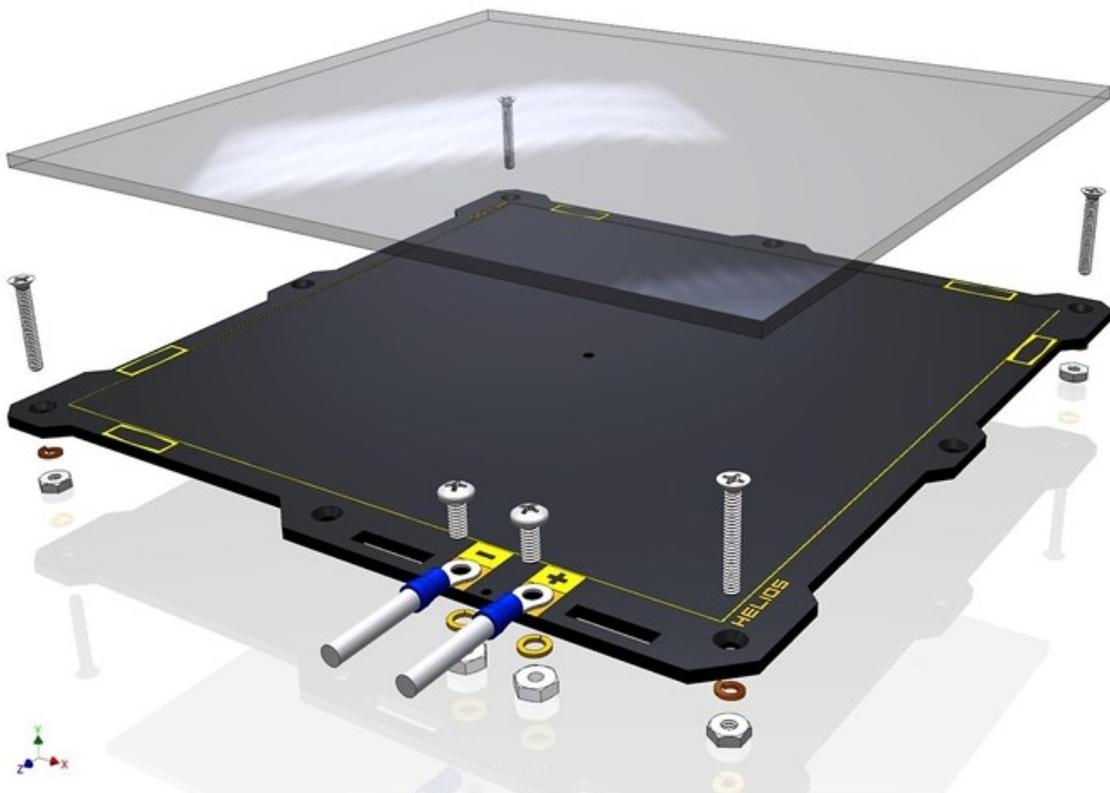
Jsem přesvědčen, že FFF 3D tisk je stále teprve na začátku a čeká nás ještě velký vývoj a řada inovací v této oblasti.

II. PRAKTICKÁ ČÁST

3 TISKOVÉ PODLOŽKY

Materiálů je celá řada, ale jako jeden z velkých problémů tisku se ukazují podložky. Podložka je velmi důležitou součástí tiskárny. Je možná důležitější než vlastní hlava tiskárny, která vytlačuje roztavený materiál. Tak jak se 3D tiskárny vyvíjejí, vyvíjejí se i podložky. Vývojáři se snaží vytvořit ideální podložku, aby na ni dostatečně držel jakýkoliv výtisk z jakéhokoliv materiálu. Je ale nutné, aby se výtisk dal z podložky sundat. Najít ideální podložku není vůbec jednoduché. Většina levnějších tiskáren nemá vyhřívanou komoru, která tiskárnu prodražuje, takže musí mít alespoň vyhřívanou podložku.

Pokud pominu tiskárny Stratasys, které měly vyhřívanou komoru a problém k řešení tak byl o dost jednodušší. Hledání vhodné podložky bylo velkým problémem pro ostatní konkurenty, kteří vzhledem k patentu nemohli využívat vyhřívanou komoru a museli si tak vystačit s vyhřívanou podložkou.



Obrázek 44 Vyhřívaná podložka pro 3D tisk se skleněnou deskou (zdroj: Panucatt Devices)

Vývoji nových podložek hodně pomohl RepRap. Nadšenci hledaly vhodné materiály a konstrukce, kde se dalo. Ne všechno, co se dá vyrobit ve velkých průmyslových firmách

bylo snadno dostupné pro nadšence, takže dostupnost pro běžného člověka byla dalším důležitým faktorem.



Obrázek 45 Vyhřívání rukojetí motocyklů (zdroj: Amazone)

Samozřejmě by bylo nejjednodušší používat nějakou desku z pevného materiálu, na kterou by se tisklo, ale vzhledem k tomu, že prvním materiálem, ze kterého se tisklo byla struna z ABS, tak tvůrci prvních RepRap tiskáren potřebovali vyhřívanou desku. Zkoušelo se všechno možné – hliníkové rezistory, rezistory T0220, eklektické kuchyňské plotýnky, vyhřívání rukojetí motocyklů (obrázek 45), ale jako nejvhodnější se ukázala deska leptaného plošného spoje (obrázek 46) anebo hliníková deska se zespodu nalepeným odporovým drátem zalitým v silikonu (obrázek 47).

Desky s leptaným plošným spojem se postupně vyvíjely a používají se dodnes. Postupem času se měnilo vedení vodivých cest tak, aby se dosáhlo co nejrovnoměrnějšího vyhřívání (na obrázku 48 je vidět rozdíl u dříve používané MK2B třeba na tiskárnách Rebel II a novější MK42, která se používala třeba u tiskáren Prusa i3 MK2).



Obrázek 46 Ukázka původních RepRap vyhřívacích desek s vyleptaným plošným spojem
(Zdroj: repprap.org)

3.1 Podložky ze skla

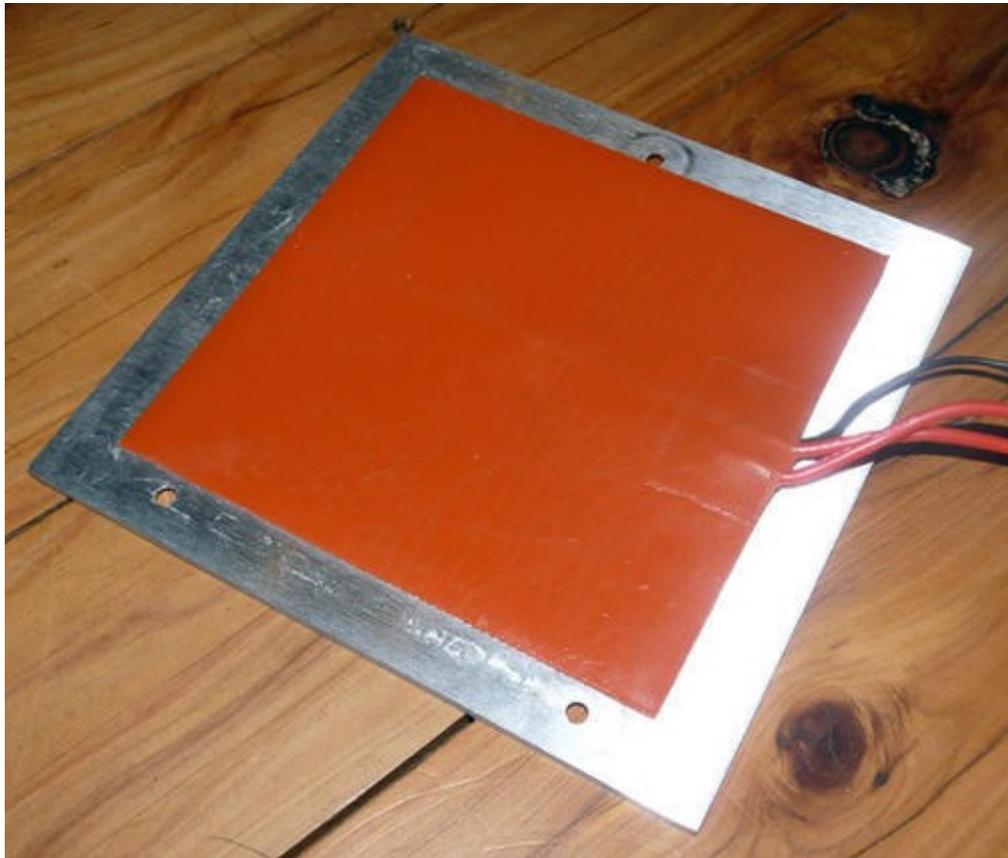
Na vyhřívací desku se pak přikládala deska, na kterou se tisklo. Na obrázku 45 je vidět, jak se na vyhřívanou desku pokládalo sklo. Stejně jako zakázková výroba desky plošného spoje, také výroba skleněné tabulky není velký problém. Stačí zajít do nejbližšího sklenářství a nechat si skleněnou destičku příslušných rozměrů uříznout.

Sklo má velkou výhodu, že je rovné a pevné. Nemá tendenci deformovat a roztahovat se se změnou teploty (v rozsahu teplot, kde se pohybují tiskárny). Do dneška sklo používá třeba Ultimaker, jeden z větších a známějších výrobců 3D tiskáren (obrázek 49).

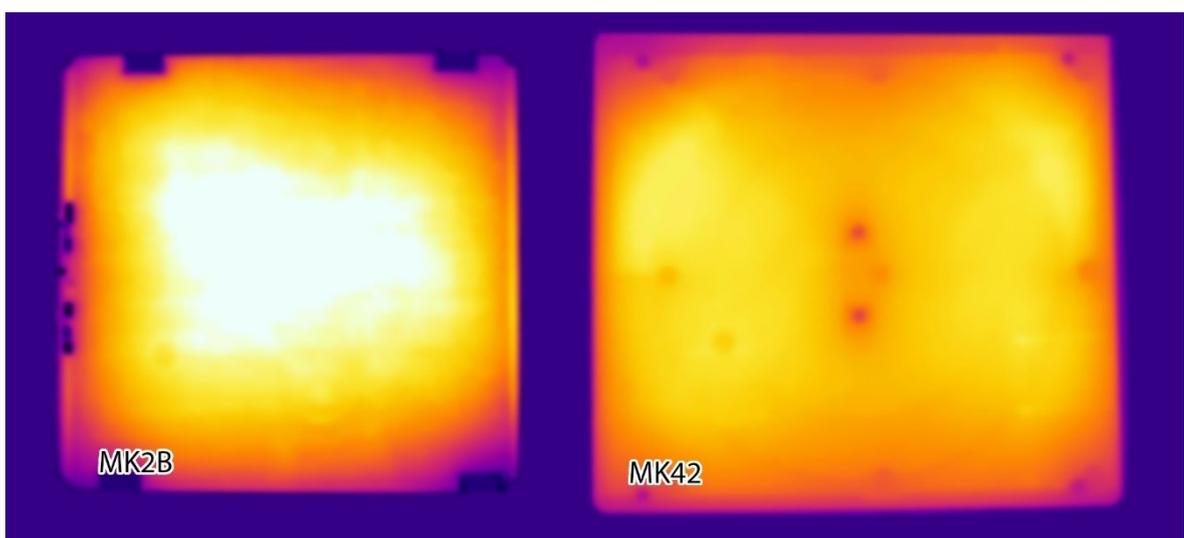
Výhody skla

- Kvalita tisku je především o tolerancích, tolerance a přesnost jsou klíčové. Když 3D tiskárna nanáší první vrstvu filament je dobré, když je vzdálenost mezi extruderem a tiskovou deskou stejná po celé ploše tisku. Jen rovná plocha zajistí nedeformovaný tisk a dobrou přilnavost celé tištěné vrstvy.
- Skleněná deska je plochá, tvrdá a tuhá. Velkou výhodou skla je, že se snadno čistí. V případě potřeby je možné použít prakticky jakékoliv rozpouštědlo.

- Skleněná deska dává výtiskům hladký a lesklý povrch v místech styku.
- Cena skleněných desek je nízká a jsou snadno dostupné.



Obrázek 47 Ukázka hliníkové vyhřívací desky s topením z odporového drátu, který je zalitý v silikonu (Zdroj: IndiaAMRT)



Obrázek 48 Srovnání snímků z termokamery vyhřívaných desek MK2B a MK42 (Zdroj: Hackday.com)

Existuje několik druhů skla, jako nejlepší se ukázalo borosilikátové sklo, které má výbornou odolnost proti tepelným šokům i chemickým látkám. Jako podložka se také často používalo zrcadlo, tzn. sklo pokryté kovovou vrstvou.

Sklo má ale i svoje nevýhody. Je těžké, může se rozbít a přilnavost není moc dobrá bez další přilnavé vrstvy. Přesto je mnohem lepší než třeba hliníková deska, která prostě nikdy nebude tak rovná, jako sklo. Srovnání různých druhů podložek je uvedeno v tabulce 1.

Postupně se objevilo hned několik způsobů, jak zajistit přilnavost na skleněné podložky.



Obrázek 49 Skleněná deska se dodnes používá třeba u tiskáren Ultimaker, vyhřívaná plocha je tvořena hliníkovou deskou (Zdroj: Ultimaker)

Tabulka 1 Srovnání různých tiskových podložek

Podložka	Tepelné vlastnosti	Přilnavost	Deformace	Cena
Hliníková podložka	Drží teplotu, skvělá distribuce tepla	Obvykle vyžaduje lepidlo nebo jinou přilnavou vrstvu	Deformuje se teplem a tlakem	200-600 Kč
Skleněná podložka	Drží teplotu, skvělá distribuce tepla, déle se nahřívá	Lepší než hliník, ale obvykle vyžaduje také lepidlo nebo jinou přilnavou vrstvu	Nedeformuje a neroztahuje se	100-500 Kč

Magnetická podložka	Hůř drží teplotu	Velká přilnavost, Nevyžaduje lepidlo, přilnavá vrstva součástí	Deformuje se, je nutná pevnější vyhřívaná deska s dostatečně silnými magnety	1000- 2000 Kč
---------------------	------------------	--	---	---------------------

3.1.1 Zajištění přilnavosti výtisku

Existuje několik způsobů, jak zajistit, aby výtisky pěkně přilnuly k podložce. Nemusí se jednat jen o skleněnou podložku, ale tyto způsoby lze použít u jakékoliv podložky.

Teplo

Vyhřívání podložky je klíčem k tisku na sklo. I když je možné použít skleněné podložky na nevyhřívané tiskárně, málo kdy výtisk přímo na skle dobře drží.

Lak na vlasy

Lak na vlasy je osvědčená metoda pro dosažení dobré přilnavosti. Jednoduše se nastříká tenká vrstva rovnoměrně na celou podložku. Lak je ve spreji, takže je to jednoduché. Doporučuje se stříkat lak mimo tiskárnu, aby se nedostával do mechanických součástí tiskárny. Po nastříkání je dobré nechat lak zaschnout.

Lepidlo



Obrázek 50 Nanesení tenké vrstvy tyčinkového PVA lepidla na skleněnou podložku
(Zdroj: Ultimaker)

Jedním z nejpoužívanějších způsobů, jak zajistit dostatečnou adhezi výtisku na podložce, je potřetí skla tyčinkovým PVA lepidlem (obrázek 50), které lze koupit v každém papírnictví.

Papírová malířská páska

Tisk na papírovou pásku je už spíš historie, ale stále to funguje. Dnes se spíš používá tam, kde je potřeba výtisk z nějakého důvodu separovat od podložky. Cena pásky je nízká a manipulace s ní je jednoduchá. Horší je to s kvalitou povrchu a životnost je většinou pouze na jeden výtisk. Pak se musí páska na desce vyměnit.

Kaptonová páska

Kaptonová páska se používá jako elektroizolační materiál, ale ukázalo se, že velice dobře funguje jako adhezivní vrstva pro 3D tisk. Po zahřátí polyimidová fólie dobře přilne k ABS plastu a lze ji použít k prevenci nebo snížení deformace. Pásku je poměrně obtížné dobře nalepit na povrch. V minulosti jsem tuto pásku používal a její správné nalepení na sklo opravdu nebylo jednoduché. Aby kapton fungoval, je potřeba mít dobře nastavenou výšku trysky nad podložkou v celé ploše tisku.

ABS juice

Tato pomůcka je popsána už v kapitole 2.1. Dnes už se používá vzhledem k zápachu acetonu a relativně obtížné manipulaci minimálně.

Želatina

Historicky se používalo nanášení tenké vrstvy želatiny. Tento způsob jsem nikdy nezkoušel, a nemám dostatek informací k tomu, jak dobře fungoval. Dnes už postrádá smysl, jsou jednodušší způsoby.

PEI

Obvykle se PEI vrstva aplikuje jako samolepící fólie. V tom je velice podobná kaptonu. Je také možné nanášet PEI na povrch stejným způsobem, jakým se nanáší práškové barvy, tzn. elektrostatické nanesení prášku a zapečení v peci.

PEI je tiskový povrch, který se běžně používá. Tento povrch je známý svou vysokou přilnavostí a výsledkem je dobrá kvalita povrchu tisku. PEI lze také brousit, když časem začne ztrácet přilnavost a znovu ji tak povrchu vrátit. Existují i komerční produkty ke zvýšení přilnavosti, např. Oseq Sheet Conditioner (obrázek 51).



Obrázek 51 Kondicionér pro PEI povrchy od firmy OSEQ (Zdroj: OSEQ)

Další samolepicí fólie

Například BuildTak a GeckoTek vyrábí podobné samolepicí fólie, které lze aplikovat na povrch tiskové plochy. Výhody a nevýhody jsou podobné jako u PEI.

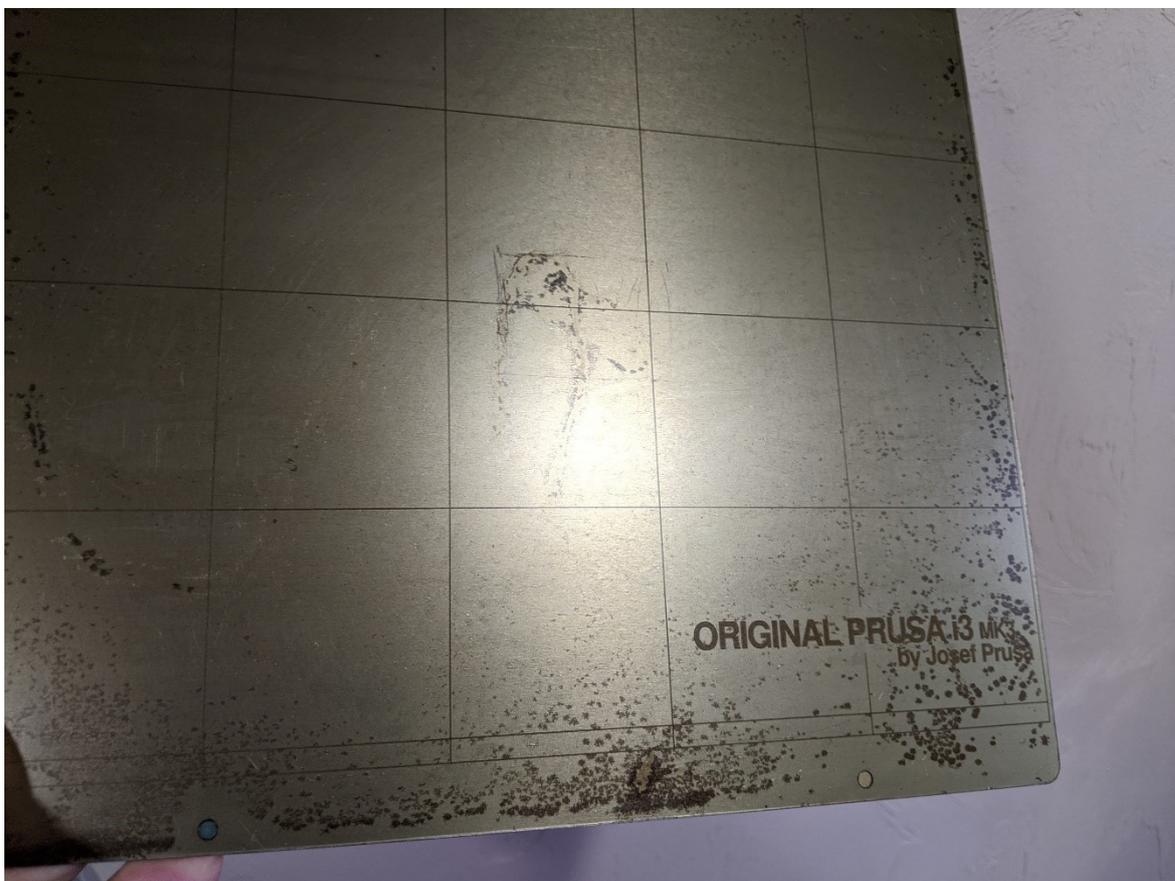
3.2 Adhezní materiál přímo na vyhřívané podložce

Poté co tiskaři objevili PEI fólii, začali ji lepit přímo na vyhřívanou podložku. Problémem bylo poškozování povrchu při sundávání vytištěných modelů. Fólie má sklon k promáčknutí, poškrábání nebo se dokonce vytrhává v místě poškození. Odstranění staré fólie a nalepení nové není vůbec jednoduché.

3.3 Pružné podložky

Pružné podložky rychle dobývají trh. Jejich největší výhodou je to, že je lze prohnout, a tak snadněji oddělit výrobek od podložky. Jde o plechové desky z obou stran potažené PEI nebo jiným podobným materiálem. Protože se jedná o ocelové plechy, lze je snadno přichytit

k podložce pomocí magnetů. Některé vyhřívané podložky s tím počítají a už obsahují magnety, na jiné je nutné nalepit magnetickou fólii.



Obrázek 52 Koroze u plechových podložek s nalepenou vrstvou PEI od firmy Prusa Research (zdroj: Prusa Research)

Asi největší nevýhodou pružných podložek je jejich relativně vysoká cena daná způsobem výroby a to, že mezi PEI vrstvou a plechem může docházet ke korozi (objevuje se tam rez), která zhoršuje jak adhezi mezi PEI povrchem a plechem, tak vzhled podložky.

3.4 Výroba vlastní podložky

Vzhledem k tomu, že výroba podložky je poměrně obtížná a tím i nákladná, na základě rady vedoucího této diplomové práce doc. Ing. Tomáše Sedláčka, Ph.D., jsem se rozhodl pustit do vývoje tiskové podložky, která by mohla být vyráběná na vstřikovacím stroji. Tím by mohlo dojít ke značné úspoře lidské práce a k potenciálnímu snížení ceny takto vyrobené podložky.

Cílem experimentu bylo vytvoření podložky, která bude vyrobená pomocí vstřikovacího stroje. Vyrobená bude z termoplastického polymeru a kovového plniva s magnetickými vlastnostmi.



Obrázek 53 Laboratorní měřicí hnětič Brabender® Plastograph®

Nejprve bylo nutné najít vhodný polymerní materiál. Vzhledem k vysoké teplotě při zpracování PEI jsem po poradě s vedoucím práce zvolil materiál, se kterým lze pracovat při nižších teplotách.

Nakonec jsem vybral Crastin® PBT S600F10 NC od firmy Dupont. Tento materiál se pro testy ukázal jako dostatečný a nebylo nutné jej měnit. Jako plnivo se mi povedlo získat 3 různé kovové prášky. Prášky jsem označil na základě informace na balení jako MQP, AFSC a M33.

Na rozdíl od polymeru nebyla ke kovovým práškům příliš dobrá dokumentace. Proto jsem vytvořil sadu vzorků a otestoval jejich vlastnosti.

Na měřicím hnětiči Brabender® Plastograph® (obrázek 53) jsem vytvořil celkem 15 materiálů. Hnětič má temperovanou hnětací komůrku umožňující na jednou zamíchání materiálů o celkovém objemu cca 50 cm³. Toto množství by mělo na zamýšlené testy stačit.

Namíchal jsem jednu dávku pro každý materiál (obrázek 54). Zvolil jsem plnění v objemovém poměru prášku 5 %, 10 %, 20 % 30 % a 40 % pro každý ze 3 prášků. Před přípravou vzorků jsem materiál PBT sušil asi 4 h na 100°C.

Z 15 připravených směsí polymeru a prášku jsem následně na ručním vyhřívaném lisu připravil vzorky ve formě destiček o rozměrech 100x100x1 mm. Navíc jsem pro srovnání připravil stejnou destičku z čistého materiálu PBT.



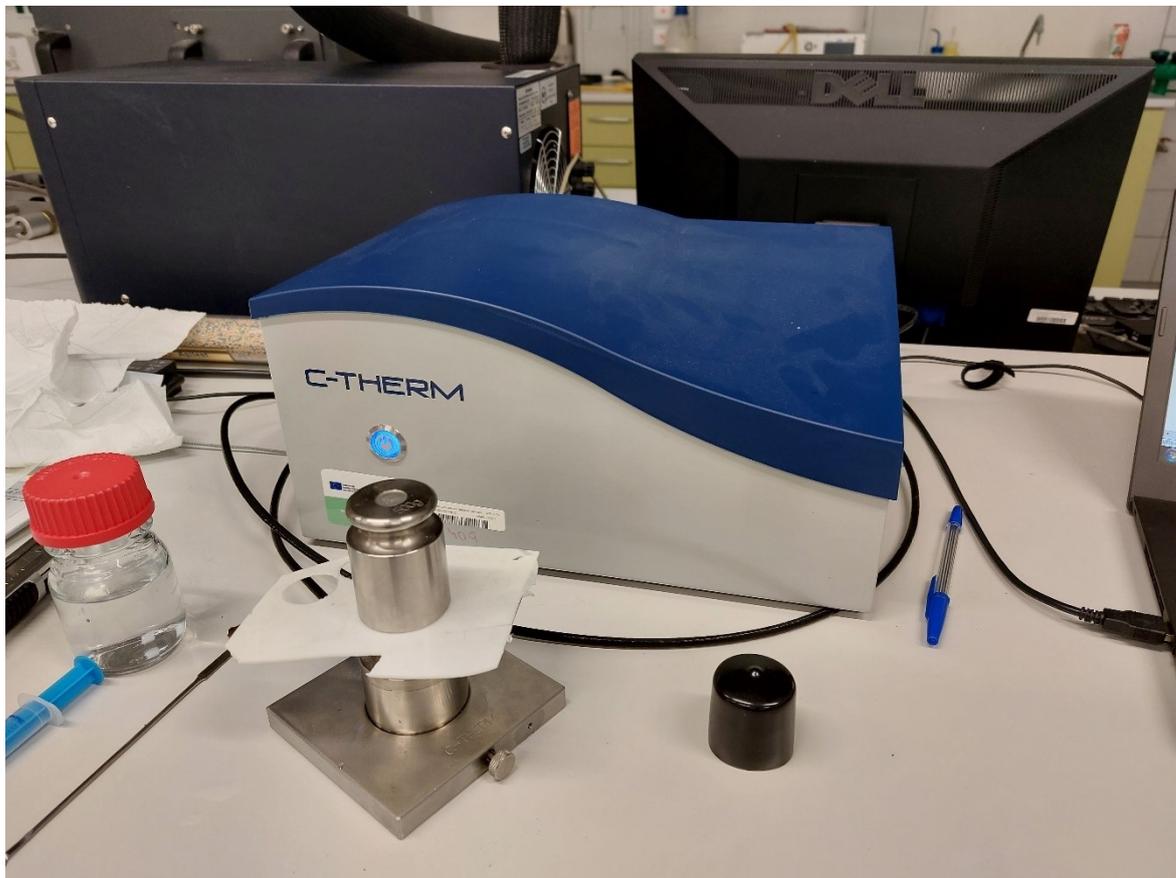
Obrázek 54 Ruční vyhřívaný a chlazený lis na přípravu vzorků

Kovové desky, mezi kterými jsem vzorky lisoval jsem separoval hliníkovou fólií a tu následně separátorem na formy pro vstřikovací stroje Lusin Alro OL 151 od německé společnosti Chem Trend GmbH. Bez separátoru nebylo možné hliníkovou fólii oddělit od lisované destičky.

Následně jsem pomocí hydraulického lisu a pákových nůžek připravil potřebné vzorky pro testy.

3.5 Tepelná vodivost

Existuje několik metod, jak tepelnou vodivost měřit. Já jsem měření prováděl pomocí analyzátoru tepelné vodivosti C-Therm technologies, model TCi (obrázek 55). Toto měření je založeno na metodě Modified Transient Plane Source (MTPS).

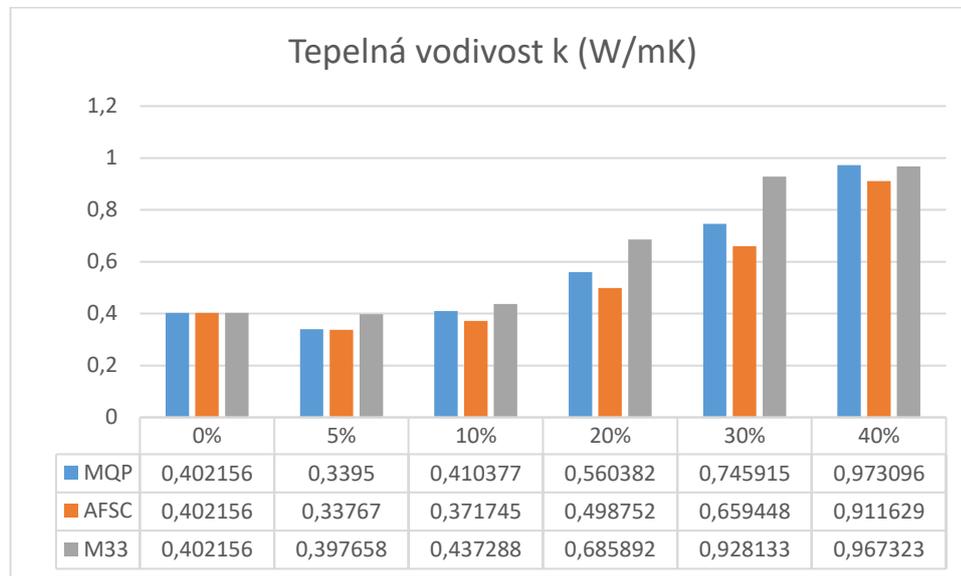


Obrázek 55 Měření tepelné vodivosti, v tomto případě čistého PBT materiálu bez aditiv

Tato metoda spočívá v přiložení vzorku na měřící senzor a jeho zatížení. Ještě před tím se musí mezi vzorek a senzor nanést médium přenášející teplotu. V mém případě se jednalo o vodu.

Měření se provádí na snímači, které je z výroby kalibrován pro nárůst teploty na rozhraní mezi snímačem a vzorkem. Pomocí určitého množství elektrické energie (proudu) po stanovenou dobu dojde k zahřátí. Následek zvýšení teploty na rozhraní mezi senzorem a vzorkem se změní napětí. Rychlost nárůstu napětí senzoru se používá ke stanovení tepelných vlastností vzorku.

Při měření jsem vzorek posouval tak, abych provedl měření na víc místech vzorku a eliminoval tak možnou nehomogenitu směsi. Naměřené hodnoty a jejich průměry jsou v příloze P I.



Obrázek 56 Graf průměrů měření tepelné vodivosti pro různé množství plniva (množství plniva v materiálu je uvedeno v % objemově)

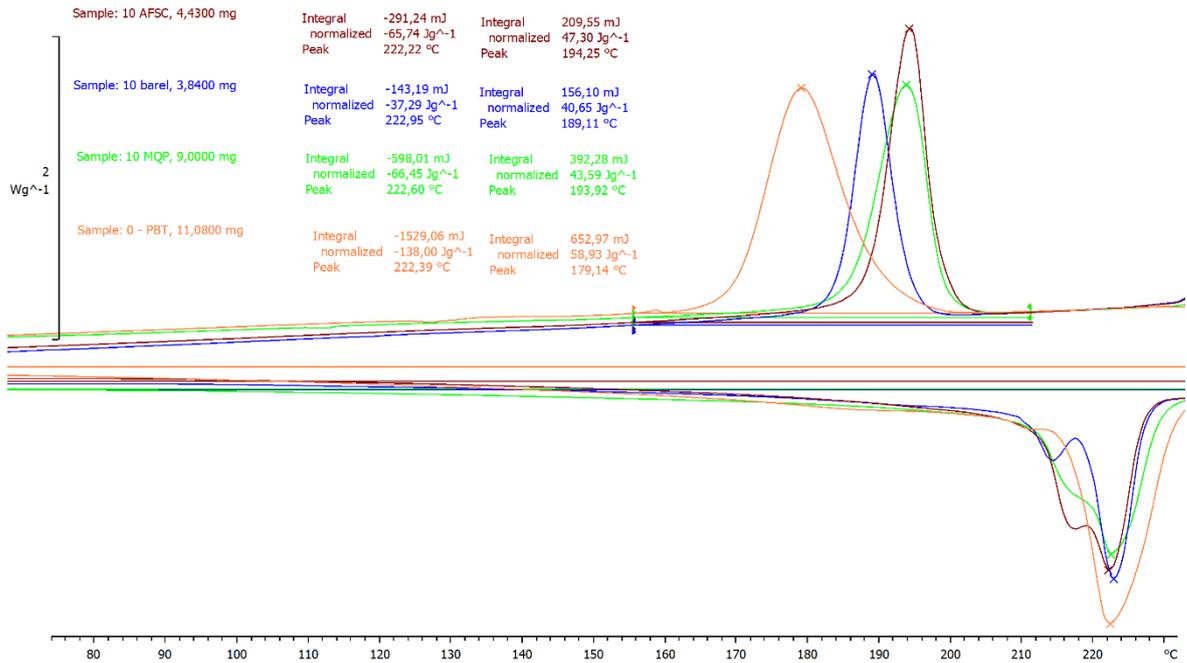
Z grafu na obrázku 56 je vidět, že čistý MQP má lepší tepelnou vodivost než plněné materiály při plnění 5 %. Tepelná vodivost při 10 % je velmi podobná neplněnému materiálu. S dalším přidáním plniva tepelná vodivost narůstá. Nejlépe při 40% plnění vede teplo materiál s plnivem MQP a nejhůře AFSC. Rozdíl ale není velký a ve všech případech je hodnota u 40 % plnění víc než dvojnásobná oproti neplněnému materiálu.

Z uvedeného grafu vyplývá, že při malých plněních materiály vedou teplo hůř než čistý materiál, zatímco při vyšším plnění začínají teplo vést.

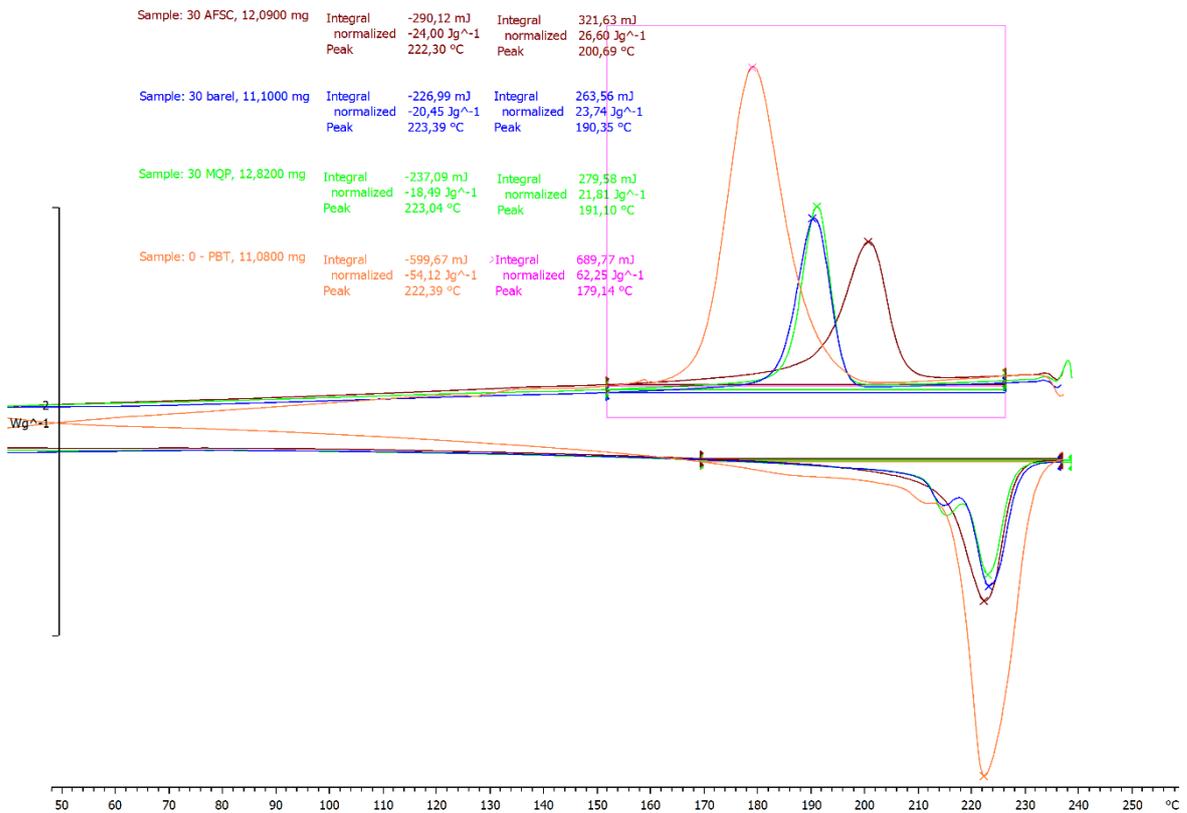
Z pohledu rychlosti zahřátí budoucí tiskové podložky je tak vhodné použít spíš materiál s vyšším stupněm plnění, aby se podložka dřív zahřála a nedocházelo k dlouhému zahřívání.

3.6 DSC (Differential Scanning Calorimetry)

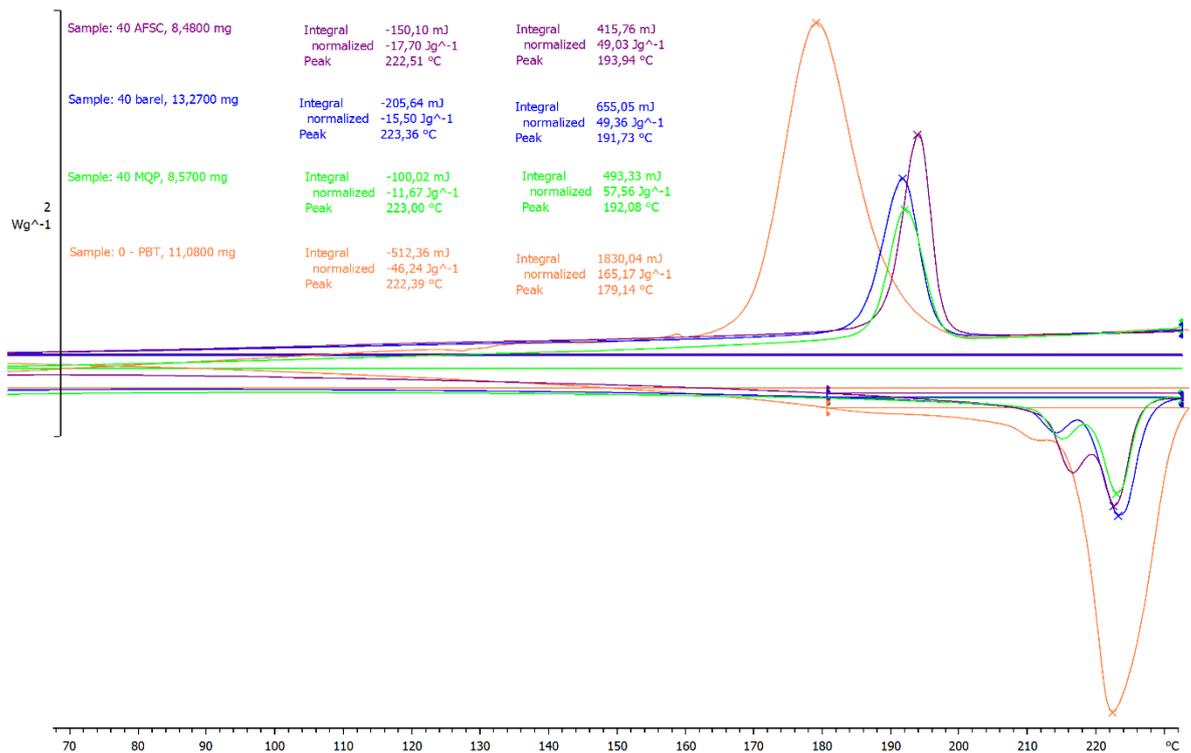
Diferenciální skenovací kalorimetrie (DSC) je analytický nástroj, který zjišťuje chování a degradaci polymerů při vystavení různým teplotám. Pomocí DSC analýzy je možné určit nejlepší zpracovatelské teploty pro vstřikování. Porovnáním výsledků u jednotlivých vzorků můžeme posoudit vliv plniv na chování materiálu.



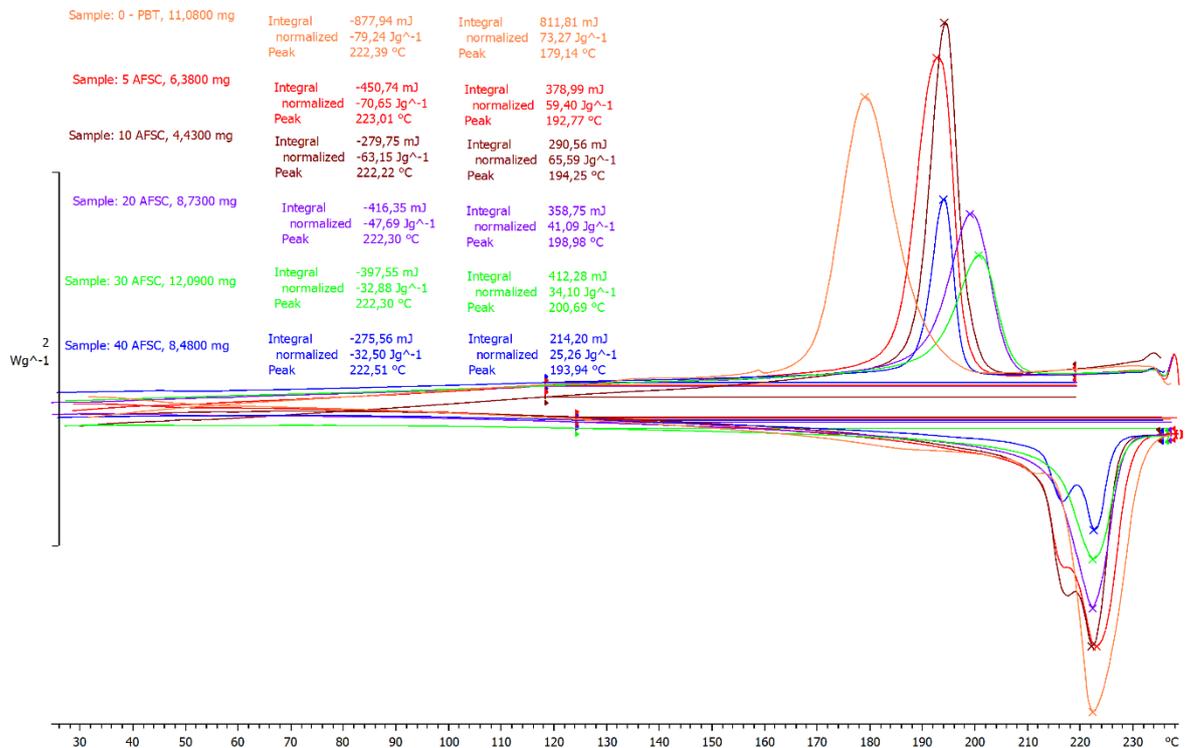
Obrázek 57 Graf porovnávací chování materiálu na DSC při 10 % plnění (materiál označený jako barel je M33)



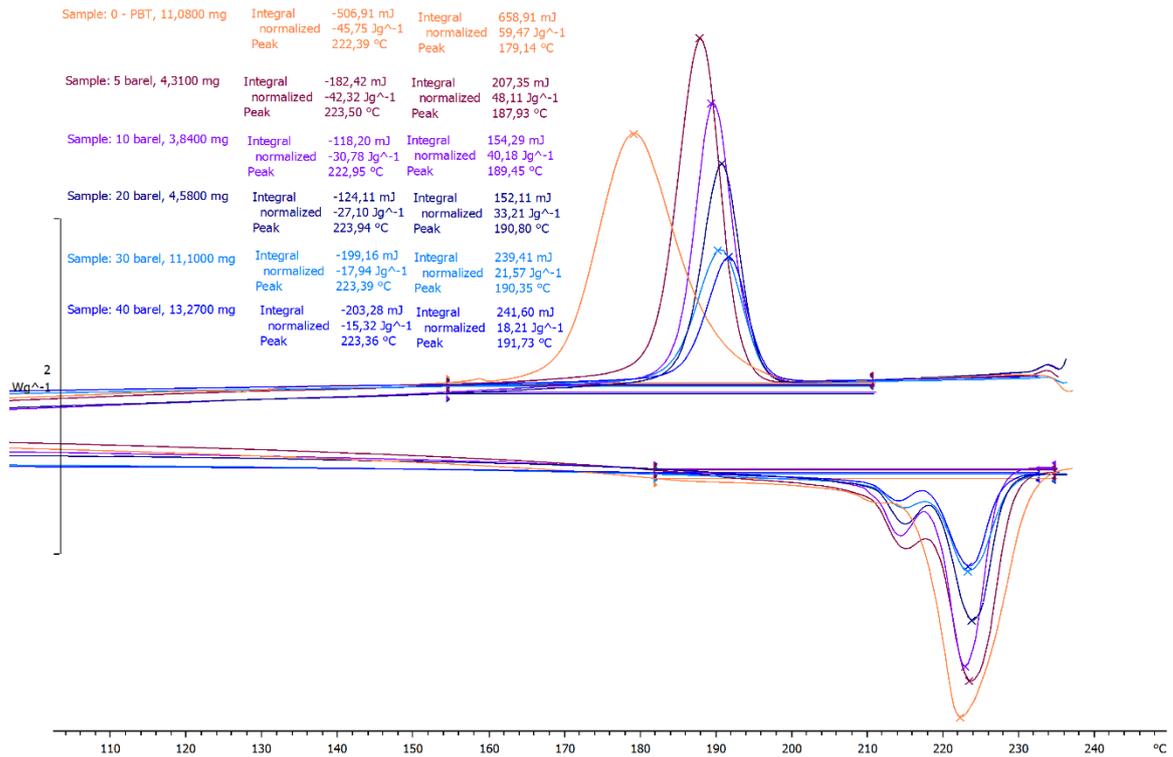
Obrázek 58 Graf porovnávací chování materiálu na DSC při 30 % plnění (materiál označený jako barel je M33)



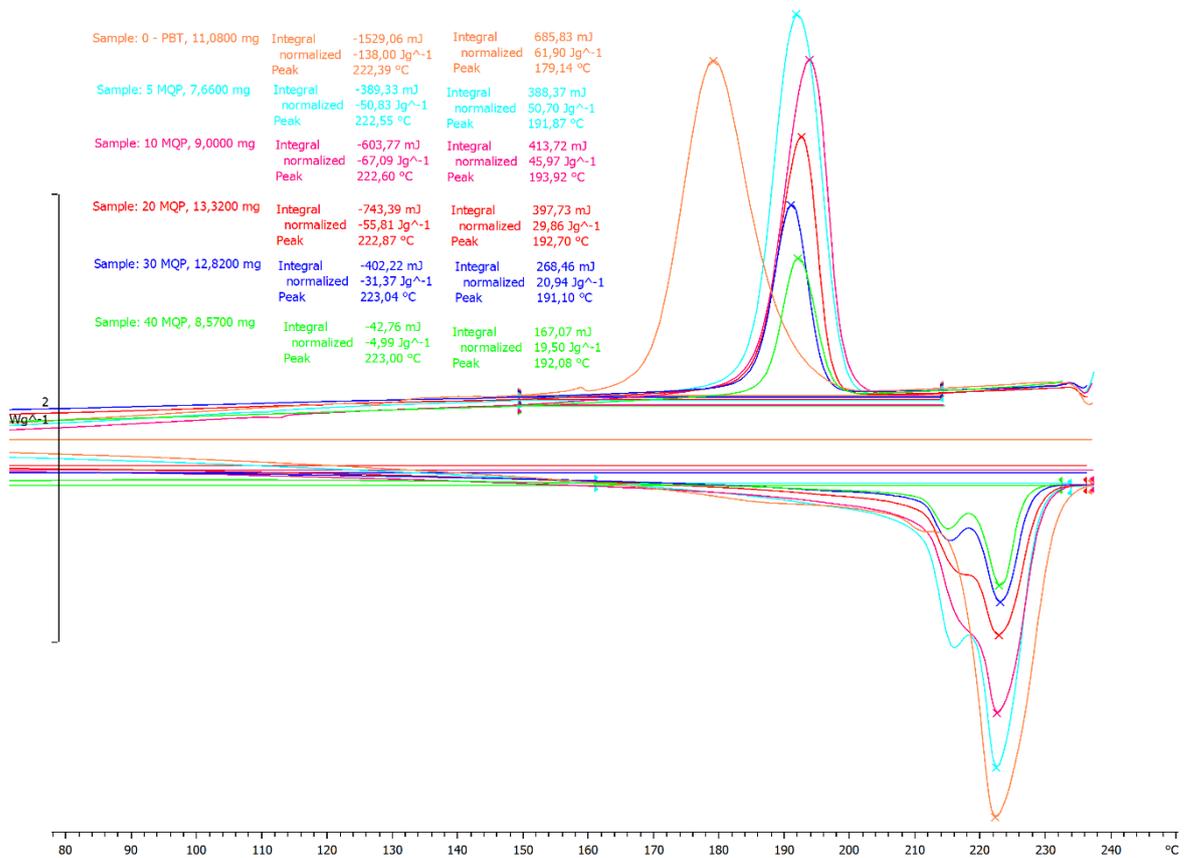
Obrázek 59 Graf porovnávací chování materiálu na DSC při 40 % plnění (materiál označený jako barel je M33)



Obrázek 60 Graf porovnávací chování materiálu AFSC při různém plnění na DSC



Obrázek 61 Graf porovnávací chování materiálu M33 (označen jako barel) při různém plnění na DSC



Obrázek 62 Graf porovnávací chování materiálu MQP při různém plnění na DSC

Na obrázku 57 je graf z měření na DSC pro materiály plněné 5 %. Pro srovnání je uveden také graf neplněného PBT. Horní křivky ukazují chování vzorků při chladnutí, spodní pak při zahřívání. Na obrázcích 58 až 60 je pak chování pro ostatní plnění 10 %, 30 % a 40 %. Na obrázcích 61-63 je srovná různých plnění pro jednotlivé materiály.

Z grafů je vidět, že materiál obsahující aditiva v podobě plniců krystalizuje při vyšší teplotě než materiál bez aditiv. Mělo by platit, že čím víc aditiva materiál obsahuje, tím víc je v něm zárodků pro inicializaci krystalizace a ta tak proběhne při vyšší teplotě. U materiálu M33 tomu tak je, u ostatních ne, ale teplota krystalizace je i tak velice podobná. Může to být způsobeno třeba různou degradací materiálu při předchozím zpracování.

Na křivkách ukazujících tání jsou často dva píky. Nejprve jeden menší a pak druhý větší. To by opět mohlo znamenat, že došlo k částečné degradaci materiálu. Tento degradovaný materiál pak taje dřív (menší pík) než PBT. Velikost menšího píku je asi poloviční proti hlavnímu píku. Teplota tání degradovaného materiálu je asi o 5 °C nižší. Materiál bez aditiv tento pík nemá.

3.7 Měření průhybu

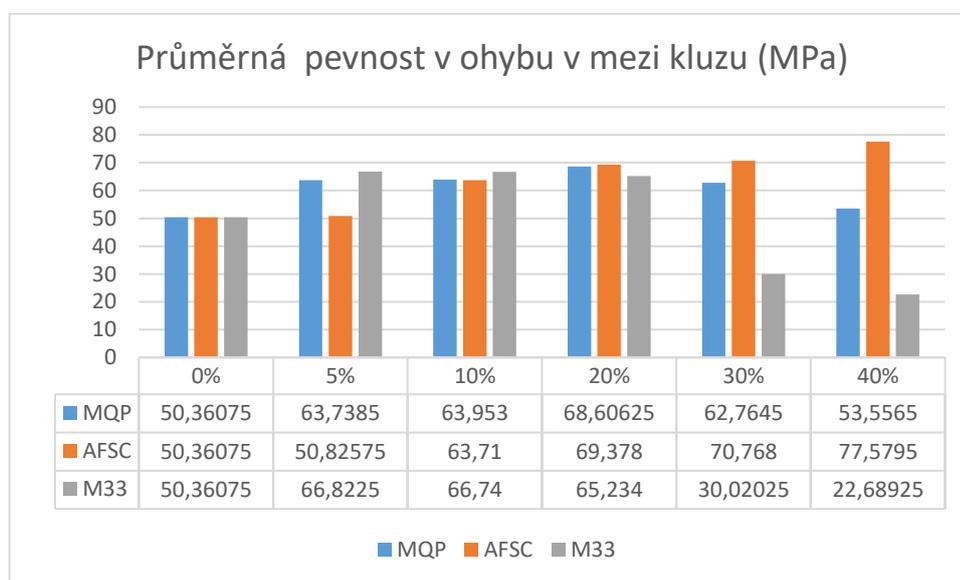


Obrázek 63 Měření průhybu

Měření průhybu probíhalo na univerzálním zkušebním stroji Testometric MT350-5CT pro testování mechanického chování (obrázek 64). Naměřené hodnoty jsou v příloze P II.

Vzorek ve formě pásku byl vložen mezi 3 body stroje. U každého materiálu se testovaly 4 vzorky. Graf na obrázku 65 ukazuje průměrné hodnoty pro každý materiál. Je zajímavé, že zatímco pro materiál plněný plnivem M33 s množstvím plniva hodnota klesala (velmi snadno se při ohybu lámal) u materiálu, který obsahoval plnivo AFSC naopak rostla.

Pro magnetickou podložku, která se má dát snadno prohnout je tak nejvhodnější plnivo AFSC.



Obrázek 64 Pevnost ohybu v mezi kluzu (MPa), průměr ze 4 vzorků

3.8 Měření reologických vlastností materiálů

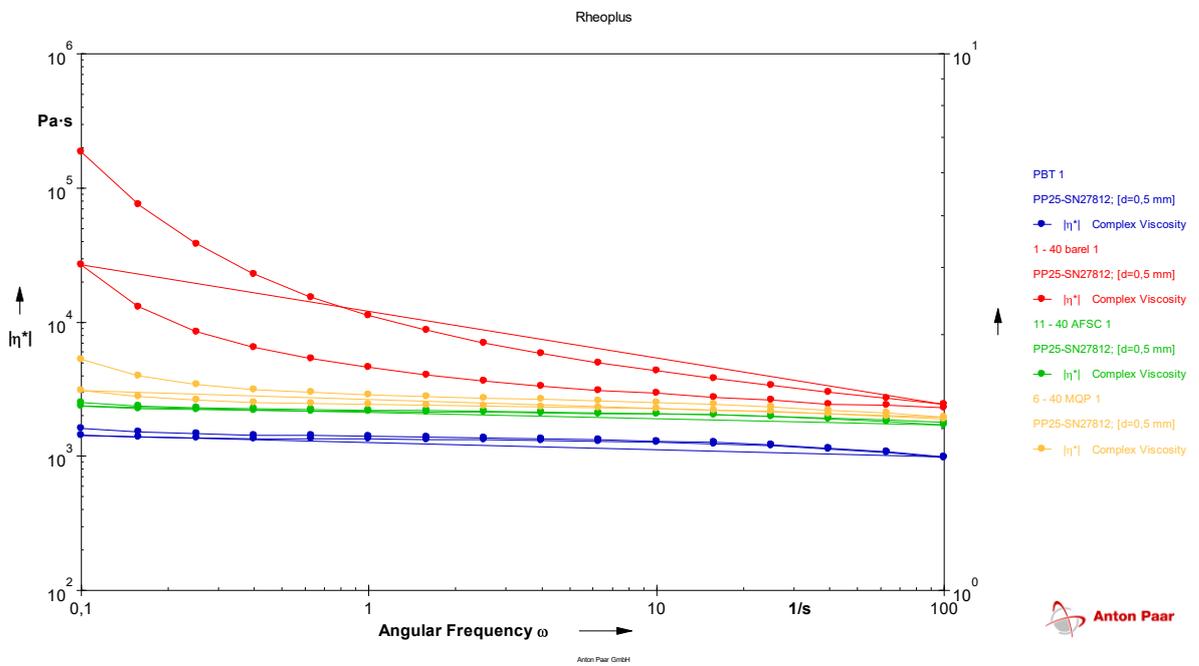
Měření probíhalo na rotačním viskozimetru Anton-Paar MCR 502 (obrázek 66). Grafy z měření jsou v příloze P III této práce. Na obrázku 67 je porovnání chování materiálů s plněním 40 % spolu s čistou polymerní matricí. Materiály MQP a AFSC vykazují víceméně Newtonovské chování. Materiál M33, označený v grafu jako barel se tak nechová. M33 evidentně zvyšuje smykovou viskozitu při nízkých smykových rychlostech, nejspíše ve spojitosti s iniciací síťování. Podle složení obsahuje zinek a ten by zde mohl působit jako síťovací činidlo. Takové chování popisují třeba Adrien Demongeot, Ramon Groote, Han Goossens, Theo Hoeks, François Tournilhac a Ludwik Leibler v [22].

Materiál MQP má sice také tendenci mírně zvyšovat hodnoty smykové viskozity při nižších frekvencích, ale to může být způsobeno mírnou chemickou reakcí polymerních materiálů při

styku s povrchem plniče, případně přítomností zbytkové vlhkosti. Nicméně síťování je oproti M33 velice mírné.



Obrázek 65 Měření na rotačním viskozimetru Anton-Paar MCR 502



Obrázek 66 Chování materiálů s plněním 40 % na rotačním viskozimetru Anton-Paar MCR

Materiál MQP má sice taky tendenci k vyšším hodnotám při nižších frekvencích, ale to může být způsobeno třeba mírnou degradací materiálu při styku s povrchem plniva. Případně přítomností vlhkosti. Ale síťování je velice mírné oproti M33.

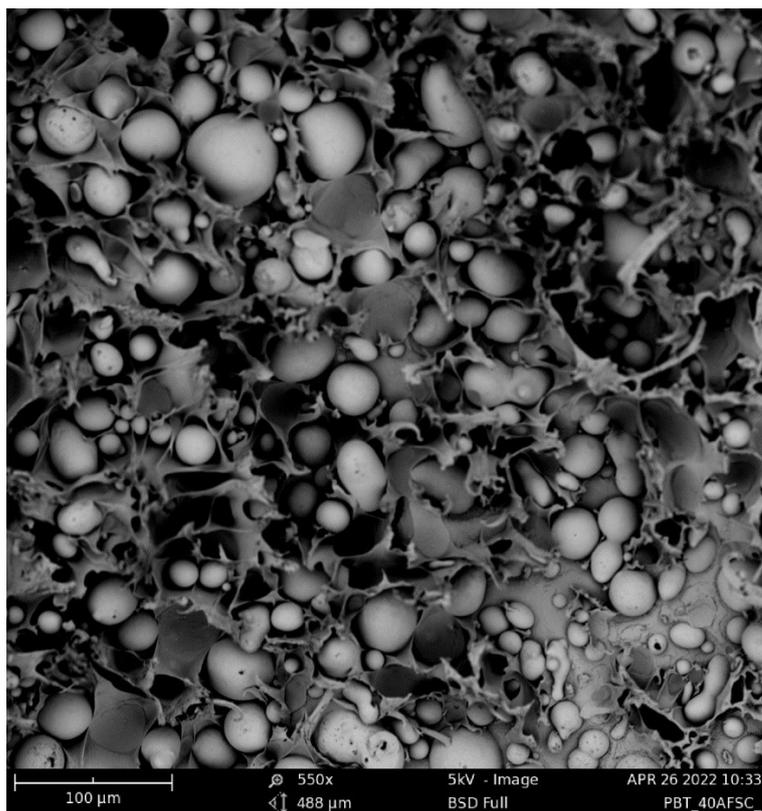
3.9 Elektronový mikroskop

Abych získal lepší představu, jak je plnivo distribuováno uvnitř plněného materiálu, nechal jsem udělat snímky na elektronovém všech 3 materiálu s plněním 40 % na elektronovém mikroskopu. Snímky z elektronového mikroskopu jsem původně neměl v plánu, ale vzhledem k zajímavým reologickým vlastnostem materiálu, který je plněn plnivem M33, jsem nechal udělat snímky všech 3 typů materiálu s plněním 40 %. Ze snímků je patrné, že struktura je u materiálu, který je plněný 40 % M33, úplně jiná, než u zbývajících materiálu (obrázky 68-69).

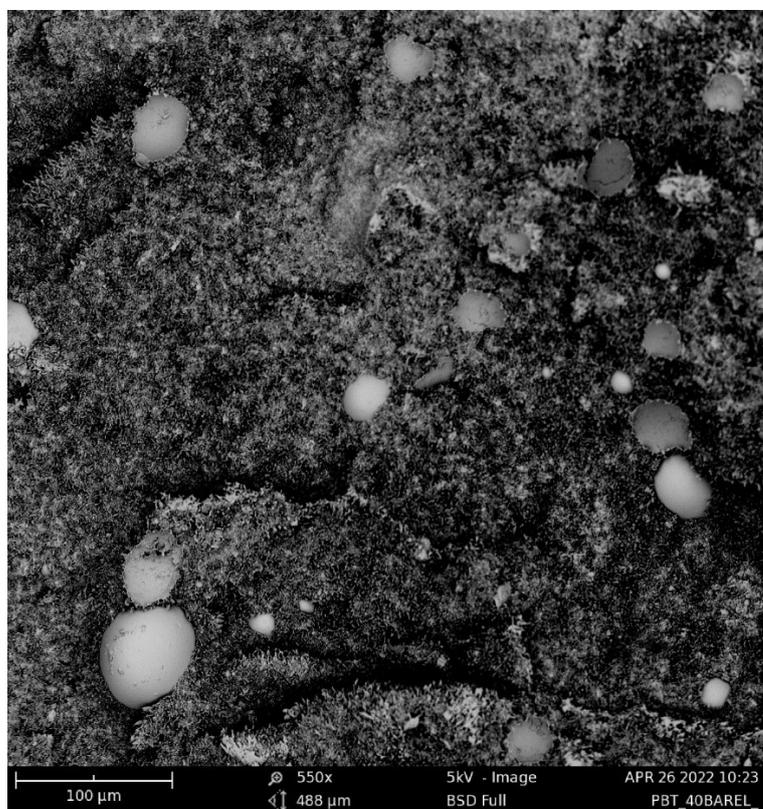
Na obrázku 68 a 69 je v podstatě stejná struktura. Plnivo je menší u AFSC než u MQP, ale v obou případech se jedná o tvar koule. Polymer má stejnou strukturu. Na obrázku 70 je vidět, že struktura polymeru je při stejném zvětšení úplně jiná. To potvrzuje předchozí domněnku, že došlo k zasíťování a změně struktury polymeru PBT.



Obrázek 67 Materiál PBT + 40% MQP při zvětšení 550x



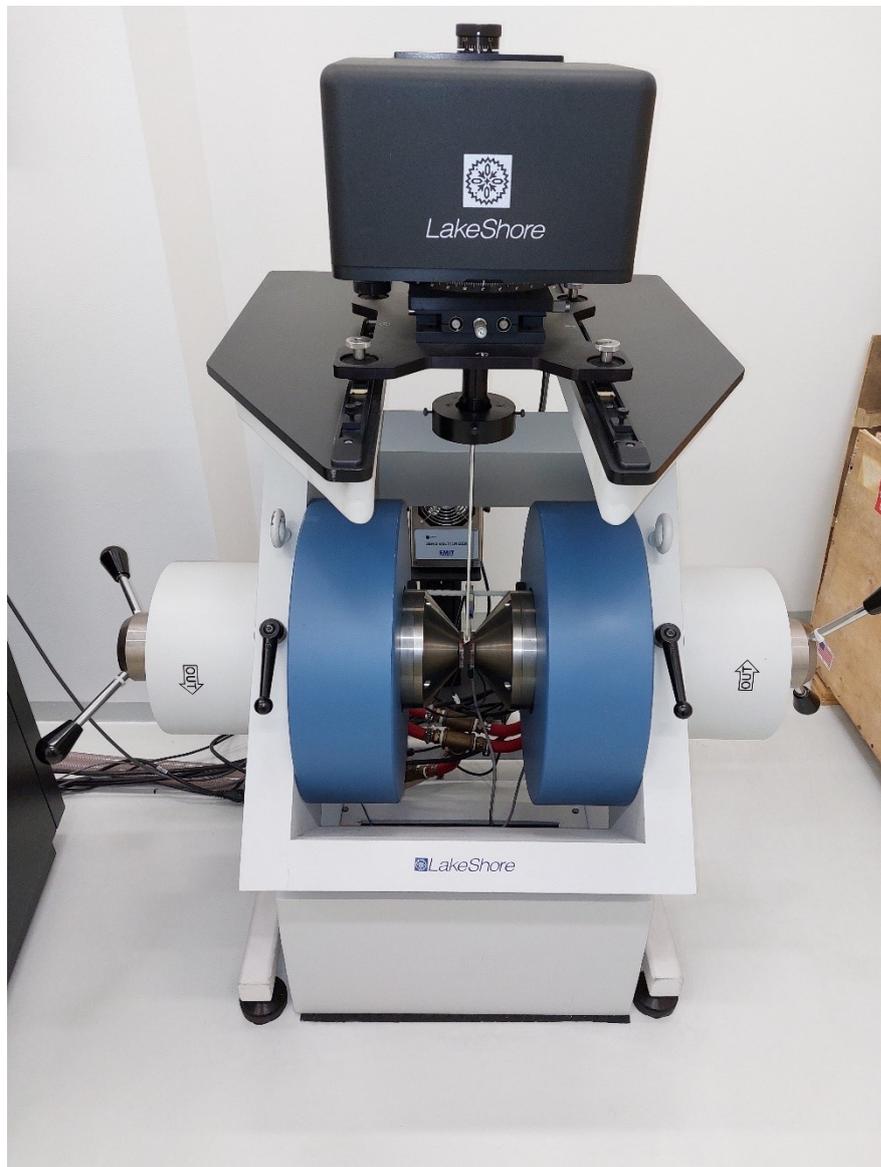
Obrázek 68 Materiál PBT + 40% AFSC při zvětšení 550x



Obrázek 69 Materiál PBT + 40% M33 při zvětšení 550x

3.10 Magnetické vlastnosti

Měření magnetických vlastností jsem prováděl na vibračním magnetometru VSM 7407, který umožňuje měřit magnetizační křivku vzorků v rozsahu intenzity magnetického pole – 10 kOe až +10 kOe (obrázek 71). Grafy z naměřených hodnot jsou v příloze P IV.



Obrázek 70 Magnetometr VSM 7407

Existují dvě skupiny ferromagnetických látek - magneticky měkké a magneticky tvrdé, podle toho, jakým způsobem ztrácejí nebo naopak udržují své magnetické vlastnosti. Pro výrobu magnetů se používají magneticky tvrdé látky. Pro účel tiskové podložky bude stačit magneticky měkká látka.

Magneticky měkká látka

Magneticky měkká látka je látka z feromagnetického materiálu, který se vyznačuje tím, že po zmagnetizování (magnetizaci) a vyjmutí z vnějšího magnetického pole ztrácí své magnetické vlastnosti.

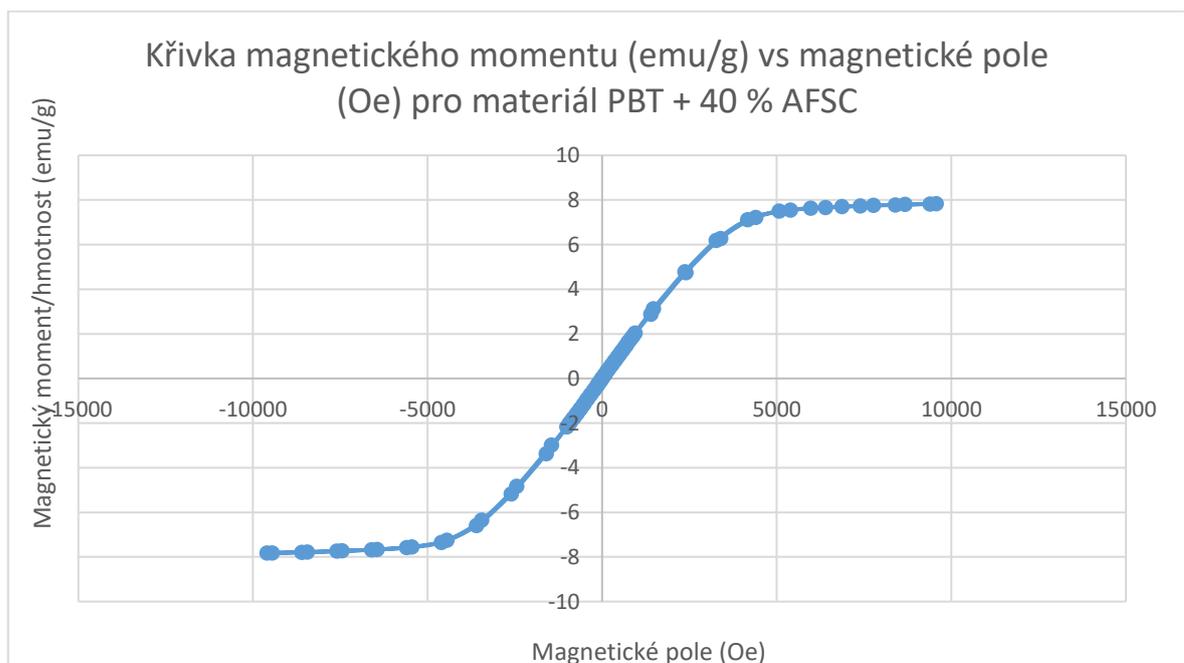
Magneticky měkkým materiálem je třeba čisté železo a nízkouhlikové oceli. [24]

Magneticky tvrdá látka

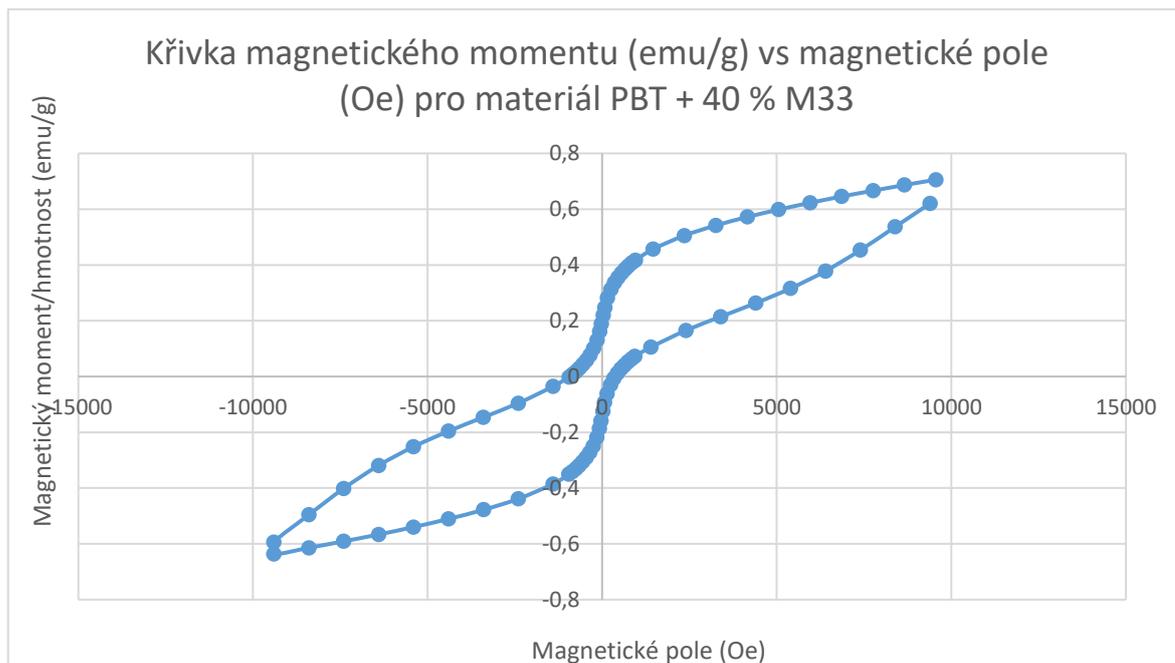
Magneticky tvrdá látka je látka z feromagnetického materiálu, který se vyznačuje tím, že po zmagnetizování si udržuje své magnetické vlastnosti dlouhou dobu po vyjmutí z vnějšího magnetického pole magnetu.

Magneticky tvrdým materiálem jsou například permanentní magnety (Sm – samarium, Nd – neodym). [24]

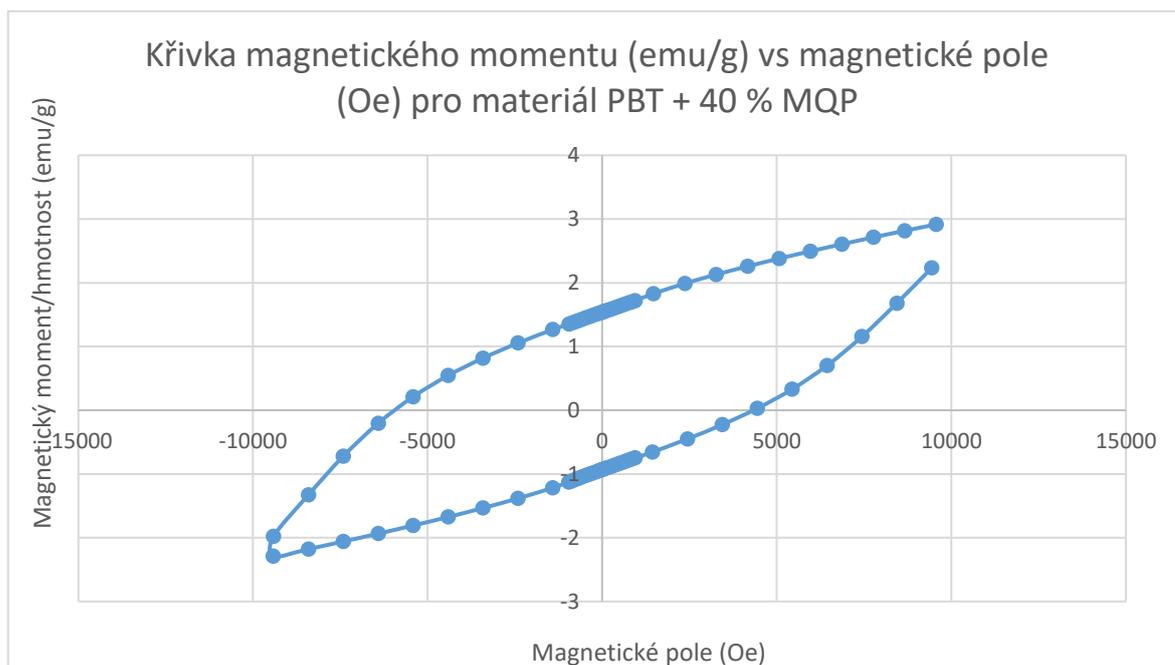
Z měření vyplívá, že se zvyšováním podílu aditiva se zlepšují magnetické vlastnosti materiálů. Porovnáním grafů hysterezních smyček na obrázcích 72-74 zjistíme, že materiál AFSC je magneticky měkký a má zároveň nejlepší vlastnosti pro podložku pro 3D tisk. Materiál M33 vykazuje velmi slabé magnetické vlastnosti a jeho smyčka na grafu je perminvarová. Materiál MQP je magneticky tvrdá látka, tzn. zmagnetováním z tohoto materiálu lze vyrobit permanentní magnet.



Obrázek 71 Magnetické vlastnosti materiálu s 40% aditiva AFSC



Obrázek 72 Magnetické vlastnosti materiálu s 40% aditiva M33



Obrázek 73 Magnetické vlastnosti materiálu s 40% aditiva MQP

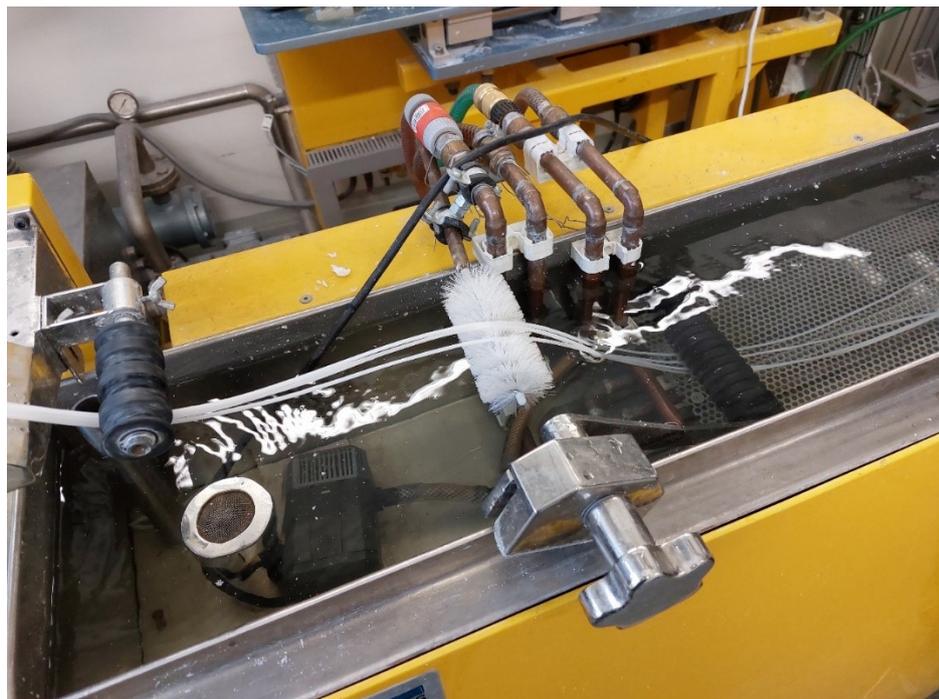
3.11 Výběr vhodného materiálu

Jako vhodný materiál pro výrobu magnetické podložky pro 3D tisk, se jeví materiál vyrobený z PBT v kombinaci s 30-40 % objemovým podílem materiálu AFSC. Proto jsme z tohoto materiálu vylisovali zkušební vzorky. Protože použitý vstřikovací stroj není konstruovaný na míchání prášku. Nejprve jsme na kompaundační lince (obrázek 74 a 75)

vyrobili granulát (PBT + 30% AFSC) a ten následně použili pro vylisování zkušebních destiček na vstřikovací stroj (obrázek 77). Forma je na obrázku 78 a lisované destičky mají rozměr 107x107x2 mm a 170x170x4 mm. Před lisování došlo k důkladnému vysušení granulátu.



Obrázek 74 Kompaundační linka



Obrázek 75 Kompaundační linka



Obrázek 76 Vstřikovací stroj 180MET III-15h

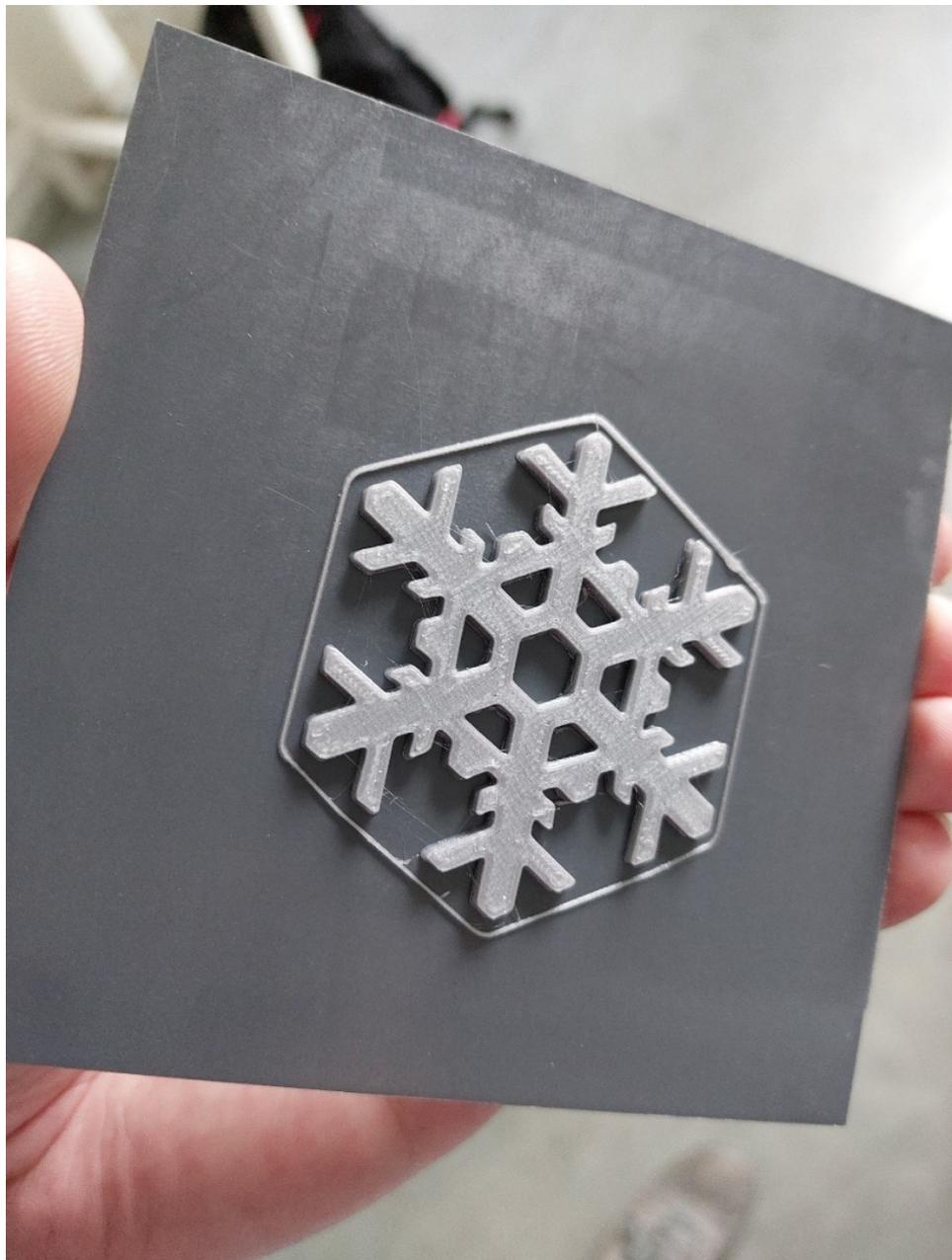


Obrázek 77 Forma pro vstřikovací stroj 180MET III-15h

3.12 Zkušební tisk

Po vylisování zkušebních destiček jsem udělal zkušební tisk. Ukázalo se, že výtisky na podložce drží velice špatně. Problémem mohl být separátor, kterým se separuje forma při vstřikování.

Povrch destičky jsem proto pískoval, abych odstranil separátor. To se povedlo a pískované podložky už neměly problém výtisk udržet. Výtisk se navíc sám odlepoval po ochlazení podložky. Průhyb u podložek by mohl být lepší, toho by se dalo dosáhnout změnou tloušťky podložky ze 2 mm na 1,5 mm nebo méně.



Obrázek 78 Zkušební výtisk na testované podložce

3.13 Měření drsnosti povrchu

U vylisovaných destiček jsem ještě provedl test drsnosti povrchu. Zároveň jsem drsnost povrchu srovnal s povrchy komerčně vyráběných podložek (tabulka 2). Měření jsem prováděl drsnoměrem TR100 (obrázek 80). Mezinárodně používaný parametr drsnosti je definován jako střední aritmetická odchylka, tedy průměrná hodnota z absolutních hodnot v jedné změřené délce, označuje se Ra a měření probíhá v μm .



Obrázek 79 Drsnoměr TS100 při měření komerční podložky firmy Prusa Research

Tabulka 2 Srovnání drsnosti různých tiskových podložek

Podložka	Popis	Drsnost v μm
Prusa PA-11	Podložka s nalepenou fólií	0,5
Prusa WA-11	Podložka s texturovaným povrchem	10
Prusa BH-25	Podložka s texturovaným povrchem	12
Prusa TF-26	Podložka s texturovaným povrchem	10
Oseq	Pískovaná podložka	3
Oseq	Nepískovaná podložka	1,5
Vyrobený vzorek	Pískovaná podložka	6
Vyrobený vzorek	Nepískovaná podložka	0,7



Obrázek 80 Různé povrchy podložek Prusa Research

ZÁVĚR

Cíl práce se podařilo splnit. Mimo relativně rozsáhlé rešerše v teoretické části práce se povedlo realizovat i praktickou část. Cílem praktické části bylo vytvořit podložku pro 3D tisk na 3D tiskárnách. Podložka měla být vyrobena tak, aby byla dostatečně pružná a zároveň držela na magnetické vyhřívané ploše tiskárny.

V laboratorních podmínkách a vzhledem k cenové náročnosti nebylo možné vyrobit formu pro vstřikovací stroj. Využil jsem proto existujících forem pro zkušební výlisky, a i když tyto výlisky nejsou pro 3D tiskárny ideálně (jsou malé), ukázalo se, že jsou naprosto dostatečné pro výrobu zkušebních vzorků a testování.

Testované vzorky podložek splnily očekávání, na magnetických vyhřívaných plochách tiskáren drží a výtisky zase drží na podložkách. Aby tomu tak bylo, je nutné podložky pískovat, aby se odstranil separátor, který na destičkách ulpěl při vstřikování.

Stále se ale jedná jen o vzorky a bylo by potřeba je podrobit mnohem delšímu zkoušení. Je potřeba udělat další testy a měření. Není třeba jasné, jestli nebudou podložky nějak degradovat vzdušnou vlhkostí.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] *The 6 Best RepRap 3D Printers in 2022*. 3dsourced.com [online]. 2021 [cit. 2022-05-08]. Dostupné z: <https://www.3dsourced.com/3d-printers/reprap-3d-printer/>
- [2] *Darwin's first cut*. RepRap: Blog [online]. Velká Británie: RepRap, 2007 [cit. 2022-05-08]. Dostupné z: <http://blog.reprap.org/2007/01/darwins-first-cut.html/>
- [3] REVARBAT. *Snappy*. RepRap [online]. Velká Británie: RepRap [cit. 2022-05-08]. Dostupné z: <https://reprap.org/wiki/Snappy>
- [4] USER:NICHOLAS.SEWARD. *Simpson*. RepRap [online]. Velká Británie: RepRap [cit. 2022-05-08]. Dostupné z: <https://reprap.org/wiki/Simpson>
- [5] *The History of 3D Printing: 3D Printing Technologies from the 80s to Today*. Sculpteo [online]. Sculpteo [cit. 2022-05-08]. Dostupné z: <https://www.sculpteo.com/en/3d-learning-hub/basics-of-3d-printing/the-history-of-3d-printing/>
- [6] *3D tisk: jak funguje FDM/FFF tiskárna?*. Svět hardware [online]. Příbram V-Zdaboř: oXyShop, 2019 [cit. 2022-05-08]. Dostupné z: <https://www.svethardware.cz/3d-tisk-jak-funguje-fdm-fff-tiskarna/48457>
- [7] HLAWICZKA, P. *Rychlá výroba prototypů - klíč k intenzivním aerodynamickým programům v F1 (+ video)*. F1NEWS.cz [online]. INCORP, 2013 [cit. 2022-05-08]. Dostupné z: <https://f1news.autoroad.cz/technika/45427-rychla-vyroba-prototypu-klic-k-intenzivnim-aerodynamickym-programum-v-f1-video>
- [8] CAROLO, L. *3D Printer Axis: The Basics – Simply Explained*. All3DP [online]. Mnichov: All3DP, 2020 [cit. 2022-05-08]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/3d-printer-axis-the-basics-simply-explained/>
- [9] EVANS, B. *Practical 3D Printers: The Science and Art of 3D Printing (Technology in Action)*. 1st ed., Apress, 2012, 375 p., ISBN 1430243929.
- [10] STANKO, M. *Zprovoznění 3D tiskárny Prusa Mendel*. Bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016.
- [11] GIBB, A. *Building open source hardware: DIY manufacturing for hackers and makers*. 1st ed., Addison-Wesley Professional, 2014, 338 p., ISBN 0321906047.

- [12] MURPHY, M. *High-tech DIY projects with 3D printing*. New York: PowerKids Press, 2014, 32 p., ISBN 9781477766576.
- [13] KLOSKI, L. W., KLOSKI, N. *Začínáme s 3D tiskem*. Brno: Computer Press, 2017, 216 s., ISBN 978-80-251-4876-1.
- [14] KRATOCHVÍLOVÁ, J. *3D tisk*. Ústí nad Labem: Univerzita J.E. Purkyně v Ústí nad Labem, 2015, 95 s, ISBN 978-80-7414-936-8.
- [15] VOŽENÍLEK, V. *Hmatové mapy technologií 3D tisku*. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, 2010, 82 s., ISBN 978-80-244-2697-6.
- [16] WOJTYŁA, S., KLAMA, P., ŚPIEWAK, K., BARAN, T. *3D printer as a potential source of indoor air pollution*. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2020, Vol. 17, pp. 207-18, <https://doi.org/10.1007/s13762-019-02444>
- [17] STEVENSON, K. *1.75 vs 2.85mm Filament Showdown*. Fabbaloo.com [online]. Terran Data Corporation, 2020 [cit. 2022-05-08]. Dostupné z: <https://www.fabbaloo.com/2020/05/1-75-vs-2-85mm-filament-showdown>
- [18] LUTUS, P. *3D Printing for Builders*. Arachnoid.com [online]. 2020 [cit. 2022-05-08]. Dostupné z: <https://arachnoid.com/3DPrinting/index.html>
- [19] RICHTER, P. *3D Printing for Builders*. MatterHackers.com [online]. Lake Fores: MatterHackers, 2016 [cit. 2022-05-08]. Dostupné z: <https://www.matterhackers.com/news/how-to-make-abs-juice-glue-and-slurry>
- [20] DE AVILA BOCKORNY, G., M.M.C. FORTE a S. STAMBOROSKI. *Modifying a thermoplastic polyurethane for improving the bonding performance in an adhesive technical process*. *Applied Adhesion Science*. 2016, 2016(4), 4. [cit. 2022-05-13]. Dostupné z: [doi:https://doi.org/10.1186/s40563-016-0060-x](https://doi.org/10.1186/s40563-016-0060-x)
- [21] CHEN, Y. *TPE vs TPU Flexible Filament: The Differences*. *All3DP* [online]. [cit. 2022-05-13]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/tpe-vs-tpu-flexible-filament-the-differences>
- [22] *Metoda ztraceného vosku*. *Wikipedie: otevřená encyklopedie* [online]. San Francisco (Kalifornie): Wikimedia Foundation, 2001-, 2006, 2017 [cit. 2022-01-10]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Metoda_ztracen%C3%A9ho_vosku

- [23] DEMONGEOT, A., R. GROOTE, H. GOOSSENS, T. HOEKS, F. TOURNILHAC a L. LEIBLER. Cross-Linking of Poly(butylene terephthalate) by Reactive Extrusion Using Zn(II) Epoxy-Vitrimer Chemistry. *Macromolecules* [online]. 2017, 50(16), 6117-6127 [cit. 2022-05-13]. Dostupné z: doi:<https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.macromol.7b01141>
- [24] Magnetické otázky 14 – Je olovo magnetické? Co je diamagnetismus, Weissova doména?. *Unimagnet.cz* [online]. Praha: Unimagnet, 2018 [cit. 2022-05-13]. Dostupné z: <https://www.unimagnet.cz/clanek/341/magneticke-otazniky-14-je-olovo-magneticke-co-je-diamagnetismus-weissova-domena/#:~:text=Magneticky%20tvr%C3%A1tk%C3%A1tk%C3%A1tk%20je%20%C3%A1tk,samarium%2C%20Nd%20%E2%80%93%20neodym>).

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

FFF Fused Filament Fabrication

FDM Fused Deposition Modeling

SLA Stereolithography

UV Ultrafialové záření

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 3D tiskárna RepRap Darwin [2]	10
Obrázek 2 3D tiskárna RepRap Snappy[3]	11
Obrázek 3 3D tiskárna RepRap Simpson [4]	12
Obrázek 4 3D tiskárna Reppy (foto: Adam Janeček)	13
Obrázek 5 Farma 3D tiskáren na tisk komponent pro vyrábění 3D tiskárny společnosti Prusa Research	13
Obrázek 6 Adrian Bowyer, zakladatel RepRapu (na obrázku vlevo) [6]	17
Obrázek 7 Princip FFF 3D tisku [7]	17
Obrázek 8 Pohyb podložky a hlavy u tiskárny Prusa i3 [8]	18
Obrázek 9 Graf znázorňující nejpoužívanější materiály pro 3D tisk v roce 2016 podle Michala Stanka [10]	19
Obrázek 10 Dva hlavní formáty vláken pro FFF 3D tiskárny o průměru 1,75 mm a 2,85 mm [17]	20
Obrázek 11 3D tiskárna Prusa i3 MK2 s rozšířením pro tisk více materiálů, motory jsou umístěné na rámu a filament je veden teflonovými hadičkami	21
Obrázek 12 Nejčastěji používané trysky u FFF 3D tiskáren o různém průměru	22
Obrázek 13 Konstrukce hlavy tiskárny a průchod filamentu hlavou	24
Obrázek 14 Bontech kolečka, která pohybují s filamentem	24
Obrázek 15 Ventilátory na tiskárně a jejich použití [18]	25
Obrázek 16 Rozdíl mezi výtiskem, který byl chlazený ventilátorem a nechlazeným výtiskem	25
Obrázek 17 Rozdíl mezi výtiskem, který byl chlazený ventilátorem a nechlazeným výtiskem (zdroj: wikimedia.org)	26
Obrázek 18 Chemická struktura ABS	26
Obrázek 19 ABS juice, glue a slurry [19]	28
Obrázek 20 Chemická struktura PLA	29
Obrázek 21 Chemická struktura PET/PETG	31
Obrázek 22 Chloupky a vlákna u výtisků z PET/PETG	33
Obrázek 23 Chemická struktura HIPS	33
Obrázek 24 Rozpouštění podpory z HIPS	34
Obrázek 25 Chemická struktura PVA	36
Obrázek 26 Chemická struktura ASA	37
Obrázek 27 Přehled flexibilních materiálů na českém trhu podle tvrdosti Shore, zdroj: materialpro3d.cz	39
Obrázek 28 Ukázka možnosti změny vlastností materiálu pomocí vnitřní struktury 3D výtisku, zdroj: filament2print.com	39

Obrázek 29 Typický problém při tisku flexibilních materiálů, struna nedrží tvar a v dráze, kterou má procházet se začne deformovat a neposouvá se do horké části	40
Obrázek 30 Obrázek vlevo ukazuje špatně a obrázek vpravo dobře navrženou hlavu tiskárny pro flexibilní materiál	41
Obrázek 31 Chemická reakce termoplastického polyuretanu (TPU) (a) a konfigurace blokové struktury (b) [20].....	41
Obrázek 32 Klíč vyrobený z TPE [21]	43
Obrázek 33 TPE je možné zmáčknout [22]	43
Obrázek 34 Typické využití TPS.....	44
Obrázek 35 Chemická struktura PA	46
Obrázek 36 chemická struktura PC	47
Obrázek 37 Chemická struktura PC.....	48
Obrázek 38 Chemická struktura PMMA	49
Obrázek 39 Chemická struktura PEEK	51
Obrázek 40 Chemická struktura PEKK	52
Obrázek 41 Chemická struktura PEI	52
Obrázek 42 Chemická struktura PVDF	54
Obrázek 43 Vlevo model z materiálu MOLDLAY, vpravo neopracovaný odlitek z kovu (zdroj: https://3dprint.com/).....	57
Obrázek 44 Vyhřívání podložka pro 3D tisk se skleněnou deskou (zdroj: Panucatt Devices)	60
Obrázek 45 Vyhřívání rukojetí motocyklů (zdroj: Amazone).....	61
Obrázek 46 Ukázka původních RepRap vyhřívacích desek s vyleptaným plošným spojem (Zdroj: reprap.org)	62
Obrázek 47 Ukázka hliníkové vyhřívací desky s topením z odporového drátu, který je zalitý v silikonu (Zdroj: IndiaAMRT)	63
Obrázek 48 Srovnání snímků z termokamery vyhřívacích desek MK2B a MK42 (Zdroj: Hackday.com)	63
Obrázek 49 Skleněná deska se dodnes používá třeba u tiskáren Ultimaker, vyhřívání plocha je tvořena hliníkovou deskou (Zdroj: Ultimaker)	64
Obrázek 50 Nanesení tenké vrstvy tyčinkového PVA lepidla na skleněnou podložku (Zdroj: Ultimaker).....	65
Obrázek 51 Kondicionér pro PEI povrchy od firmy OSEQ (Zdroj: OSEQ).....	67
Obrázek 52 Koroze u plechových podložek s nalepenou vrstvou PEI od firmy Prusa Research (zdroj: Prusa Research)	68
Obrázek 53 Laboratorní měřicí hnětič Brabender® Plastograph®	69
Obrázek 54 Ruční vyhřívání a chlazení lis na přípravu vzorků	70
Obrázek 55 Měření tepelné vodivosti, v tomto případě čistého PBT materiálu bez aditiv .	71

Obrázek 56 Graf průměrů měření tepelné vodivosti pro různé množství plniva (množství plniva v materiálu je uvedeno v % objemově)	72
Obrázek 58 Graf porovnávací chování materiálu na DSC při 10 % plnění (materiál označený jako barel je M33).....	73
Obrázek 59 Graf porovnávací chování materiálu na DSC při 30 % plnění (materiál označený jako barel je M33).....	73
Obrázek 60 Graf porovnávací chování materiálu na DSC při 40 % plnění (materiál označený jako barel je M33).....	74
Obrázek 61 Graf porovnávací chování materiálu AFSC při různém plnění na DSC	74
Obrázek 62 Graf porovnávací chování materiálu M33 (označen jako barel) při různém plnění na DSC	75
Obrázek 63 Graf porovnávací chování materiálu MQP při různém plnění na DSC	75
Obrázek 64 Měření průhybu	76
Obrázek 65 Pevnost ohybu v mezi kluzu (MPa), průměr ze 4 vzorků	77
Obrázek 66 Měření na rotačním viskozimetru Anton-Paar MCR 502	78
Obrázek 67 Chování materiálů s plněním 40 % na rotačním viskozimetru Anton-Paar MCR 502	78
Obrázek 68 Materiál PBT + 40% MQP při zvětšení 550x	79
Obrázek 69 Materiál PBT + 40% AFSC při zvětšení 550x.....	80
Obrázek 70 Materiál PBT + 40% M33 při zvětšení 550x	80
Obrázek 71 Magnetometr VSM 7407.....	81
Obrázek 72 Magnetické vlastnosti materiálu s 40% aditiva AFSC.....	82
Obrázek 73 Magnetické vlastnosti materiálu s 40% aditiva M33	83
Obrázek 74 Magnetické vlastnosti materiálu s 40% aditiva MQP	83
Obrázek 75 Kompaundační linka	84
Obrázek 76 Kompaundační linka	84
Obrázek 77 Vstřikovací stroj 180MET III-15h	85
Obrázek 78 Forma pro vstřikovací stroj 180MET III-15h	85
Obrázek 79 Zkušební výtisk na testované podložce	86
Obrázek 80 Drsnoměr TS100 při měření komerční podložky firmy Prusa Research	87
Obrázek 81 různé povrchy podložek Prusa Research.....	88

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Srovnání různých tiskových podložek.....	64
Tabulka 2 Srovnání drsnosti různých tiskových podložek	87

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha P I: Měření tepelné vodivosti

Příloha P II: Měření průhybu

Příloha P III: Měření na rotačním viskozimetru Anton-Paar MCR 502

Příloha P IV: Měření na magnetometru

PŘÍLOHA P I: TEPELNÉ VODIVOST

Čistý PBT bez příměsí:

#	Effusivity (Ws ^{1/2} /m ² K)	k (W/mK)
1	743,5317	0,394212
2	743,3733	0,394062
3	735,3277	0,386438
4	736,9777	0,387999
5	739,0607	0,389972
6	740,6691	0,391497
7	734,9991	0,386127
8	796,6519	0,445086
9	795,5413	0,444012
Průměr:	751,7925	0,402156

PBT + 5 % MQP

#	Effusivity (Ws ^{1/2} /m ² K)	k (W/mK)
1	691,6099	0,345378
2	687,8643	0,341889
3	690,2178	0,344081
4	685,6883	0,339864
5	691,1045	0,344907
6	681,1636	0,335658
7	678,7522	0,333419
8	675,1658	0,330092
9	681,2009	0,335692
10	682,0562	0,336487
11	678,203	0,332909
12	681,9523	0,33639
13	681,9227	0,336363
14	679,3364	0,333961
15	679,491	0,334104
16	675,0888	0,330021
17	679,403	0,334023
18	676,5551	0,33138
19	679,1198	0,33376
20	704,7019	0,35761
21	701,3292	0,354453
22	699,2516	0,352511
23	700,3635	0,35355
Průměr:	685,2844	0,3395

PBT + 10 % MQP

#	Effusivity (Ws ^{1/2} /m ² K)	k (W/mK)
1	762,0316	0,411823
2	761,673	0,411481
3	760,8092	0,410656
4	764,8855	0,41455
5	757,6109	0,407605
6	755,7442	0,405825
7	760,8517	0,410697
Průměr:	760,5152	0,410377

PBT + 20 % MQP

#	Effusivity (Ws ^{1/2} /m ² K)	k (W/mK)
1	917,4516	0,564351
2	913,5776	0,560447
3	913,9838	0,560856
4	917,2581	0,564156
5	914,7443	0,561622
6	913,0165	0,559882
7	910,6454	0,557496
8	910,3844	0,557233
9	913,7038	0,560574
10	913,105	0,559971
11	913,2797	0,560147
12	911,6509	0,558508
13	912,853	0,559718
Průměr:	913,5118	0,560382

PBT + 30 % MQP

#	Effusivity (Ws ^{1/2} /m ² K)	k (W/mK)
1	1090,234	0,74412
2	1087,842	0,741554
3	1090,41	0,744309
4	1092,806	0,746882
5	1092,165	0,746194
6	1095,609	0,749895
7	1094,266	0,748451
Průměr:	1091,904	0,745915

PBT + 40 % MQP

#	Effusivity (Ws ^{1/2} /m ² K)	k (W/mK)
1	1297,30518	0,975157
2	1295,08789	0,972586
3	1292,20288	0,969245
4	1290,6676	0,974246
5	1296,51929	0,974246
Průměr:	1294,356568	0,973096

PBT + 5 % AFSC

#	Effusivity (Ws ^{1/2} /m ² K)	k (W/mK)
1	694,0624	0,347665
2	688,7236	0,342689
3	687,4221	0,341477
4	682,3415	0,336752
5	681,2287	0,335718
6	680,2764	0,334834
7	679,8256	0,334415
8	681,9666	0,336403
9	682,4871	0,336887
10	681,7321	0,336186
11	682,5298	0,336927
12	683,4083	0,337743
13	682,4788	0,33688
14	681,1647	0,335659
15	680,2646	0,334823
Průměr:	683,3275	0,33767

PBT + 10 % AFSC

#	Effusivity (Ws ^{1/2} /m ² K)	k (W/mK)
1	722,027	0,37388
2	723,5865	0,37535
3	722,8358	0,374642
4	721,7285	0,373599
5	719,952	0,371927
6	720,6477	0,372582
7	714,2097	0,366527
8	717,3209	0,369451
9	715,5034	0,367742

Průměr:	719,7568	0,371745
----------------	-----------------	-----------------

PBT + 20 % AFSC

#	Effusivity (Ws ^{1/2} /m ² K)	k (W/mK)
1	722,027	0,37388
2	723,5865	0,37535
3	722,8358	0,374642
4	721,7285	0,373599
5	719,952	0,371927
6	720,6477	0,372582
7	714,2097	0,366527
8	717,3209	0,369451
9	715,5034	0,367742
Průměr:	719,7568	0,371745

PBT + 30 % AFSC

#	Effusivity (Ws ^{1/2} /m ² K)	k (W/mK)
1	1003,998	0,652996
2	1009,43	0,658652
3	1012,21	0,661551
4	1010,408	0,659672
5	1009,588	0,658817
6	1009,034	0,658239
7	1013,023	0,6624
8	1012,074	0,66141
9	1011,964	0,661294
Průměr:	1010,192	0,659448

PBT + 40 % AFSC

#	Effusivity (Ws ^{1/2} /m ² K)	k (W/mK)
1	1252,099	0,923177
2	1246,485	0,916783
3	1244,695	0,914748
4	1246,278	0,916548
5	1232,933	0,901405
6	1232,895	0,901363
7	1236,691	0,905662
8	1247,005	0,917374

9	1238,401	0,907601
Průměr:	1241,942	0,911629

PBT + 5 % M33

#	Effusivity (Ws ^{1/2} /m ² K)	k (W/mK)
1	797,4474	0,445854
2	728,9932	0,38045
3	728,8254	0,380292
4	732,7902	0,384038
Průměr:	747,014	0,397658

PBT + 10 % M33

#	Effusivity (Ws ^{1/2} /m ² K)	k (W/mK)
1	778,1223	0,427233
2	776,975	0,426131
3	789,7037	0,438378
4	794,1253	0,442644
5	791,2077	0,439828
6	794,5284	0,443034
7	785,2795	0,434115
8	793,6522	0,442188
9	793,5022	0,442043
Průměr:	788,5663	0,437288

PBT + 20 % M33

#	Effusivity (Ws ^{1/2} /m ² K)	k (W/mK)
1	1037,519	0,688078
2	1038,776	0,689401
3	1039,575	0,690244
4	1038,25	0,688847
5	1027,909	0,677977
6	1034,81	0,685227
7	1034,922	0,685344
8	1034	0,684375
9	1030,462	0,680658
10	1040,655	0,691382
11	1039,356	0,690013
12	1029,038	0,679162

Průměr:	1035,439	0,685892
----------------	-----------------	-----------------

PBT + 30 % M33

#	Effusivity (Ws ^{1/2} /m ² K)	k (W/mK)
1	1255,953	0,927574
2	1254,257	0,925638
3	1256,398	0,928081
4	1259,436	0,931552
5	1254,666	0,926105
6	1257,943	0,929847
Průměr:	1256,442	0,928133

PBT + 40 % M33

#	Effusivity (Ws ^{1/2} /m ² K)	k (W/mK)
1	1188,249	0,851252
2	1342,637	1,028189
3	1337,835	1,022528
Průměr:	1289,574	0,967323

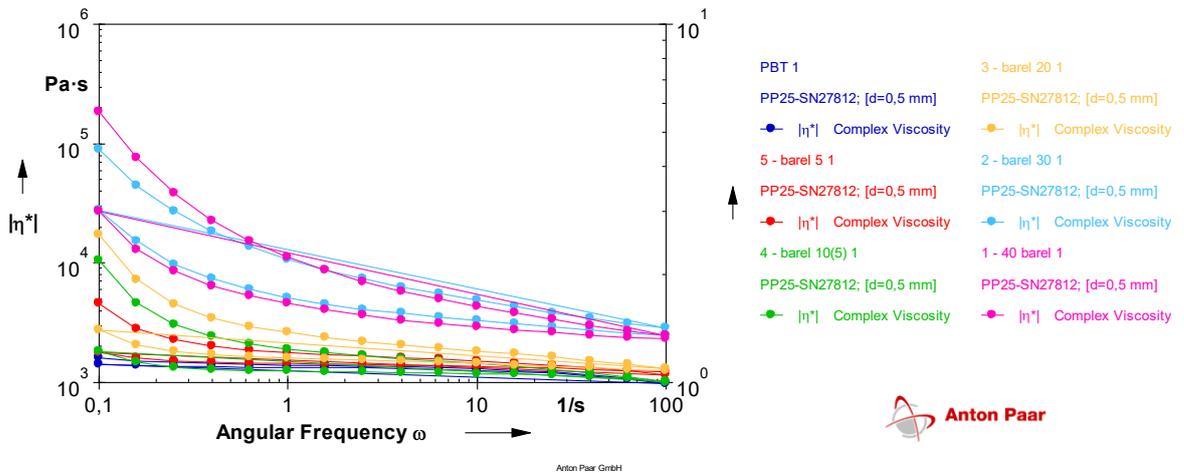
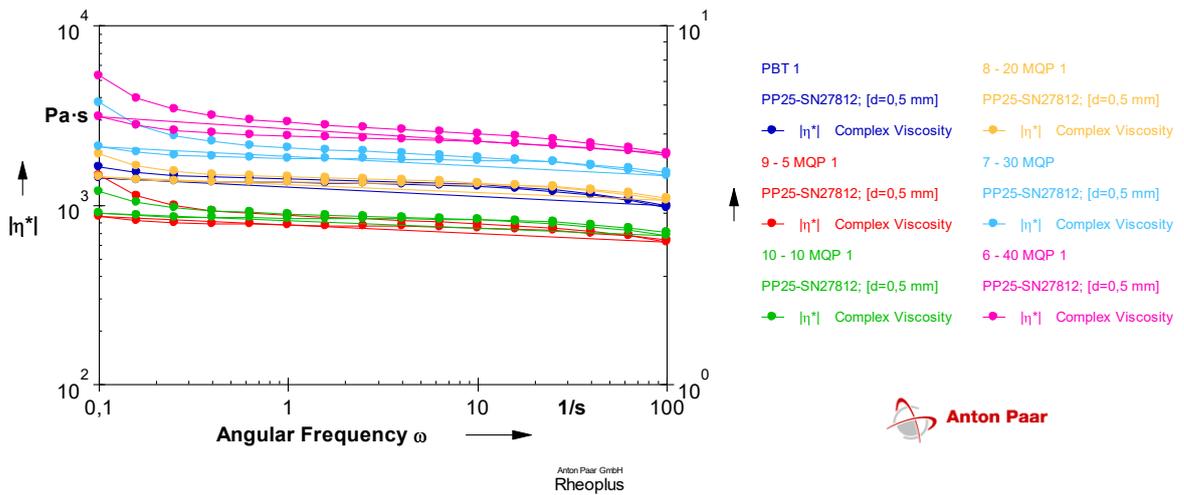
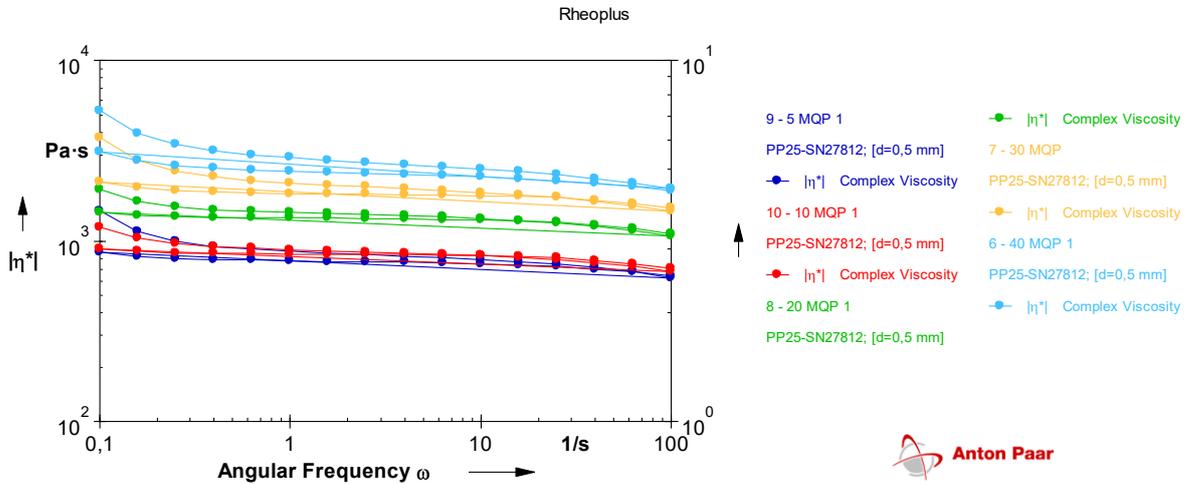
PŘÍLOHA P II: MĚŘENÍ PRŮHYBU

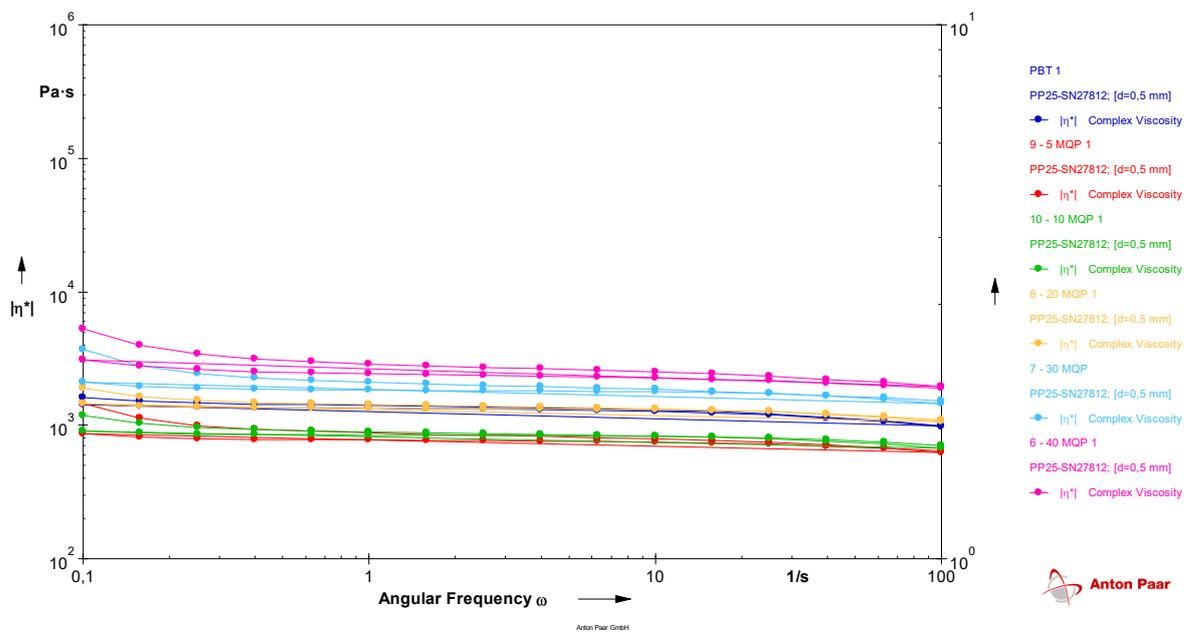
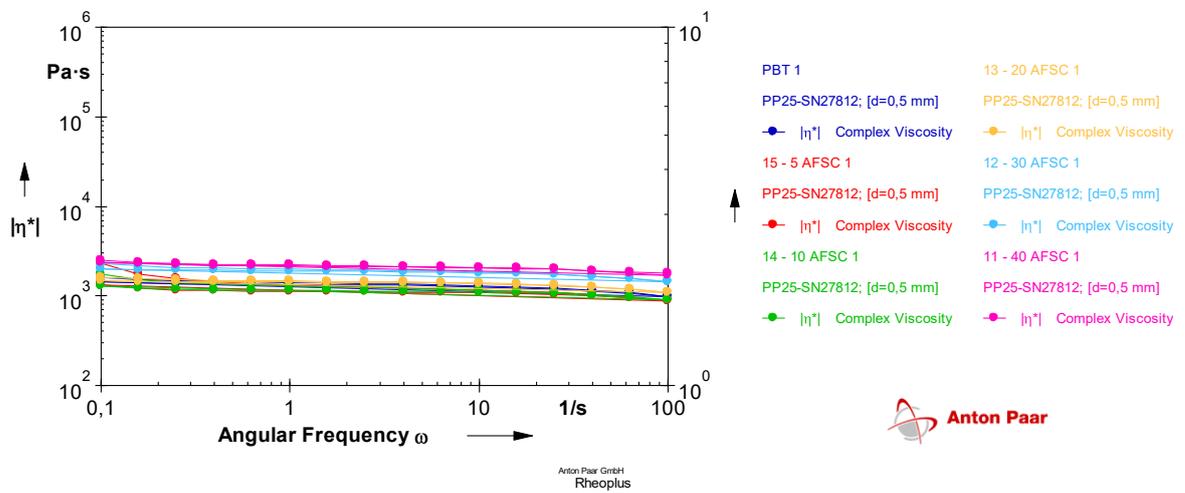
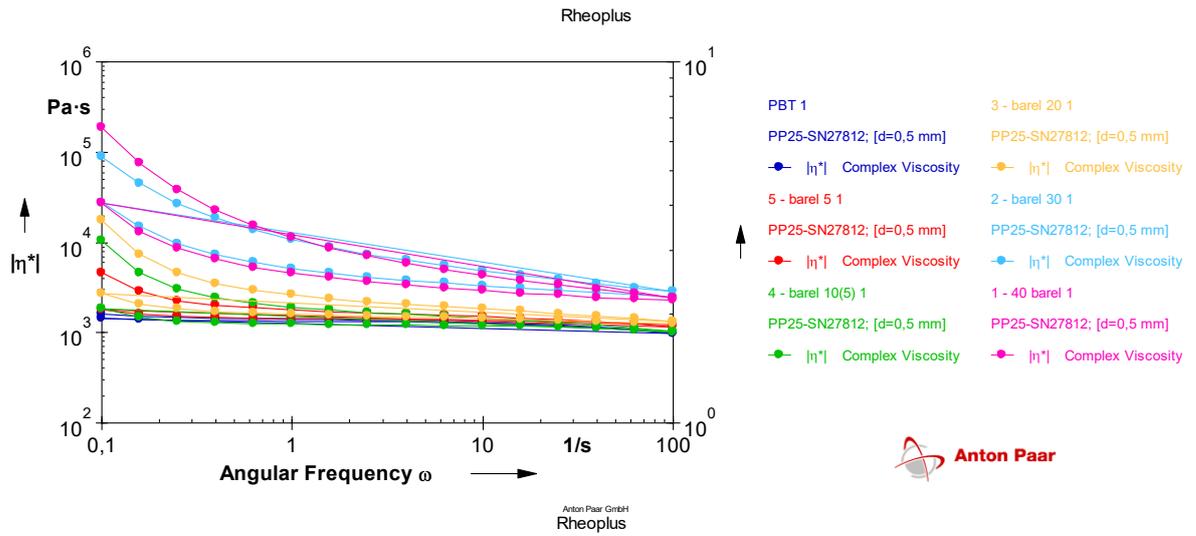
Ref 1 :	Nazev zkousky : Ohyb 10kg
	Druh zkousky : 3 bodovy pruhb
	Datum zkousky : 4/20/2022 12:35 PM
	Rychlost zkousky : 5.000 mm/min
	Predzatez : 0.500 N
	Sirka : 10.000 mm
	Tloustka : 1.270 mm
	Rozpeti : 50.000 mm

Kod vzorku	Modul ohybu (MPa)	Taznost pri nejvyssi pevnosti (%)	Pevnost v ohybu v mezi kluzu (MPa)	Napeti pri nejvyssi sile (MPa)	Sirka (mm)	Tloustka (mm)
PBT1	2114.771	3.332	53.210	53.299	10.000	1.300
PBT3	1847.105	3.629	48.219	48.257	10.474	1.363
PBT3	2136.096	3.500	53.171	53.206	12.709	1.295
PBT4	1811.659	3.718	46.843	46.905	12.555	1.378
5BAREL1	2666.627	2.907	60.442	60.493	9.838	1.221
5BAREL2	3545.173	3.087	76.578	76.619	11.271	1.272
5BAREL3	3241.025	3.063	71.247	71.297	9.588	1.253
5BAREL4	2632.897	3.149	59.023	59.172	9.763	1.244
10BAREL 1	3441.937	2.622	68.842	68.878	10.145	1.443
10BAREL 2	3397.129	2.671	69.607	69.644	9.482	1.479
10BAREL 3	3537.041	2.523	66.689	66.728	13.295	1.202
10BAREL 4	3302.935	2.593	61.822	61.839	6.215	1.177
20BAREL 1	5677.039	1.508	78.349	78.496	10.087	1.233
20BAREL 2	4673.517	1.386	63.593	63.646	7.351	1.391
20BAREL 3	5415.256	0.775	47.647	47.692	10.625	1.249
20BAREL 4	5271.902	1.479	71.347	71.395	10.021	1.246
30BAREL 1	5412.555	0.315	9.168	18.734	10.000	1.316
30BAREL 2	6224.110	0.619	20.032	36.582	9.907	1.337
30BAREL 3	6586.630	0.894	60.445	60.488	9.579	1.337
30BAREL 4	6481.596	0.480	30.436	30.474	10.462	1.293
40BAREL 1	8731.170	0.611	54.833	54.934	8.776	1.298

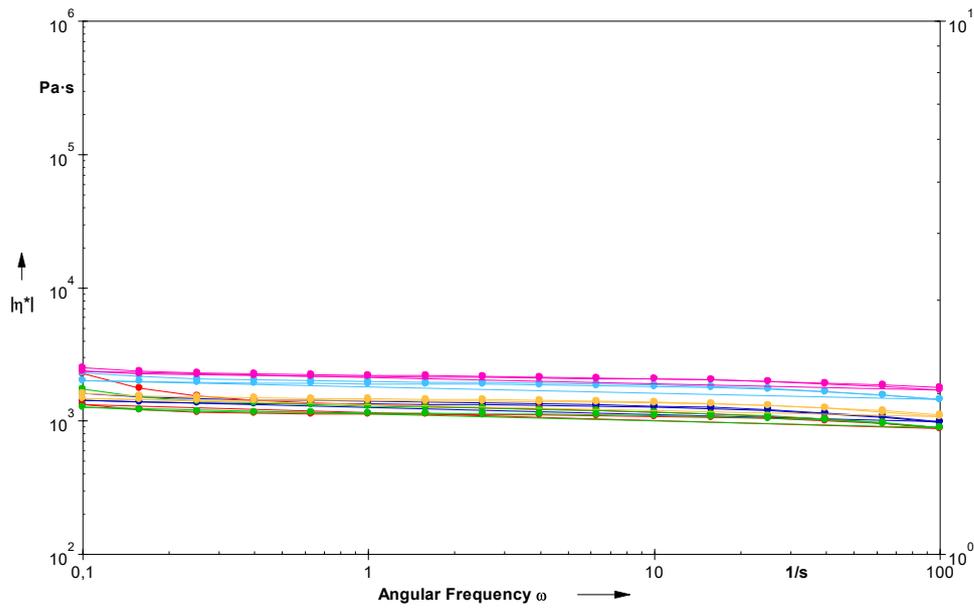
40BAREL 2	4531.855	0.238	12.287	12.416	11.537	1.189
40BAREL 3	6460.803	0.291	14.292	19.837	10.545	1.146
40BAREL 4	4536.330	0.282	9.345	13.946	10.598	1.252
5MQP1	2789.674	2.664	58.004	58.066	9.875	1.049
5MQP2	3042.035	2.834	63.822	63.875	11.461	1.106
5MQP3	3181.302	2.601	66.697	67.345	10.854	1.033
5MQP4	3242.893	2.682	66.431	66.511	10.003	1.018
10MQP1	2817.060	3.335	63.073	63.118	9.432	1.329
10MQP2	2951.294	3.127	65.520	65.563	10.190	1.311
10MQP3	2941.137	3.386	63.579	63.658	10.577	1.340
10MQP4	2858.404	3.258	63.640	63.683	9.703	1.343
20MQP1	3727.014	3.042	71.662	71.699	10.298	1.411
20MQP2	3545.922	2.677	67.860	67.901	11.089	1.282
20MQP3	3317.953	2.978	66.317	66.351	10.772	1.422
20MQP4	3644.575	2.887	68.586	68.669	9.604	1.364
30MQP1	4019.054	2.465	63.613	63.674	11.569	1.465
30MQP2	3965.932	2.422	62.128	62.172	10.606	1.274
30MQP3	3659.067	2.430	61.169	61.202	10.988	1.448
30MQP4	4215.572	2.515	64.148	64.222	9.919	1.428
40MQP1	4296.644	1.999	53.187	53.227	10.787	1.325
40MQP2	4946.804	1.730	56.470	56.511	9.059	1.426
40MQP3	4412.977	2.122	53.613	53.825	10.274	1.315
40MQP4	4052.384	1.819	50.956	51.046	9.561	1.323
5AFSC1	3009.988	2.678	62.661	62.774	11.257	1.033
5AFSC2	2327.718	2.986	16.709	53.209	9.959	1.128
5AFSC3	3038.565	2.919	62.192	62.252	11.148	1.053
5AFSC4	3043.171	2.751	61.741	61.808	10.796	1.023
10AFSC1	3339.906	2.915	68.363	68.483	9.847	1.126
10AFSC2	2540.250	3.077	59.981	60.267	9.745	1.271
10AFSC3	2547.325	3.149	59.350	59.513	11.195	1.282
10AFSC4	3186.680	2.850	67.146	67.267	9.482	1.144
20AFSC1	3856.719	2.590	70.934	70.994	10.044	1.115
20AFSC2	3919.122	2.697	70.758	70.816	10.101	1.131
20AFSC3	3250.782	2.928	64.005	64.138	10.553	1.268
20AFSC4	3829.951	2.613	71.815	71.907	12.542	1.139
30AFSC1	4312.450	2.313	71.655	71.704	10.386	1.213
30AFSC2	4284.145	2.496	72.005	72.045	11.122	1.298
30AFSC3	3797.752	2.515	66.804	66.842	11.464	1.302
30AFSC4	4294.860	2.533	72.608	72.651	10.838	1.265
40AFSC1	5886.856	1.565	78.059	78.116	9.989	1.145
40AFSC2	5693.506	1.542	75.622	75.676	8.921	1.256
40AFSC3	6069.957	1.537	77.524	77.620	10.573	1.216
40AFSC4	6103.714	1.634	79.113	79.167	9.900	1.182

PŘÍLOHA P III: MĚŘENÍ NA ROTAČNÍM VISKOZIMETRU ANTON-PAAR MCR 502

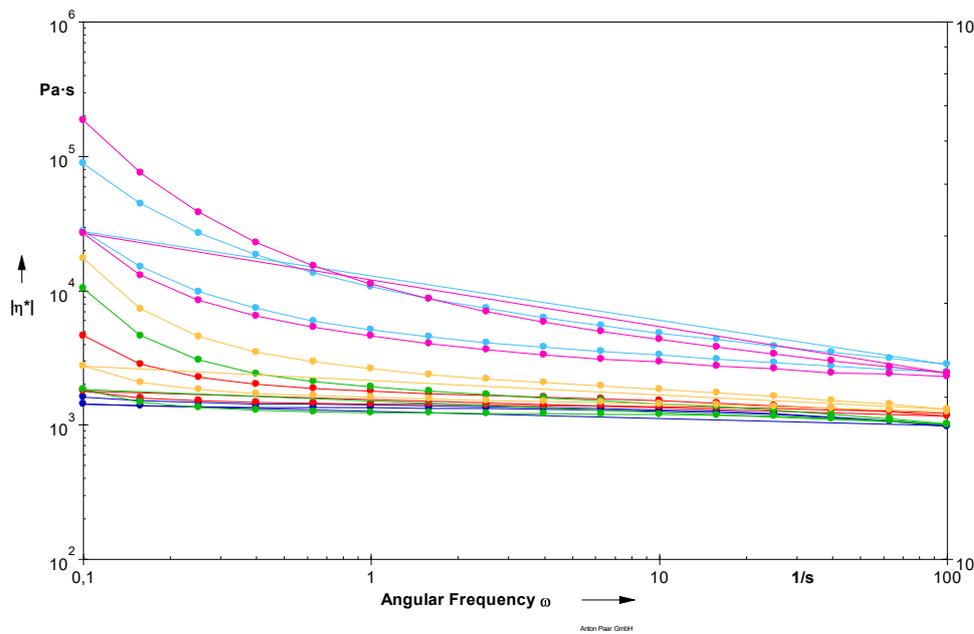




Rheoplus



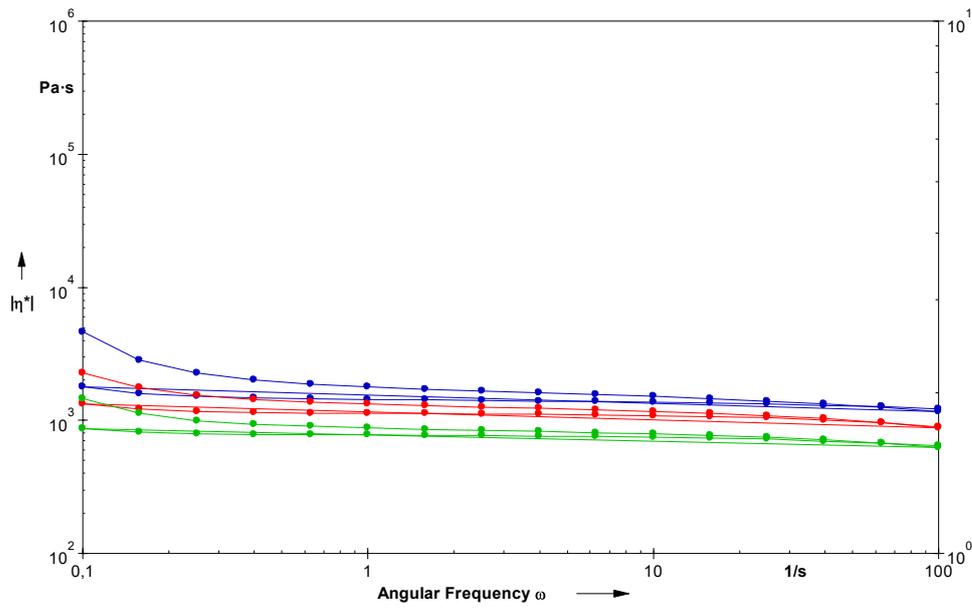
- PBT 1
- PP25-SN27812; [d=0,5 mm]
- 15 - 5 AFSC 1
- PP25-SN27812; [d=0,5 mm]
- 14 - 10 AFSC 1
- PP25-SN27812; [d=0,5 mm]
- 13 - 20 AFSC 1
- PP25-SN27812; [d=0,5 mm]
- 12 - 30 AFSC 1
- PP25-SN27812; [d=0,5 mm]
- 11 - 40 AFSC 1
- PP25-SN27812; [d=0,5 mm]



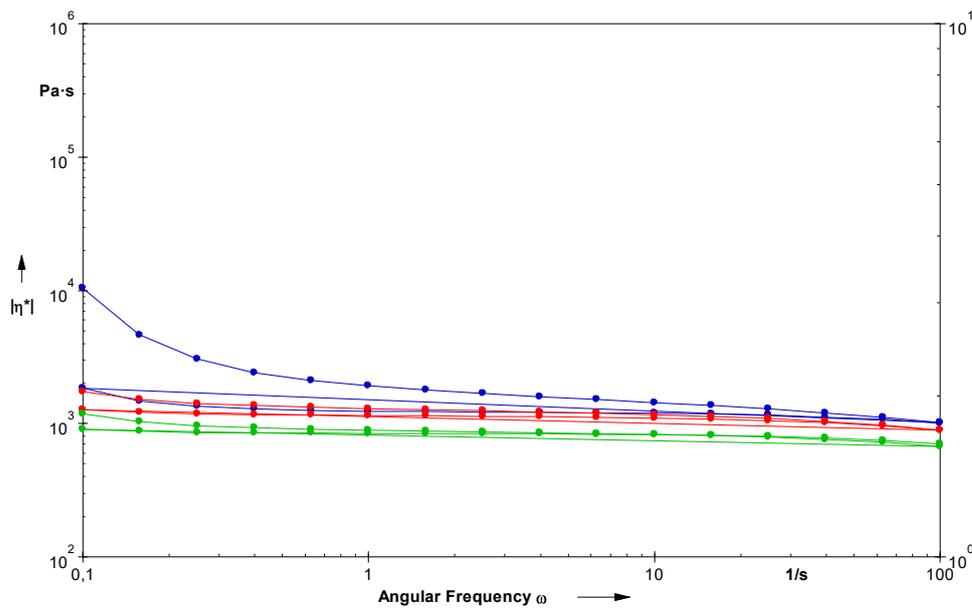
- PBT 1
- PP25-SN27812; [d=0,5 mm]
- 5 - barrel 5 1
- PP25-SN27812; [d=0,5 mm]
- 4 - barrel 10(5) 1
- PP25-SN27812; [d=0,5 mm]
- 3 - barrel 20 1
- PP25-SN27812; [d=0,5 mm]
- 2 - barrel 30 1
- PP25-SN27812; [d=0,5 mm]
- 1 - 40 barrel 1
- PP25-SN27812; [d=0,5 mm]



Rheoplus

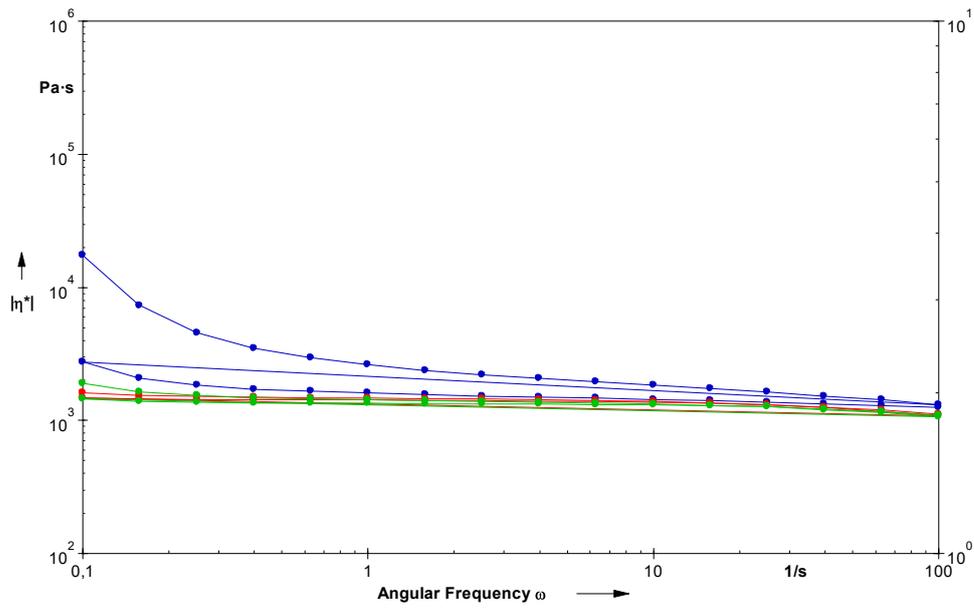


Anton Paar GmbH
 Rheoplus

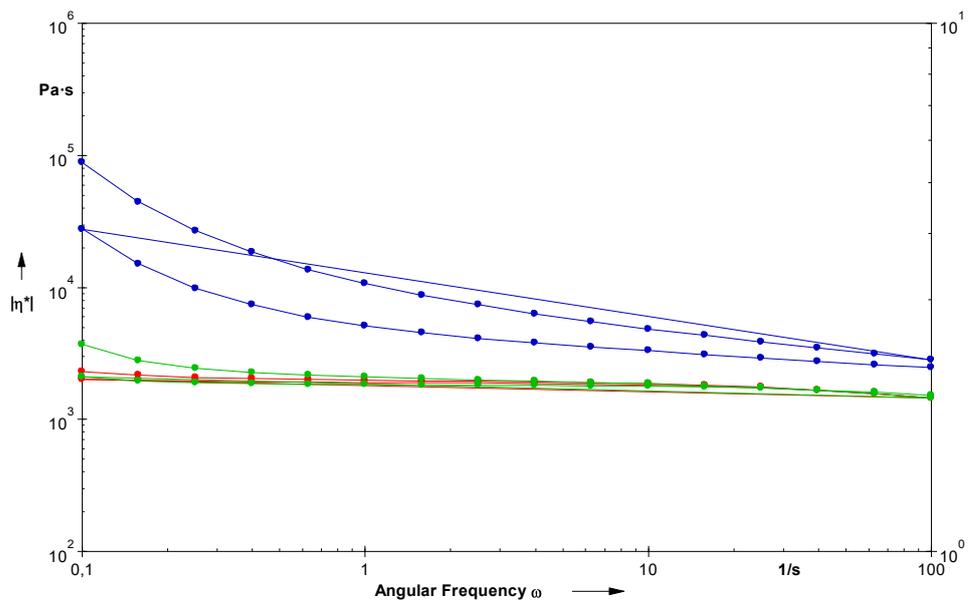


Anton Paar GmbH

Rheoplus



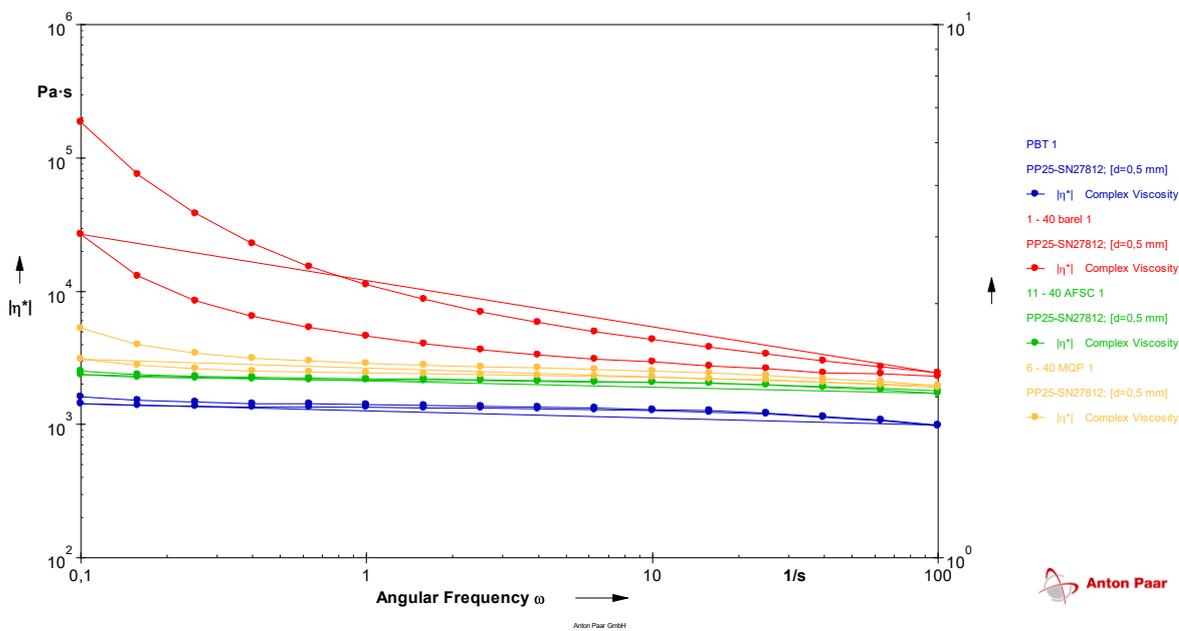
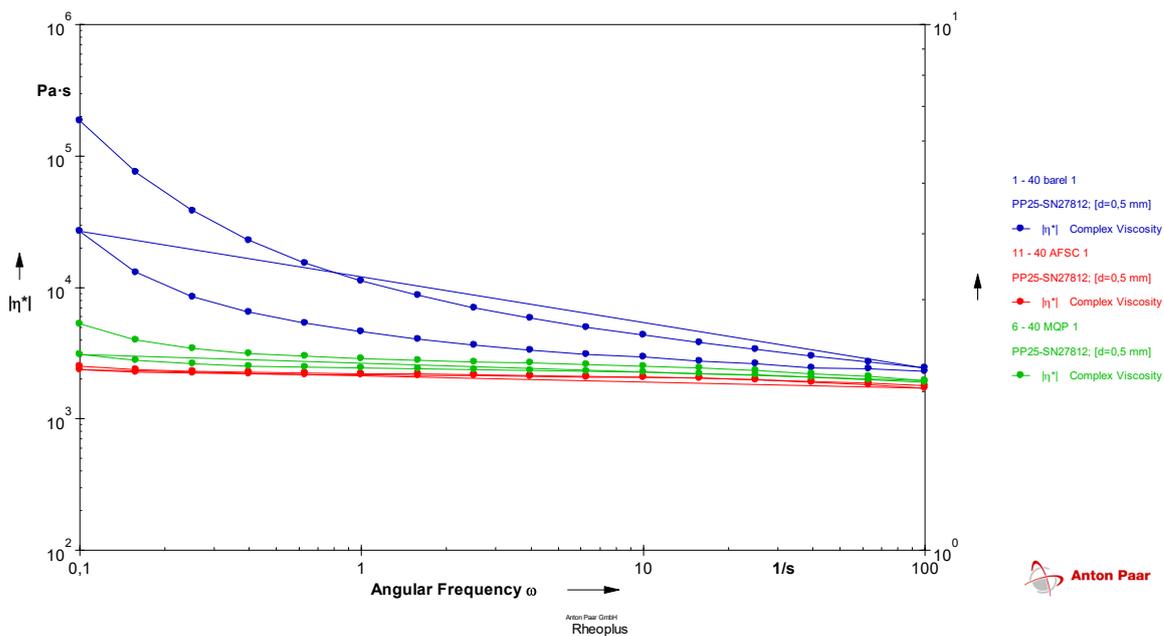
- 3 - barel 20 1
- PP25-SN27812; [d=0,5 mm]
- 13 - 20 AFSC 1
- PP25-SN27812; [d=0,5 mm]
- 8 - 20 MQP 1
- PP25-SN27812; [d=0,5 mm]



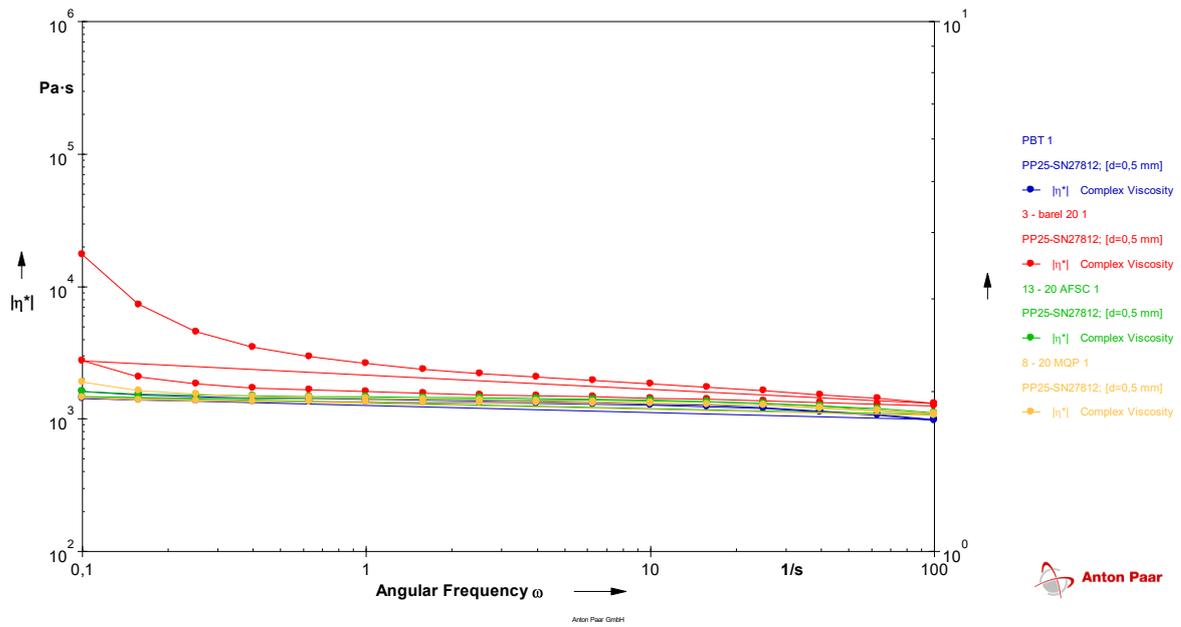
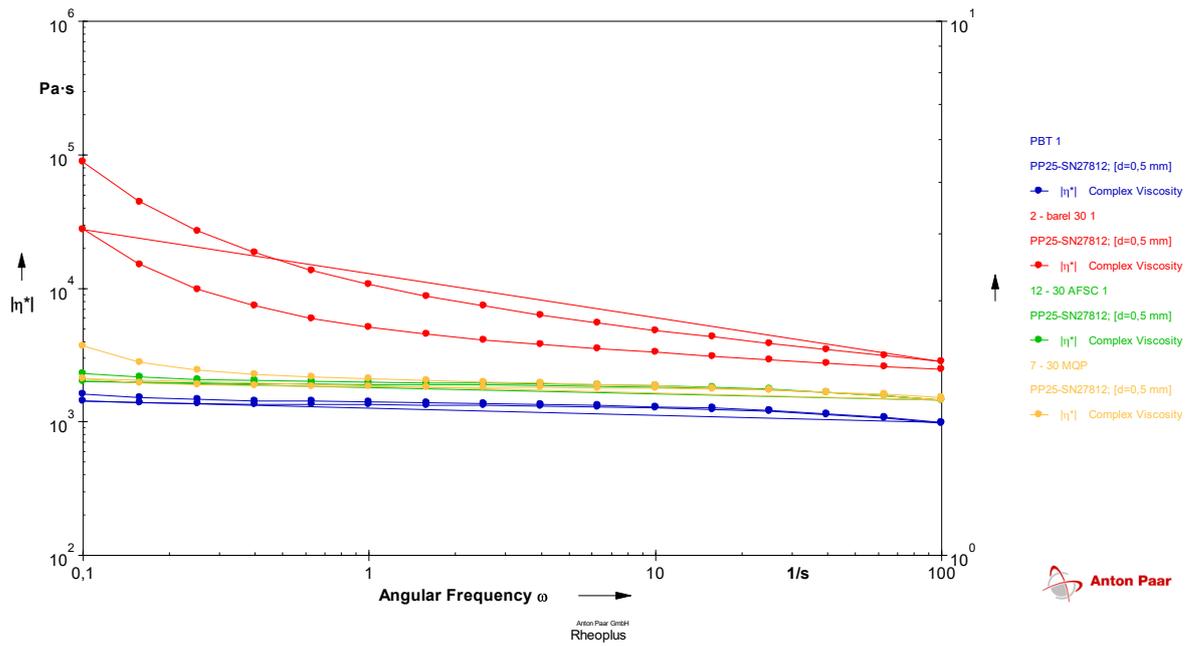
- 2 - barel 30 1
- PP25-SN27812; [d=0,5 mm]
- 12 - 30 AFSC 1
- PP25-SN27812; [d=0,5 mm]
- 7 - 30 MQP
- PP25-SN27812; [d=0,5 mm]



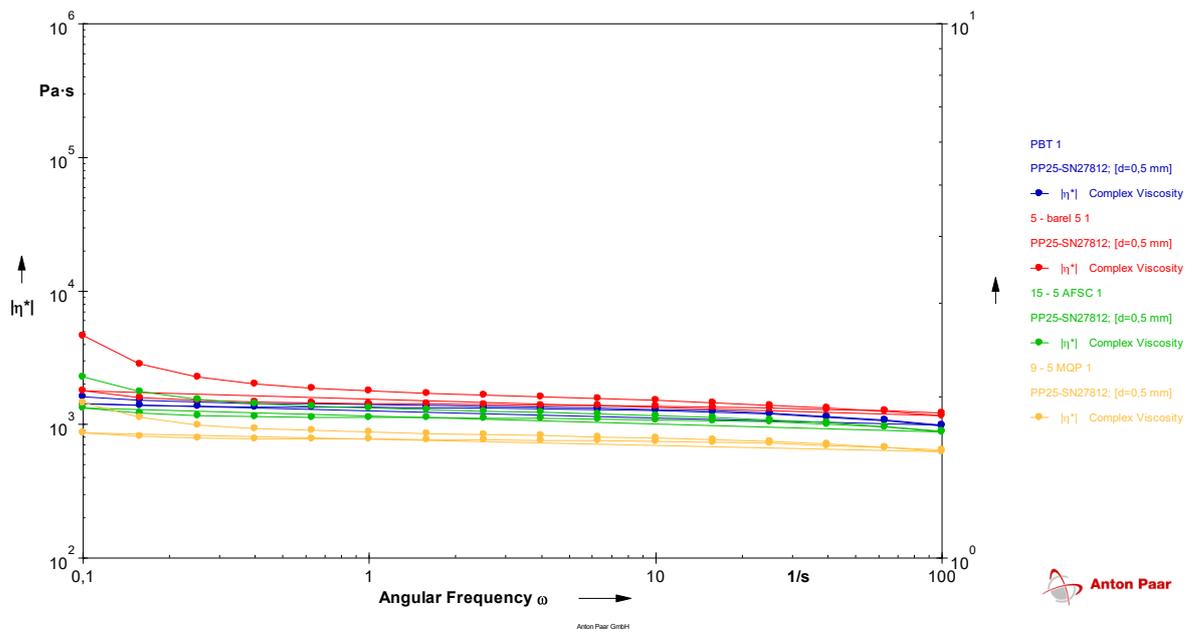
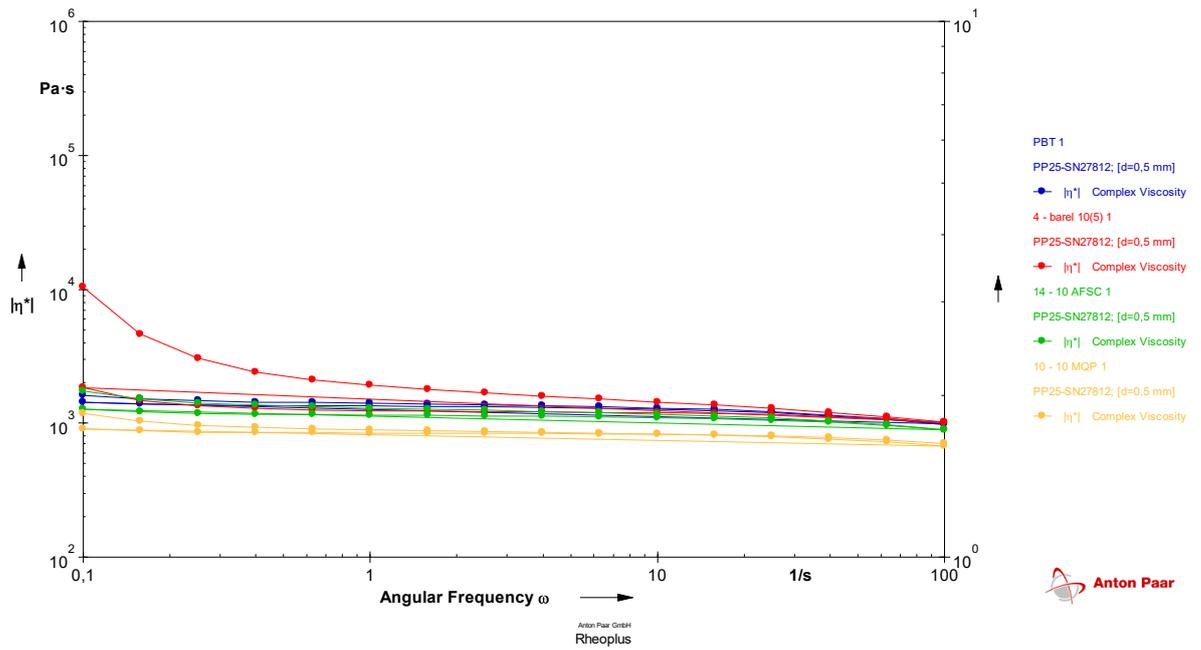
Rheoplus

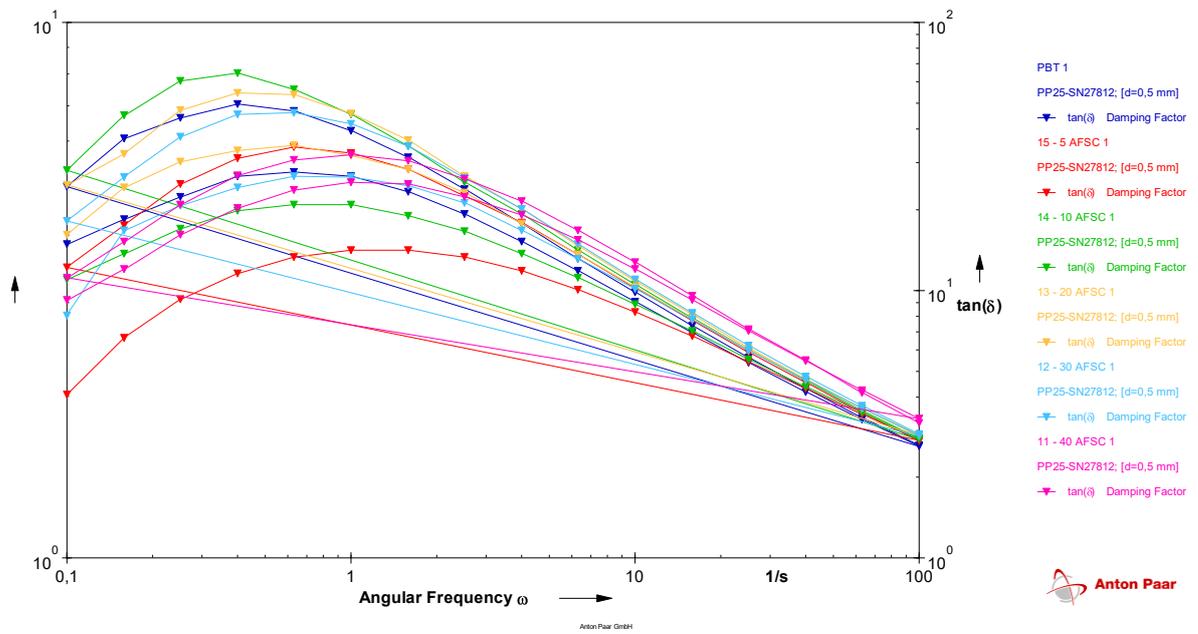
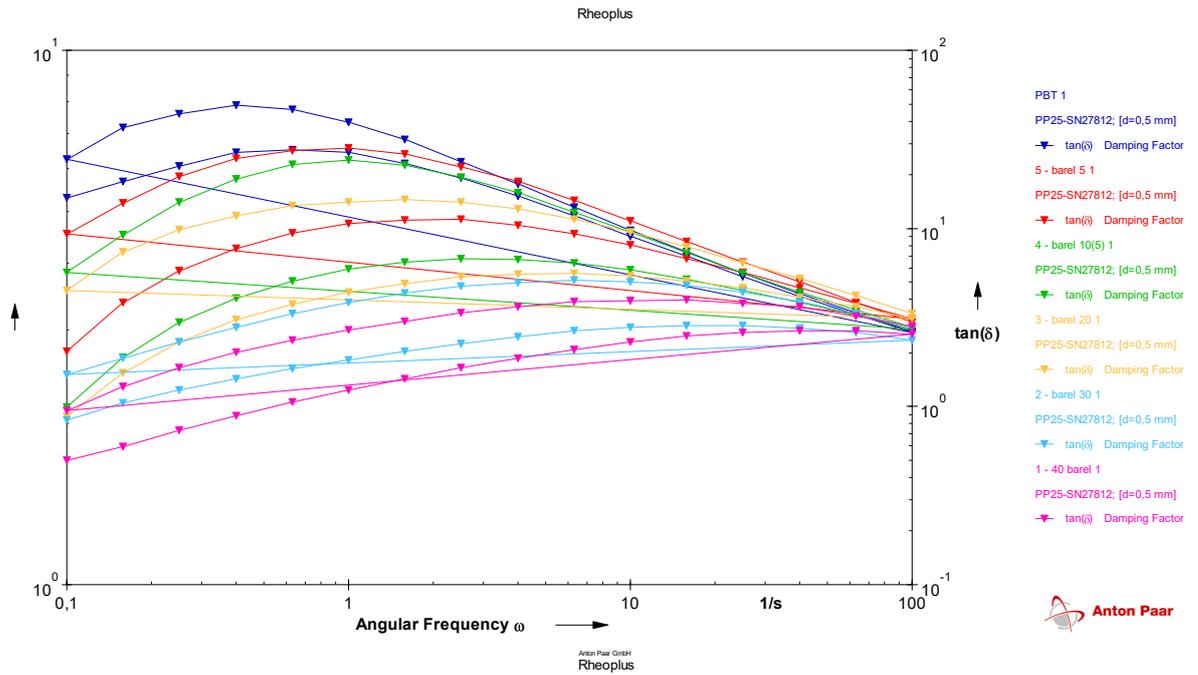


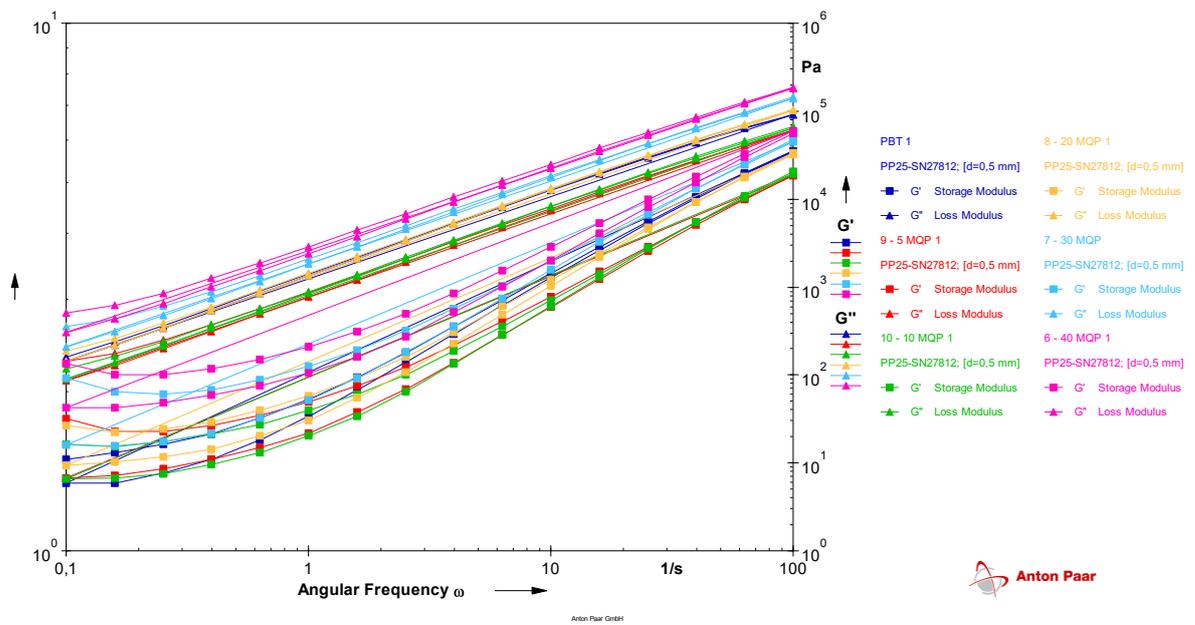
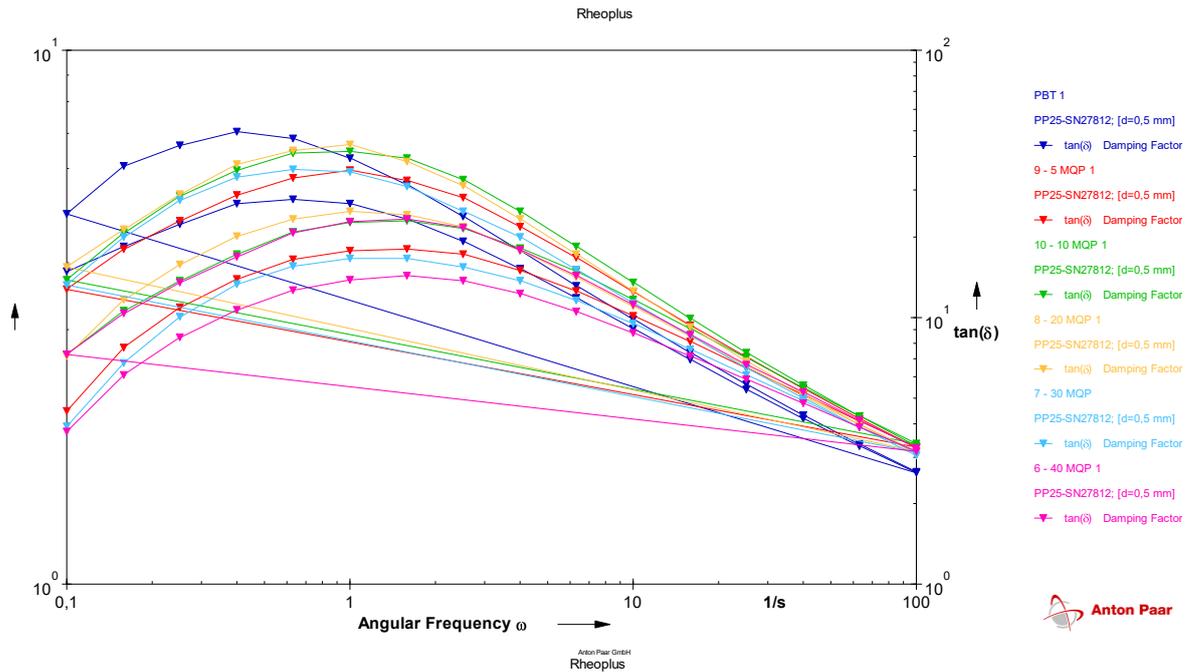
Rheoplus

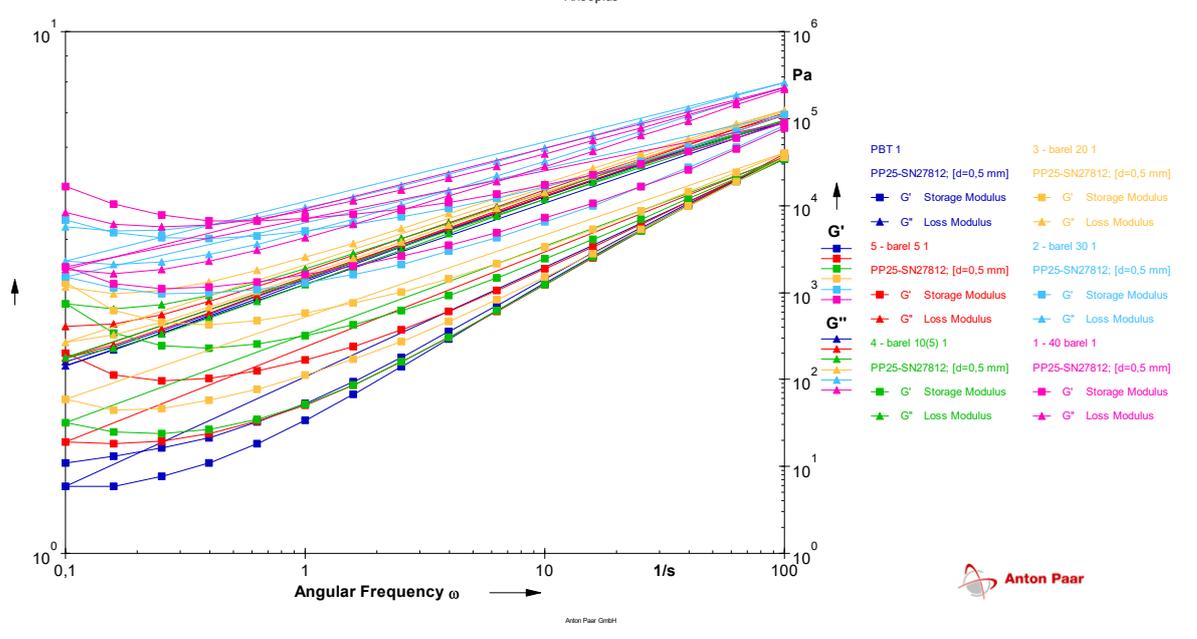
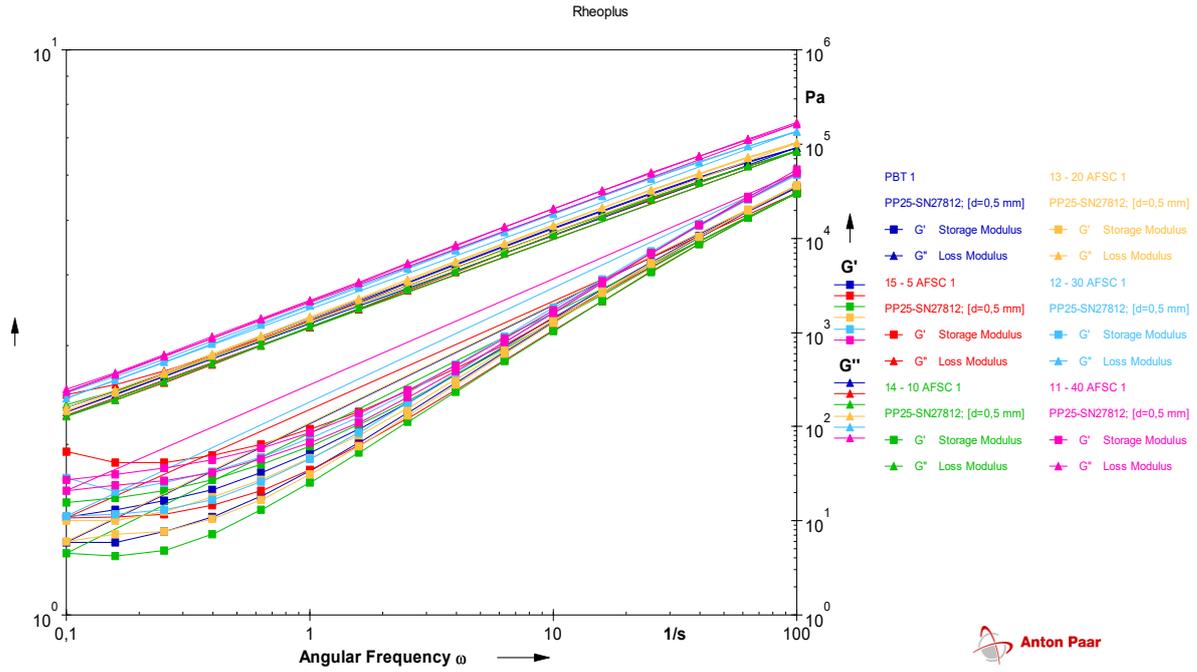


Rheoplus

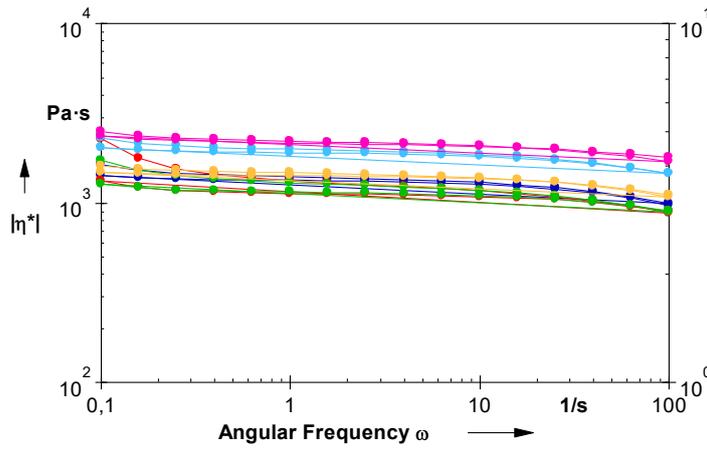








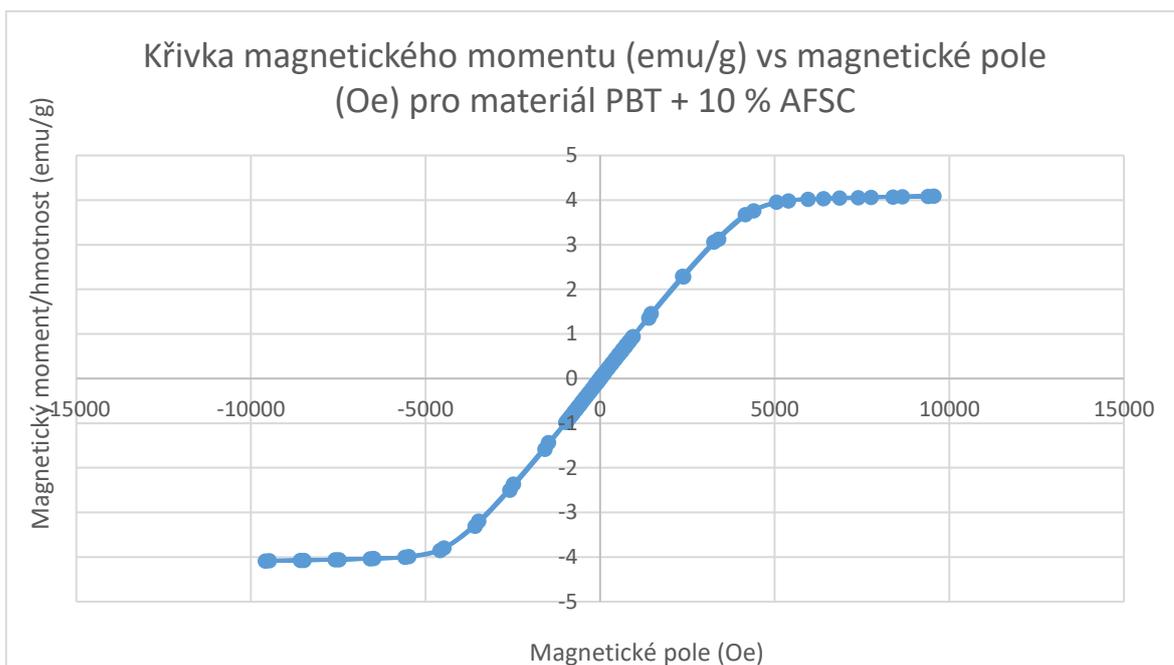
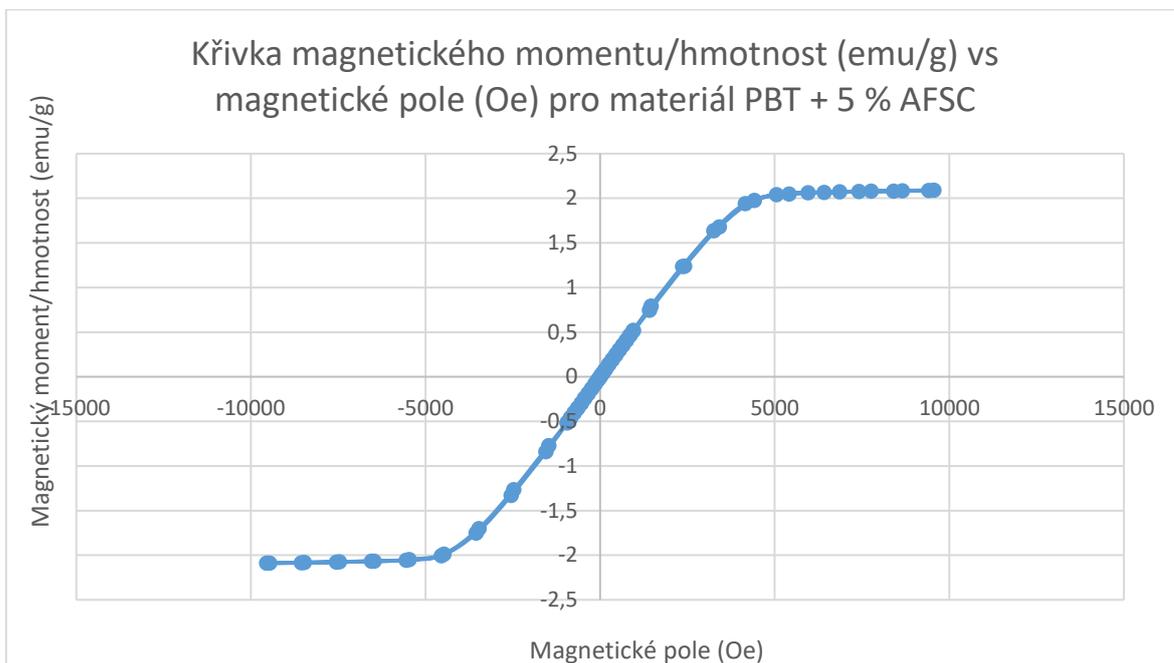
Rheoplus



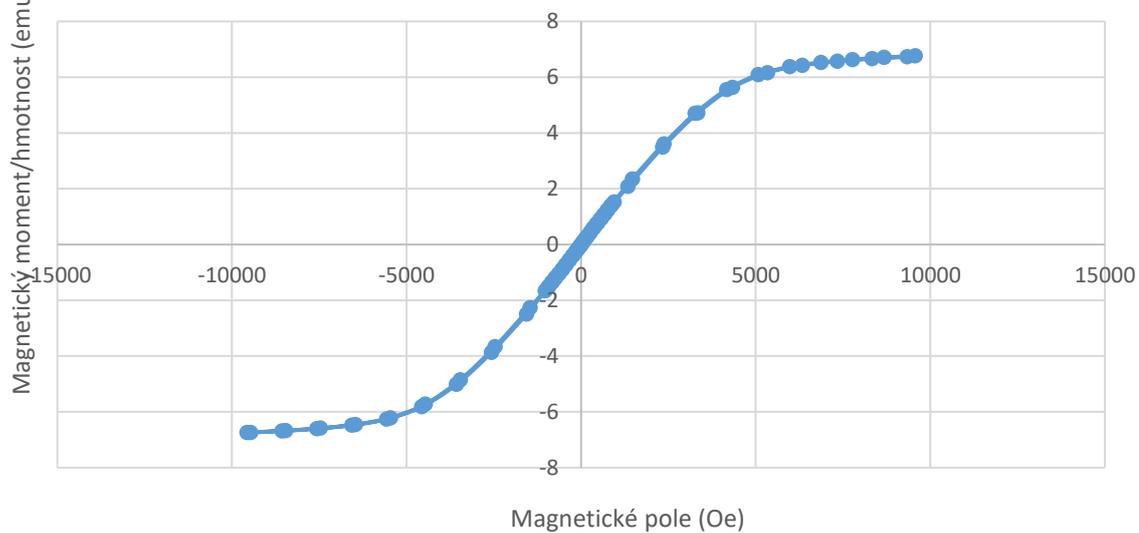
- PBT 1
- PP25-SN27812; [d=0,5 mm]
- 15 - 5 AFSC 1
- PP25-SN27812; [d=0,5 mm]
- 14 - 10 AFSC 1
- PP25-SN27812; [d=0,5 mm]
- 13 - 20 AFSC 1
- PP25-SN27812; [d=0,5 mm]
- 12 - 30 AFSC 1
- PP25-SN27812; [d=0,5 mm]
- 11 - 40 AFSC 1
- PP25-SN27812; [d=0,5 mm]



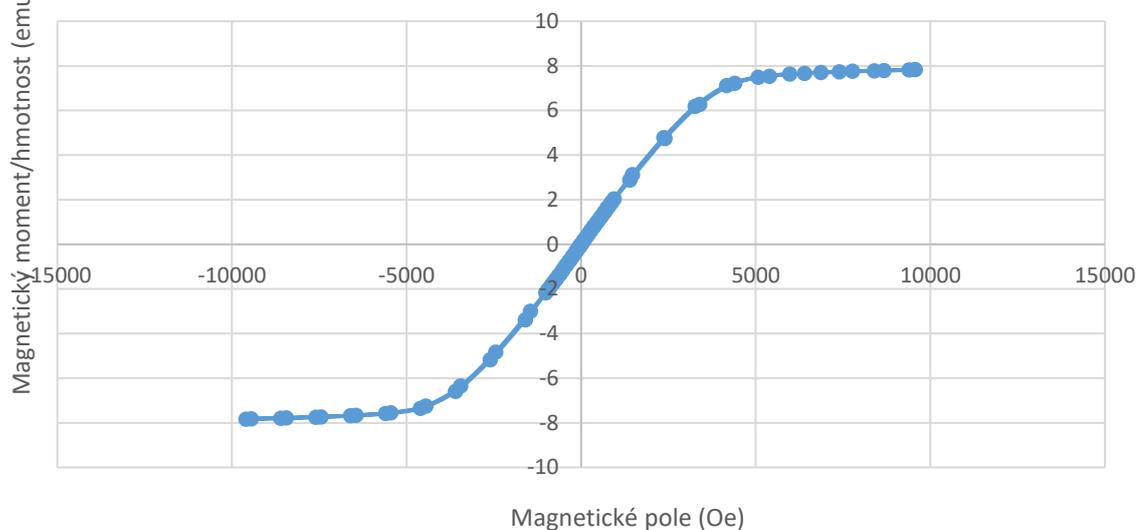
PŘÍLOHA P IV: MĚŘENÍ NA MAGNETOMETRU



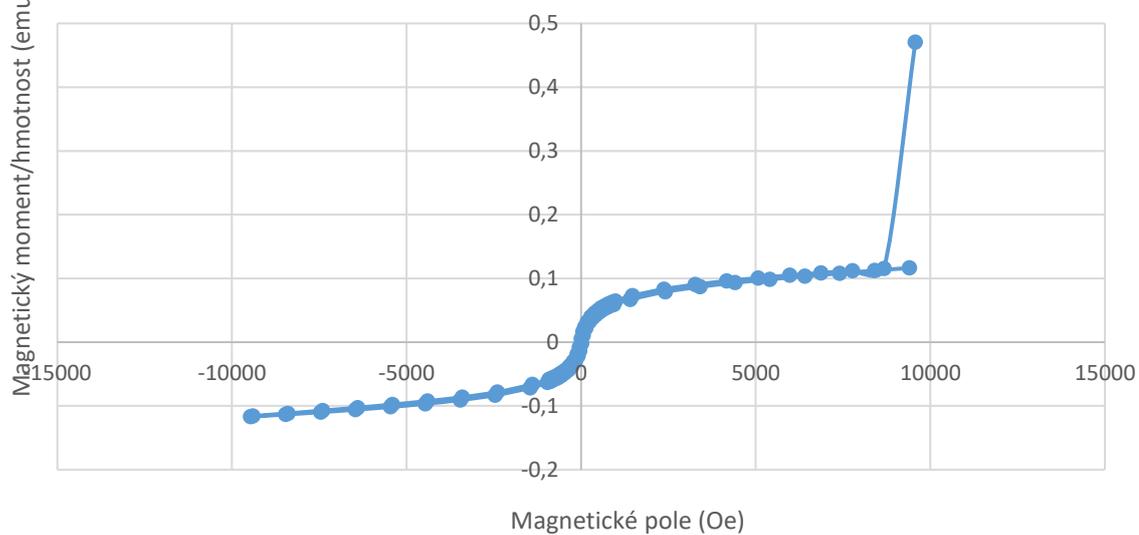
Křivka magnetického momentu (emu/g) vs magnetické pole (Oe) pro materiál PBT + 20 % AFSC



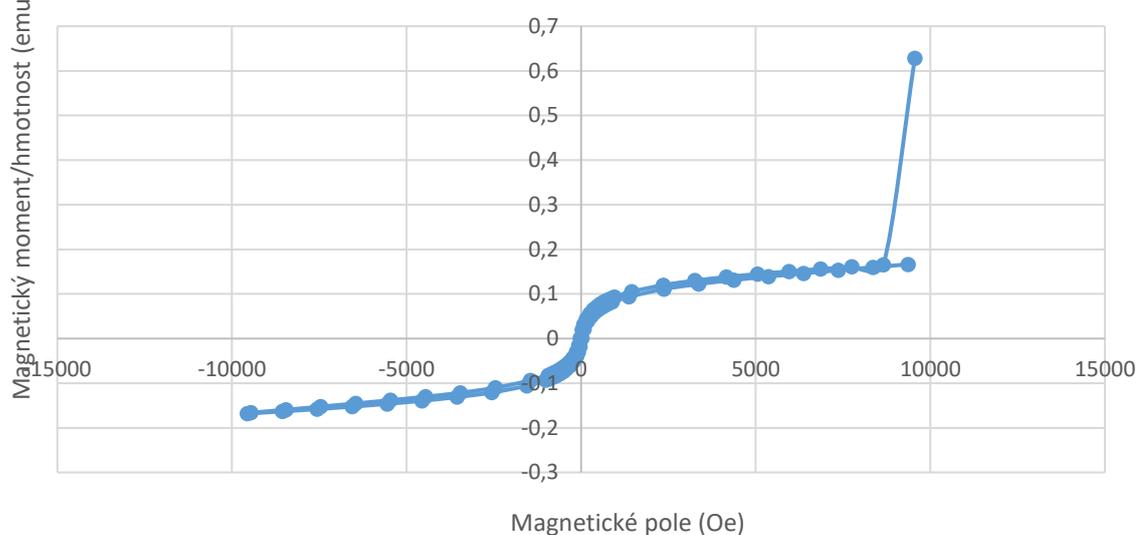
Křivka magnetického momentu (emu/g) vs magnetické pole (Oe) pro materiál PBT + 40 % AFSC



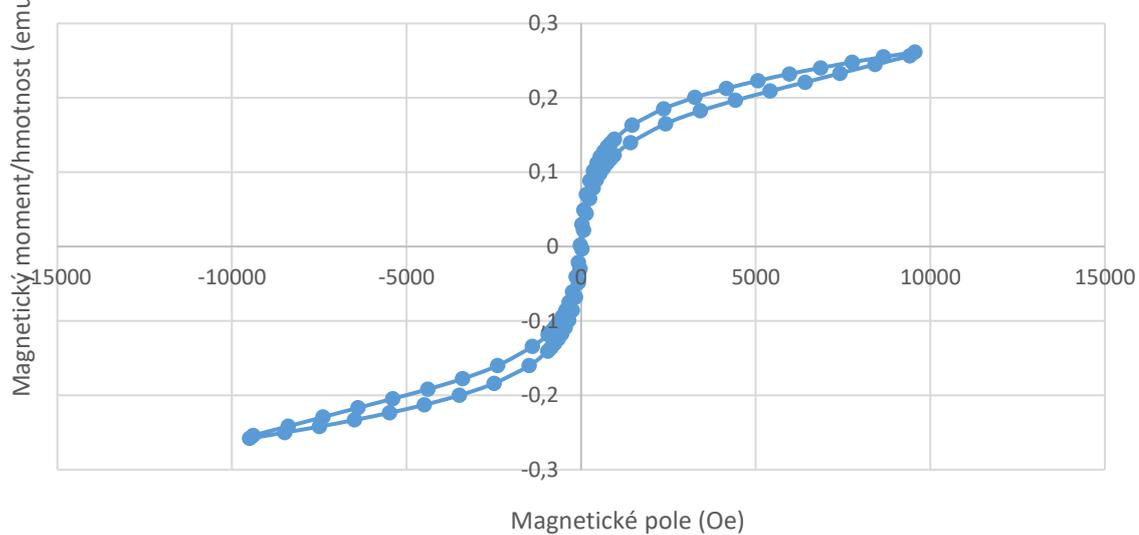
Křivka magnetického momentu (emu/g) vs magnetické pole (Oe) pro materiál PBT + 5 % M33



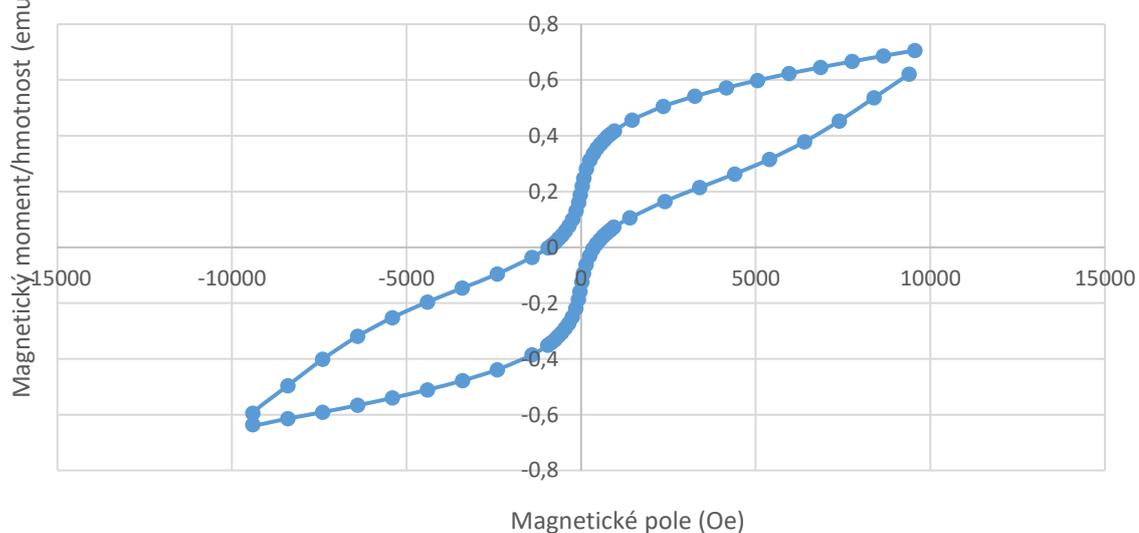
Křivka magnetického momentu (emu/g) vs magnetické pole (Oe) pro materiál PBT + 10 % M33



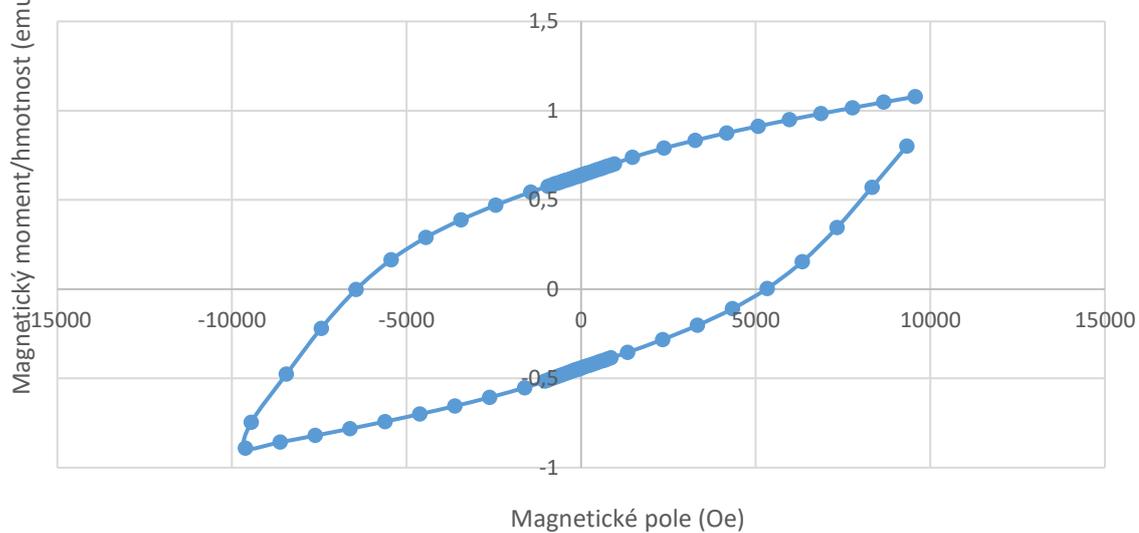
Křivka magnetického momentu (emu/g) vs magnetické pole (Oe) pro materiál PBT + 20 % M33



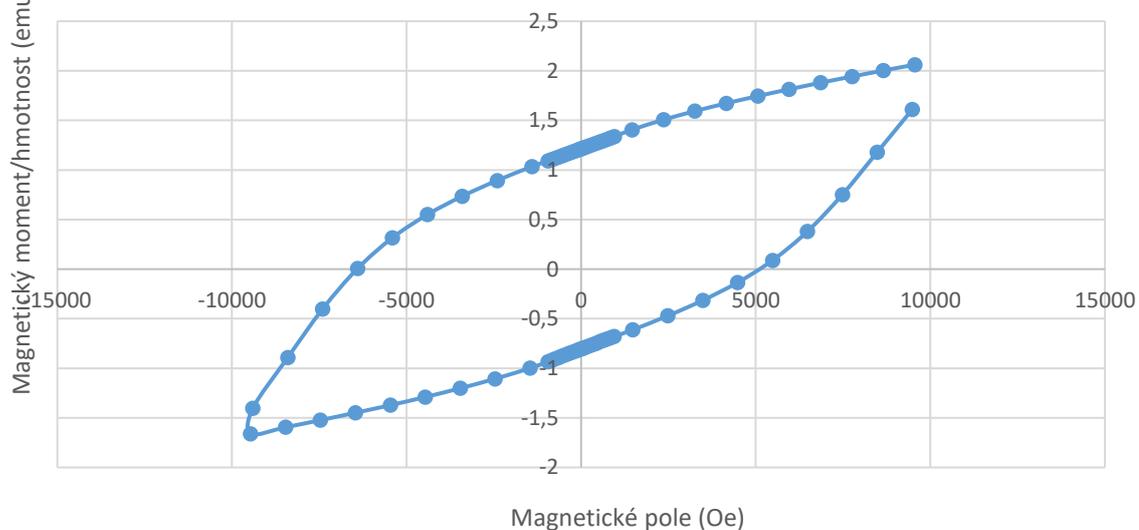
Křivka magnetického momentu (emu/g) vs magnetické pole (Oe) pro materiál PBT + 40 % M33



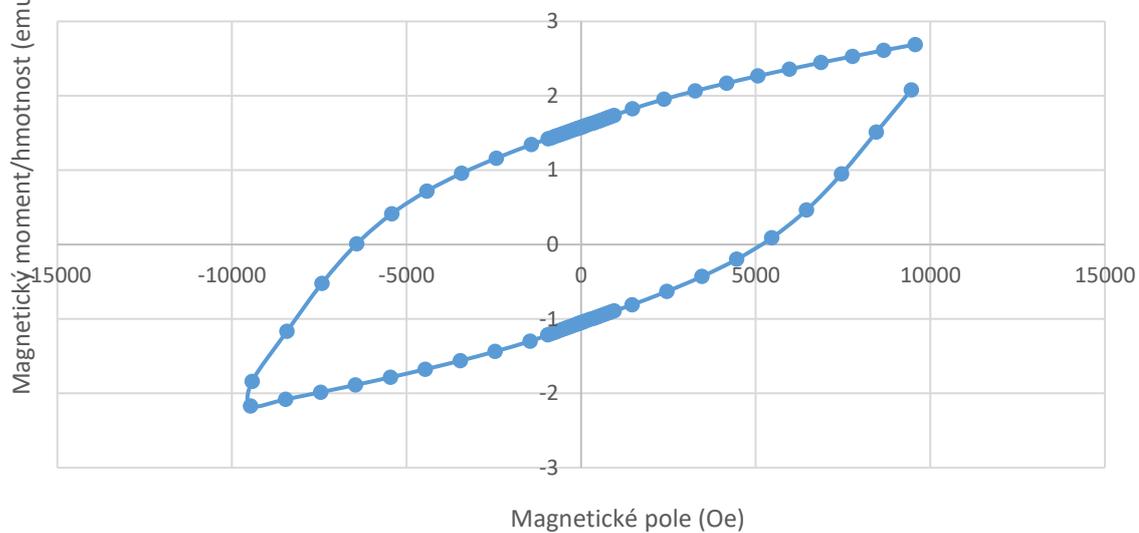
Křivka magnetického momentu (emu/g) vs magnetické pole (Oe) pro materiál PBT + 5 % MQP



Křivka magnetického momentu (emu/g) vs magnetické pole (Oe) pro materiál PBT + 10 % MQP



Křivka magnetického momentu (emu/g) vs magnetické pole (Oe) pro materiál PBT + 20 % MQP



Křivka magnetického momentu (emu/g) vs magnetické pole (Oe) pro materiál PBT + 40 % MQP

