

3D tisk magnetoreologických elastomerů metodou FFF

Filip Jemelka

Bakalářská práce
2025



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

Akademický rok: 2024/2025

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: Filip Jemelka
Osobní číslo: T22557
Studijní program: B0788A270001 Procesní inženýrství
Forma studia: Prezenční
Téma práce: 3D tisk magnetoreologických elastomerů metodou FFF

Zásady pro vypracování

- Vypracujte literární rešerši na téma magnetoreologických systémů
- Příprava kompozitní struny dle zadání
- Příprava vzorků magnetoreologických elastomerů pomocí 3D tisku využívajícího FFF metodu
- Analýza magnetických vlastností připravených vzorků
- Vyhodnocení a srovnání získaných výsledků

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

Seznam doporučené literatury:

1. MUNTEANU A., RONZOVÁ A., KUTÁLKOVÁ E., DROHSLER P., MOUČKA R., KRÁČALÍK M., BÍLEK O., MAZLAN S.A., SEDLAČÍK M. Reprocessed magnetorheological elastomers with reduced carbon footprint and their piezoresistive properties. Scientific Reports, 2022, vol. 12, no. 1, art. no. 12041.
2. BASTOLA A.K., HOSSAIN M. A review on magneto-mechanical characterizations of magnetorheological elastomers. Composites Part B-Engineering, 2020, vol. 200, art. no. 108348.
3. BASTOLA A.K., HOANG V.T., LI L. A novel hybrid magnetorheological elastomer developed by 3D printing. Materials & Design, 2017, vol. 114, s. 391–397.

Vedoucí bakalářské práce: **prof. Ing. Michal Sedláček, Ph.D.**
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání bakalářské práce: **2. ledna 2025**
Termín odevzdání bakalářské práce: **16. května 2025**

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

L.S.

doc. Ing. Martin Bednařík, Ph.D. v.r.
ředitel ústavu

Ve Zlíně dne 6. února 2025

PROHLÁŠENÍ AUTORA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Beru na vědomí, že

- odevzdáním bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., v platném znění bez ohledu na výsledek obhajoby;
- bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému a bude dostupná k nahlédnutí;
- jedno vyhotovení bakalářské práce v listinné podobě bude ponecháno Univerzitě Tomáše Bati ve Zlíně k uložení;
- na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- 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 mohu užít své dílo – bakalářskou práci – nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- pokud bylo k vypracování bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tj. k nekomerčnímu využití), nelze výsledky bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- pokud je výstupem bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá; neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Prohlašuji, že

- jsem na bakalářské práci pracoval(a) samostatně a použitou literaturu jsem řádně citoval(a); v případě publikace výsledků budu uveden(a) jako spoluautor;
- odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou obsahově totožné.

Ve Zlíně, dne

.....
podpis autora

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá výrobou magnetoreologického kompozitního materiálu, který patří mezi chytré materiály. Materiál se skládá z termoplastického elastomeru, který je obohacen o magnetické mikročástice, které materiálu dodávají jeho magnetické vlastnosti.

Teoretická část práce se zabývá tématy 3D tisku, kompozitních materiálů, rozdělení plastů a taktéž samotných magnetoreologických elastomerů.

Praktická část je zaměřena na výrobu filamentu z magnetoreologického elastomeru o různé koncentraci magnetického plniva. Dané vzorky jsou podrobeny zkoušce magnetických vlastností. Jednotlivé filameny jsou použity k výrobě zkušebních těles na 3D tiskárně metodou FFF, kdy je hodnocena jak zpracovatelnost filamentů, tak také výsledné mechanické vlastnosti připravených zkušebních vzorků.

Klíčová slova: 3D tisk, magnetoreologický elastomer, tavení nanášením vlákna, kompozitní materiál, chytrý materiál

ABSTRACT

This bachelor's thesis focuses on the production of a magnetorheological composite material, which belongs to the category of smart materials. The material consists of a thermoplastic elastomer enriched with magnetic microparticles that impart magnetic properties to the material.

The theoretical part of the thesis deals with topics such as 3D printing, composite materials, the classification of plastics, and magnetorheological elastomers themselves.

The practical part is focused on the production of filament made from magnetorheological elastomer with varying concentrations of magnetic filler. The samples are subjected to tests of their magnetic properties. The individual filaments are then used to produce test specimens using the FFF 3D printing method, during which both the processability of the filaments and the resulting mechanical properties of the prepared test samples are evaluated.

Keywords: 3D printing, magnetorheological elastomer, fused filament fabrication, composite material, smart material

Chtěl bych tímto poděkovat prof. Ing. Michalu Sedláčikovi Ph.D. za jeho rady a trpělivost při vypracovávání bakalářské práce. Také bych chtěl poděkovat Ing. Martinu Možíšovi za jeho přípravu a ochotu. Na závěr bych chtěl poděkovat své rodině za podporu v období mého studia.

OBSAH

ÚVOD.....	11
I TEORETICKÁ ČÁST	12
1 3D TISK.....	13
1.1 METODA FFF/FDM.....	13
1.1.1 Části tiskárny.....	15
1.1.2 Materiál	16
1.2 METODA SLS / DMLS	18
1.3 METODA SLA	19
1.3.1 Použití	20
1.4 METODA SLM.....	20
1.5 METODA LOM	20
1.6 BINDER JETTING	21
1.7 METODA RLP.....	22
1.7.1 Použití	23
2 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY	24
2.1 MATRICE.....	24
2.1.1 Materiál matrice	24
2.2 VÝZTUŽ.....	25
2.2.1 Materiál	25
2.3 VÝROBA	26
3 ROZDĚLENÍ PLASTŮ	27
3.1 TERMOPLASTY.....	27
3.2 REAKTOPLASTY.....	27
3.3 ELASTOMERY	27
3.4 TERMOPLASTICKÉ ELASTOMERY	27
4 MAGNETOREOLOGICKÉ MATERIÁLY	29
4.1 VLASTNOSTI	29
4.2 ROZDĚLENÍ MATERIÁLŮ	29
4.3 RECYKLACE.....	30
II PRAKTICKÁ ČÁST.....	32
5 FILAMENT S MAGNETOREOLOGICKÝMI VLASTNOSTMI	33
5.1 VÝBĚR MATRICE A PLNIVA	33
5.2 PŘÍPRAVA MATERIÁLU	34
5.3 VÝROBA FILAMENTU	36

5.4	TISK.....	38
5.5	MAGNETOREOLOGIE.....	41
5.5.1	TPU F98A + 10 a 20 hm.%.....	44
5.5.2	TPU F98A + 30 hm. %.....	45
5.5.3	TPU F98A + 40 hm.%.....	47
5.5.4	Vyhodnocení výsledků.....	48
ZÁVĚR.....		50
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....		52
SEZNAM OBRÁZKŮ		57
SEZNAM TABULEK.....		58
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK		59

ÚVOD

V nynější době patří 3D tisk mezi jednu z inovativních a perspektivních metod, rozvíjí kreativitu a umožňuje vytisknout jakékoli tvary a geometrie. Pod technologií 3D tisku patří několik metod, které jsou dále rozebírány v Teoretické části práce. Každá z těchto metod má svoje klady a zápory, které definují její technické parametry a specifické aplikace. Metody se liší hlavně použitým tiskovým materiálem a dále jejich postupem k zhotovení výsledného objektu. Všechny metody 3D tisku se označují taky jako „Rapid Prototyping“, jelikož umožňují rychlou a dnes i konkurenceschopnou výrobu prototypů a výrobků.

Metoda FFF (FDM) z těchto metod vyčnívá nejvíce, pro svoji dostupnost a univerzálnost. Zejména z hlediska dostupnosti a jednoduchosti se dostala k rukám nejen velkých firem, ale taky jednotlivcům, kteří stroje (tiskárny) pro tuto metodu zdokonalovali a tím se staly rychlejší a dokonalejší. Její velkou výhodou je také možnost tisku z různých materiálů, mezi které patří také kompozitní materiály, jež oproti standardním plastům, kromě lepších tepelných i mechanických vlastností, mohou mít dodatečně i elektrické a magnetické vlastnosti.

Kompozitním materiálem se vyznačuje materiál tvořený ze dvou nebo více materiálů, kdy se jeho výsledné materiálové vlastnosti zvyšují nad součet jednotlivých složek díky synergickému efektu. Do kategorie kompozitních materiálů patří také magnetoreologické elastomery, jež můžeme označit jako chytré materiály, kdy při vystavení vnějšímu vlivu, v tomto případě působení magnetického pole, mění své vlastnosti. Velký potenciál by mohly tyto kompozity mít v technologii 3D tisku, a to právě díky možnosti tisku složitých tvarů a geometrií při možnosti využití širokého spektra materiálů. Proto se Praktická část zabývá přípravou kompozitní směsi tvořené matricí z termoplastického polyuretanu a plniva v podobě magnetického prášku karbonylového železa, dále pak výrobou filamentu, samotným 3D tiskem, a na závěr analýzou magnetických vlastností.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 3D TISK

Tradiční technologie strojírenství zahrnují obrábění materiálu, nazývají se tedy subtraktivními metodami, kdy dochází k postupnému odebírání materiálu z opracovávaného obrobku, zatímco u technologie 3D tisku se pro výsledný výrobek naopak musí materiál přidávat. 3D tisk je tedy aditivní metodou, kdy je výchozí materiál ve formě prášku, filamentu či pryskyřice nanášen a následně po udělení finálního tvaru ztuhne. 3D tisk se také někdy označuje jako „Rapid Prototyping“, což jsou metody rychlé výroby prototypů, které umožňují zkrácení času uvedení výrobku na trh a snížení jeho nákladů. Během tohoto procesu dochází k výrobě prototypu a následnému návrhu postupu při výrobě. Firmy považovaly prvotní prototypování jako složitý, zdoluhavý a nákladný proces, proto z počátku nebyly nové produkty nebo kreativní nápady uplatňovány na obecném trhu. Rapid Prototyping tento proces prototypování urychluje. Zlepšení přesnosti a materiálových vlastností prototypů způsobilo průlom v testování, přípravě nástrojů, výroby a dalších oblastech. [1-8]

3D tisk jako takový zahrnuje několik metod, které se od sebe liší nejčastěji skrz podobu materiálu nebo způsobem zafixování tvaru. Vzhledem k tomu má každá metoda svoje klady a zápory a z toho důvodu se vyvinuly pro specifické účely. Všechny metody mají jedno společné, a to, že postupně pokládají materiál vrstvu po vrstvě, aby dosáhly výsledného tvaru. [2-8]

První průlom v 3D tisku byl v roce 1983, kdy Charles Hull vynalezl metodu stereolitografie, dále v roce 1984 Dr. Beaman a Carl Deckard začali pracovat na metodě Selective Laser Sintering (SLS). Až v roce 1989 vynalezl Steven Scott Crump nejpopulárnější a nejznámější metodu 3D tisku Fused Deposition Modeling (FDM). [17-19]

Metody 3D tisku mají v posledních pár letech velkou pozornost. Využívají se v mnoha odlišných odvětvích, kde způsobily velkou změnu v prototypování a designu nových produktů. [3-6]

1.1 METODA FFF/FDM

Fused Filament Fabrication (FFF) / Fused Deposition Modeling (FDM) je nejrozšířenější metoda 3D tisku pro veřejnost. Výchozím materiálem je plast ve formě struny, který je roztaven a nanášen vrstvu po vrstvě. [2,9]

Oproti pryskyřici či práškovým metodám je jednodušší a bezpečnější. Levnější cena tiskárny je dalším pozitivem této technologie. Jednoduché tiskárny jsou v řádech tisíců korun, pro náročnější uživatele mohou ceny tiskáren dosahovat řádů statisíců až milionů. [2,9]

U metody FFF se tok horkého roztaveného materiálu vytlačovaného přes trysku pokládá na tiskovou podložku. Samotný extrudér FFF 3D tiskárny lze přirovnat k pístovému vytlačovacímu stroji, filament zde slouží jako píst i tiskový materiál. Roztavený filament se po opuštění prostoru trysky a depozici na tiskovou podložku ochlazuje a tvoří tak vrstvu, která slouží jako podklad pro další vrstvu materiálu. Pro spojení nově pokládané vrstvy s předešlou, je nutno udržovat jejich teplotu nad bodem tuhnutí termoplastického materiálu, což je obzvláště důležité pro co největší pevnost výtisku. [2,10]



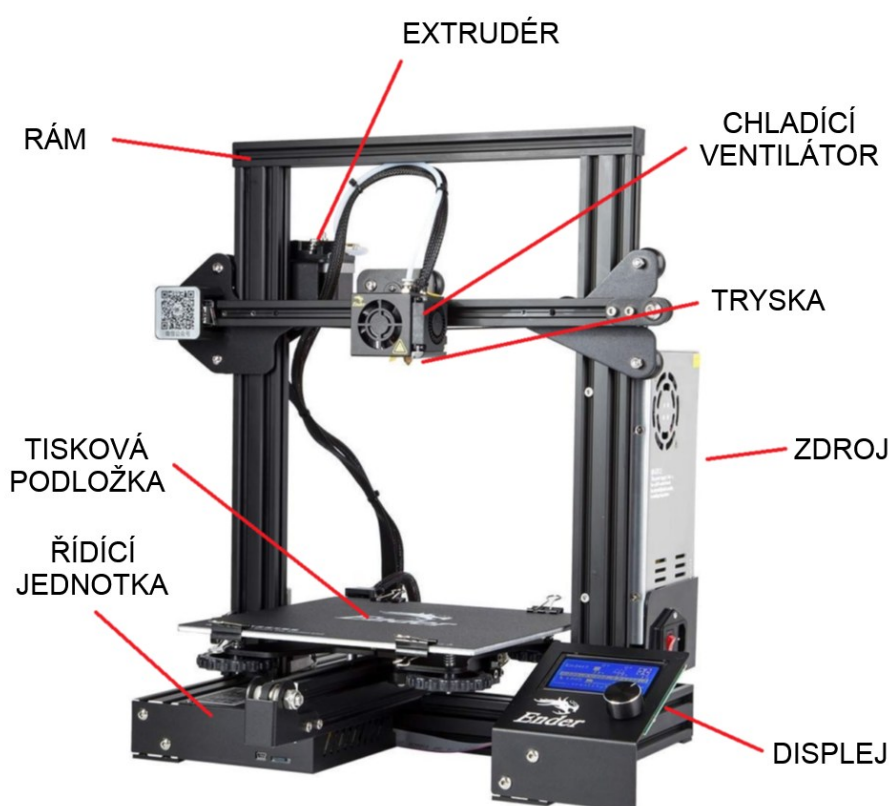
Obrázek 1 Steven Scott Crump představuje technologii FDM [11]

Steven Scott Crump si patentoval tuto technologii a založil si společnost Stratasys. Trvalo několik let, než vyrobil funkční stroj na FDM, který byl uplatnitelný na trhu. První model byl oproti současným tiskárnám mnohem dražší, měl hodnotu 130 000 dolarů, a proto si ostatní firmy tento model nemohly dovolit. Tyto modely byly podobně velké jako lednice, avšak jak se tiskárny zdokonalovaly a zmenšovaly čím dál více firem mělo zájem o tyto stroje. Firma Stratasys má pod sebou několik malých firem jako IBM Rapid Prototyping Division nebo MarkBot Industries. Největší vývoj FDM tiskáren začal po vypršení patentu Stratasysu v roce 2009, kdy, jakmile tento patent vypršel ostatní společnosti mohly začít s výrobou 3D tiskáren založených na této metodě. V roce 2005 Dr. Adrian Bowyer v open source projektu The RepRap přejmenoval tuto technologii na metodu Fused Filament Fabrication. Svoji první tiskárnu pojmenoval Darwin v roce 2007, jeho další tiskárna byla pojmenována Mendel. Zdokumentoval části tiskárny a následně je poskytl veřejnosti, aby se

dále vyvíjela. V České republice Josef Průša v roce 2010 vydal svůj model „Prusa Mendel“. [4,6]

1.1.1 Části tiskárny

Extrudér či tisková hlava slouží k nanášení vrstev materiálu na podložku. Vyhřívaná podložka tiskárny je důležitou součástí, zabraňuje kroucení materiálu s velkou tepelnou roztažností. Krokové motory zajišťují přesné pohyby extrudéru a tiskové podložky skrz velikost kroku, která je dána v programu. Řídící jednotka se stará o chod celé tiskárny a při tisku, zpracovává G-KÓD podle kterého řídí pohyby všech motorů, podložky a trysky. [2,9]



Obrázek 2 Tiskárna Creality Ender [12]

Existují různé druhy těchto tiskáren, kdy kartézské tiskárny (Obrázek 2), jsou nejvíce používané. Mají 3 osy (x,y,z) které jsou na sebe kolmé a několik částí tiskárny se pohybuje podle těchto os. Dále se kartézské tiskárny dělí na takzvané „Bed Slingery“ a „CoreXY“, kdy v případě prvního zmíněného se extrudér pohybuje v ose X a Z a podložka v ose Y, z toho důvodu právě takový název, tedy „létající podložka“. Extrudér tiskáren „CoreXY“ se pohybuje v osách X a Y, zatímco podložka v ose Z. U „Bed Slingerů“ je výhodou jednoduchost, avšak neumožňují tak rychlý tisk jako u konstrukce „CoreXY“, a to z důvodu setrvačných sil a vibrací, které vznikají rychlým pohybem relativně těžké tiskové podložky.

Přestože jsou kartézské tiskárny hodně používané, nejsou jediné tiskárny na trhu, jsou zde i nekartézské tiskárny jako Deltabots. [2,6]

1.1.2 Materiál

Filament se obvykle dodává v cívkách nebo (cartridge) kazetách o různých hmotnostech, s průměrem od 1,75 mm do 3 mm. Materiál se rozežřeje na teplotu tavení a dále se pokládá vrstvu po vrstvě k zhotovení výrobku. [6]



Obrázek 3 Prusament PLA [13]

S oblibou 3D tiskáren se na trhu objevují stále nové materiály v různých barvách a se specifickými vlastnostmi. Velmi populární jsou například kyselina polyléčná (poly lactic acid) PLA, dále univerzální polyethylen tereftalát glykol (PETG), polykarbonát (PC) Carbon Fiber, kdy každý z těchto materiálů má specifická tisková nastavení a závisí též na výrobci filamentu. [2,9]

PLA je nejvíce používaný filamentem, jelikož se dobře tiskne a má estetický povrch. Je vhodný pro detailní a malé výrobky, při tisku nevzniká zápach, má malou teplotní roztažnost, při tisku se nekrouť a neodlepí se od tiskové podložky. Prodává se ve velkém barevném spektru, kdy je navíc jedním z nejlevnějších materiálů. Vyrábí se z obnovitelných zdrojů, jako je kukuřičný škrob, tapioka nebo cukrová třtina. PLA má taky nevýhody, je křehký, při mechanickém namáhání tedy praská, je málo tepelně odolný, měkne přibližně už od 55 °C, ze standardně používaných materiálů je také nejméně odolný proti povětrnostním vlivům, zejména UV záření. [9,10]

Alternativou jsou materiály PETG, akrylonitril styren akrylát (ASA) a PC, kdy všechny 3 materiály jsou oproti PLA pružnější a při mechanickém namáhání se do určité míry jen ohnou bez prasknutí. U materiálů ASA a PC je však problematický tisk, a to z důvodu jejich velké tepelné roztažnosti, kdy se krouť a odlepují od tiskové podložky, tj. čím je model větší, tím je tisk náročnější. Při tisku ASA vzniká silný zápach oproti PLA. PETG má ve srovnání s PLA lesklejší povrch. [9,10]

Akrylonitril butadien styren (ABS) je amorfni polymer tudíž nemá bod tání a bod tuhnutí má při 100 °C. Byl první dostupný tiskový materiál, kdy s vývojem 3D tisku se nabídka materiálu měnila a neustále se vylepšovaly tiskové vlastnosti materiálů. ASA je nástupcem ABS, většinu vlastností mají stejnou, ASA je oproti ABS UV stabilní, a tedy odolnější vůči světelnému záření, má lepší teplotní roztažnost a lépe se tak tiskne. Nejpopulárnější vlastností ASA a ABS je vyhlazení výrobků pomocí acetonových výparů. Polykarbonát se tiskne o něco hůře než ASA, za to má skvělou mechanickou a chemickou odolnost. [9,10]

FLEX je skupina materiálů, do které spadá termoplastický polyuretan (TPU), termoplastický elastomer (TPE), termoplastický polyester elastomer (TPE-E). Vyznačují se svojí ohebností, chovají se podobně jako guma. Při mechanickém namáhání nepraskají, ale ohýbají se. Prodávají se v několika stupních tvrdosti a tisk je tím náročnější, čím je filament měkčí. [9]



Obrázek 4 Klíč vytištěný z TPU [14]

Plněné kompozitní materiály se skládají z polymerní matrice a z výztuže, která plast vyplňuje. Plnivem mohou být kovové prášky, různá vlákna nebo dřevo. Volba plniva závisí na požadovaných vlastnostech materiálu. Mezi vláknové výztuže patří například uhlíková, skelná, kevlarová a další vlákna, jež primárně zlepšují mechanické vlastnosti. Nejběžnějším

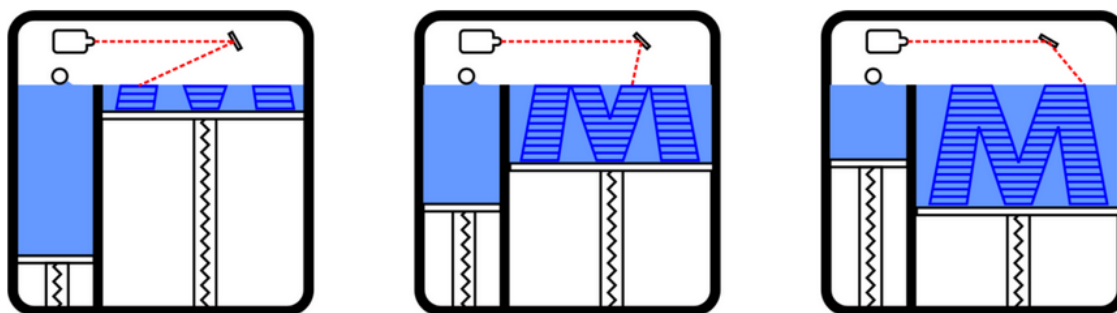
plnivem jsou uhlíková vlákna, která dodávají materiálu jeho rozměrovou stabilitu, zvýšenou teplotní odolnost, odolnost proti otěru a další. Tyto materiály jsou však výrazně dražší a je na ně potřeba tryska ze tvrzené oceli. [3,9]

Podpěrám se snažíme při tisku co nejvíce vyhýbat, ale ne vždy se to povede. Podpěry se většinou tisknou ze stejného materiálu jako samotný výrobek a poté se odlomí. Povrch výrobku v místech podpor je proto zvlněný a hrubý (zůstávají na něm části podpor). Jiný způsob pro tiskárny s jednou tryskou a jedním filamentem neexistuje. [3,9]

Existují však tiskárny, které umí tisknout ze dvou nebo více materiálů zároveň. Otevírá se tím možnost použití jiného materiálu pro tisk podpěr než pro tisk výrobku. A proto tu jsou rozpustné materiály polyvinyl alkohol (PVA) a butenediol vinylalkoholový kopolymer (BVOH), které umožňují zbylé části podpor po ulomení rozpustit. Oba materiály PVA a BVOH jsou rozpustné ve vodě a používají se spolu s PLA. Houževnatý polystyrén (HIPS) je podpůrný materiál, který je rozpustný v acetonu, vhodný pro tisk spolu s PETG. [3,9]

1.2 METODA SLS / DMLS

Při metodě SLS se pomocí válce nanáší část materiálu ve formě prášku, ten se poté slinuje laserem. Nakonec se celý výrobek zasype tiskovým materiálem. Při výrobě dutého modelu se musí vytvořit otvory pro vysypání nevytvrzeného materiálu. Nevytvrzený materiál lze opětovně použít, a proto je odpad při této metodě minimální z důvodu znovupoužití nevytvrzeného materiálu. Tyto tiskárny ovšem nejsou tolik rozšířené v porovnání s FFF/FDM tiskárnami, zejména kvůli jejich vyšší ceně, která začíná na statisících. Další nevýhodou je pak celková náročnost údržby a provozu. [2,9]



Obrázek 5 Princip technologie SLS [15]

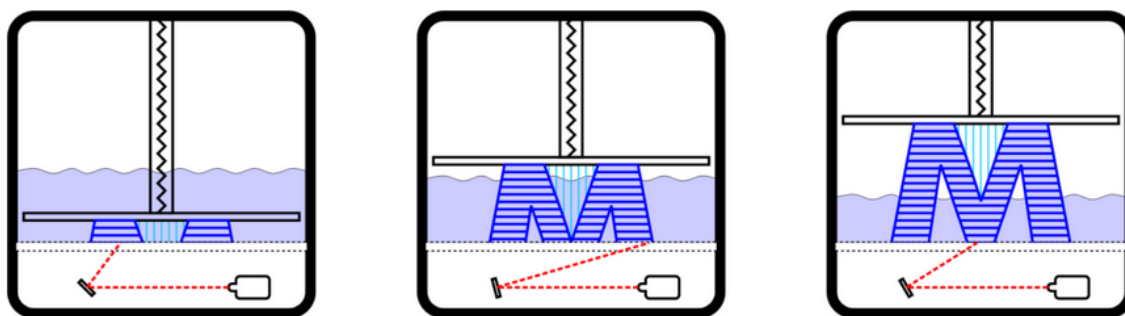
Pod tuto metodu spadá ještě několik dalších metod, jako například Electron Beam Melting (EBM), která používá elektronový paprsek s vysokou energií elektronů a tím

dochází k lokálnímu roztavení tenké vrstvy práškového materiálu a následnému ztuhnutí. [2,3,8]

Další metoda 3D tisku SLS, byla vynalezena Dr. Carlem Deckardem 1987, kdy jeho myšlenka byla taková, že použije laser nebo paprsek elektronů, aby spojil k sobě malé částice plastu. Dr. Beaman (jeho profesor) s tímto souhlasil a pomohl tuto metodu zdokonalit. Po mnoha pokusech oba dokázali sestrojít funkční stroj. S grantem od National Science Foundation, svůj design zdokonalili a poté se univerzita spojila s firmou Nova Automation, kdy společně sestrojili několik druhů strojů, z nichž jeden se jmenoval „Bambi“. Firma Nova Automation se přejmenovala na DTM. První tiskárny pro veřejnost se začaly prodávat v roce 1989. Firma DTM pokryla veškerý trh s tiskárnami na principu SLS, kdy výrobky jsou kvalitní a nepoužívají se běžně. V roce 2014 vypršely patenty spojené s metodou SLS. Tím se může dále metoda rozvíjet i v jiných firmách. Po vypršení patentu se tiskárny staly levnější a dostupnější. [4]

1.3 METODA SLA

Stereolitografie (SLA) funguje na principu fotopolymerace. Energie z paprsku laseru je směřována zrcadly a vytvrzuje pryskyřici, kdy jednotlivé vrstvy se na sebe spojují při vytvrzování. Každá vrstva má svůj specifický tvar dle programu. Touto metodou se dají vyrobit výrobky složitých tvarů. Výsledný výrobek se dá již použít a je hodně přesný. [2,16]



Obrázek 6 Princip technologie SLA [15]

Tisk pomocí SLA metody je v porovnání s metodou FFF/FDM výrazně propracovanější. Důležité je v případě tisku co nejvíce zaplnit tiskovou podložku, jelikož každá vrstva se tiskne přibližně stejnou dobu neohledě na velikost objektu. Vytisknutý předmět je hladký a nejsou patrné stopy po vrstvení materiálu. Nevýhodou je toxicita pryskyřice, je zapotřebí se vyhnout kontaktu pokožky s pryskyřicí. [2,9]

Metoda SLA byla prvomyšlenka Charlese Hulla. Stejně jako FDM je založena na pokládání vrstev. Avšak nepoužívá materiál, který při pokojové teplotě ztuhne, tato metoda používá tekutý fotopolymer a laser s ultrafialovým (UV) zářením na vytvrzení. Po dokončení tisku se výrobek vkládá do pece s UV zářením proto, aby se vrstvy k sobě dobře spojily. Charles Hull si tuto metodu patentoval a s pomocí firmy chtěl tiskárny zveřejnit, setkal se však s neúspěchem, a to hlavně proto, že ostatní považovali tuto metodu za nedokonalou a nevhodnou na trh. V roce 1996 došlo několik úprav metody a stala se tak více přístupná pro veřejnost. Výrobky stereolitografie jsou hladší a vypadají profesionálnější než u FDM. To se líbilo několika firmám, které chtěly předměty prodávat nebo vytvářet prototypy velmi vysoké kvality. Jeden z důvodů, proč se SLA nestala veřejně známou, je pro svou cenu tiskárny, která je velice komplikovaná na sestavení, údržbu a opravu. Dále je potřeba odvětrávat výpary z pryskyřice, kdy navíc pryskyřice je sama o sobě dražší materiál než filamenty FDM. [2,4]

1.3.1 Použití

Model po vytištění není vhodný pro okamžité použití. Povrch je lepkavý a je zapotřebí výrobek namočit do alkoholu, aby se zbytky pryskyřice smyly. Je vhodné dále povrch pryskyřice dostatečně vytvrdit UV zářením. Vše je zapotřebí dělat v ochranných rukavicích či za pomoci robotických mechanismů. K tiskárně při koupi mohou být jako volitelné příslušenství dodány mycí a vytvrzovací stanice. [2,9]

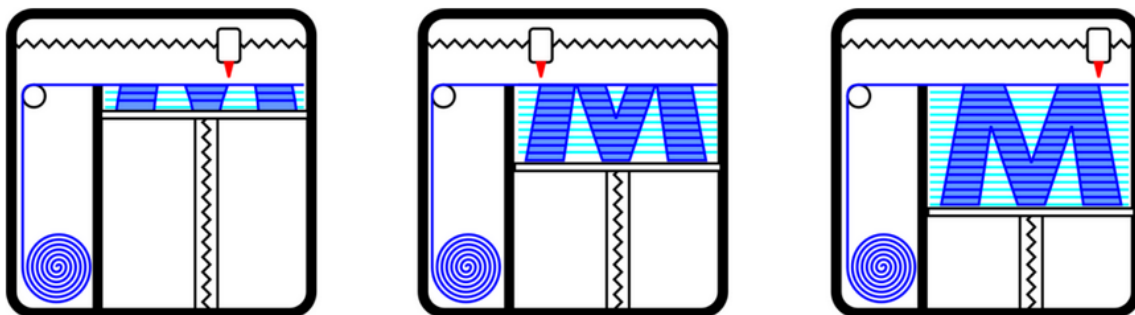
1.4 METODA SLM

Selective Laser Melting (SLM), je nejúspěšnější metoda pro výrobu vysoce přesných a vysoce kvalitních funkčních komponent. Výchozí materiál je ve formě prášku. Prášek absorbuje energii laseru a spéká se v uzavřené komoře. Provozní teplota se pomalu zvyšuje a prášek se čím dál více rozpouští, dokud není dosažena výsledná teplota natolik, aby se prášek spékal. Pokračuje se vrstva po vrstvě, dokud se nevyrobí celý výrobek. Je zapotřebí řídit nespočet výrobních parametrů, aby se dosáhlo cíleného tvaru součástí a zabránilo případným vadám. [2,17]

1.5 METODA LOM

Laminated Object Manufacturing (LOM) je metoda, u které se vrstvy lepidivého papíru či kovové desky spojují teplem a tlakem. Laser je řízený počítačem a vykonává řezání

jednotlivých vrstev, které se postupně slepují do té doby, než je zhotoven požadovaný výrobek. [2,7,8]



Obrázek 7 Princip technologie LOM [15]

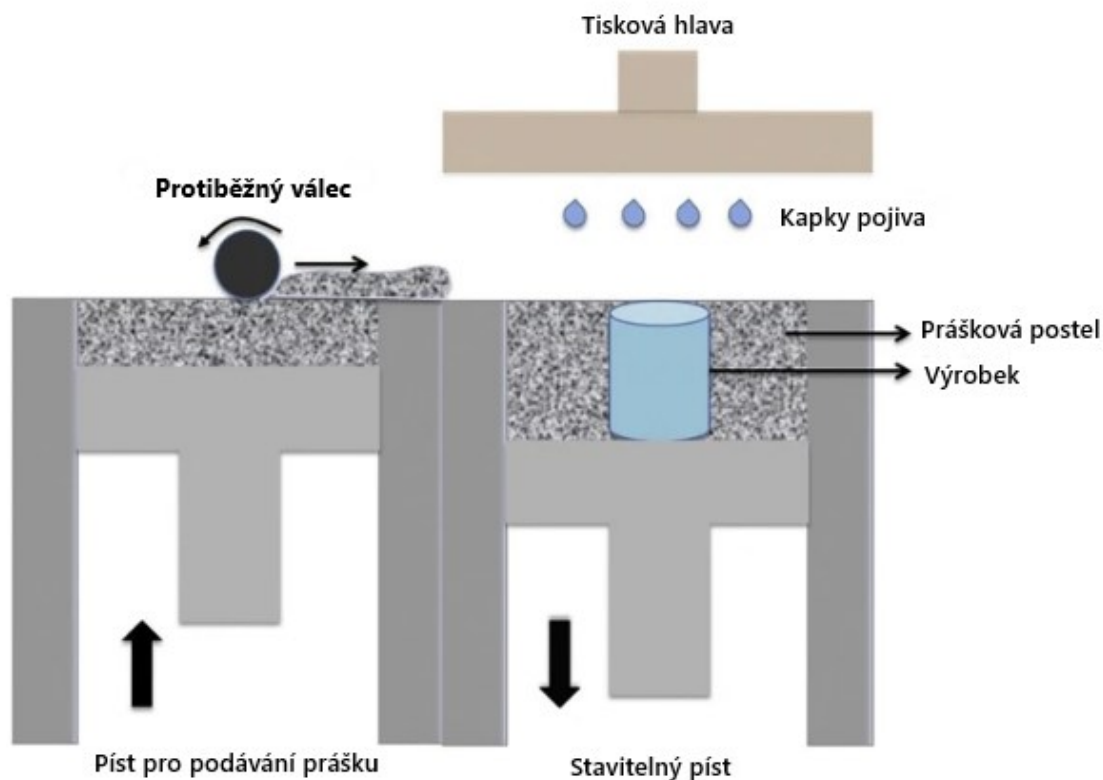
Výchozí materiál musí být ve formě tenkých vrstev, což je jedna z nevýhod. Metoda LOM je o něco horší než metoda SLA či SLS, za to je ale rychlejší a může vytvářet větší součásti se složitou geometrií. Tato metoda je velice jednoduchá, ačkoliv tiskárny pro metodu LOM jsou drahé. Zbytkový materiál lze recyklovat. Jako materiál se používá papír, polymerní fólie nebo kovové lamináty. Tato metoda zahrnuje 3 fáze, první je spojení vrstev k sobě adhezí, následuje stlačení vrstev a poté svaření vrstev k sobě. [2,7,8]

1.6 BINDER JETTING

Binder Jetting, Binder Jet Printing nebo taky Binder Jet 3D printing je metoda, která používá nanášení kapalného pojiva ke spojení částic prášku v místě zdroje tepla (laser nebo elektronový paprsek). V místech, kde je pojivo dochází ke spékání prášku pomocí laseru. Používá se na vzory odlitků, vyhotovení funkčních výrobků. Při této metodě je možné použít několik materiálů jako práškové kovy, písek, polymery, keramiku či hybridní materiály. Tato metoda 3D tisku je velmi jednoduchá, rychlá a levná. Umožňuje tisknout velké výrobky. Při tisku dochází k vytvoření míst nazývaných „zelené“. Tato místa jsou vysoce porózní a vyznačují se malou pevností, proto se vytištěný výrobek následně vkládá do pece. [5,8,17]

Prvním krokem je příprava surového materiálu ve formě prášku, který má být sypký a umožňuje průtok do tištěného prostoru. Výběr materiálu má dopad na kvalitu výrobku. V druhém kroku se materiál vloží na předehřátou podložku pomocí válečku, dále se aplikují kapičky pojiva na určité části rozloženého prášku. Pojivo se skládá z rozpouštědla, které se při vytvrzování vypařuje. Dalším krokem je vytvrzování pomocí laseru či elektronového paprsku. Na vytvrzenou vrstvu se přidává další vrstva a proces se opakuje, dokud se nevytvoří hotový výrobek. Jakmile je součást vytištěná zbytkový prášek kolem součásti je

odstraněn. Po tisku se vloží výrobek do pece (přibližně na teplotu 150-200 °C po dobu 4 hodin), aby se zvýšila jeho pevnost. Finální výrobek nepotřebuje dodatečné úpravy. Další možností pro zvýšení tvrdosti výrobku je infiltrační proces, kdy kapalina, třeba epoxidová pryskyřice, vteče do zelených míst a vyplní je. Tento proces se provádí před vytvrzením v peci. Infiltrační proces se běžně používá pro polymery. [2,5,17]



Obrázek 8 Schéma procesu při Binder Jet 3D printing [17]

1.7 METODA RLP

Rapid Liquid Printing (RLP) je metoda, u které je výrobek hotov do několika minut a dále již výrobek potřebuje pouze další zpracování. Na rozdíl od standardních metod nanášení materiálu po vrstvách se u této metody používá tisk v gelové suspenzi. Pro tisk se mohou použít různé materiály, různých velikostí. Tato metoda používá trysku, ve které se různé materiály chemicky míchají a vytvrzují. [16]

Lze tisknout různými materiály do gelové suspence přiváděné tryskou. Umožňuje výrobu 3D tiskem ve třech rozměrech a složitých rozměrů za poměrně krátkou dobu v porovnání s ostatními metodami 3D tisku. Výrobek po tisku rychle ztuhne, může se okamžitě

použít. Zásadní výhodou je, že při 3D tisku RLP není zapotřebí podpor, není potřeba přebytečného materiálu a minimalizuje se tím plýtvání materiálem. [16]



Obrázek 9 Metoda RLP [18]

1.7.1 Použití

Z prvopočátku měla být metoda RLP zaměřena na výrobu nábytku, avšak postupem času, se začala hodně využívat i v jiných odvětvích průmyslu. Metoda se začala používat ve zdravotnictví pro výrobu zdravotnických potřeb, rozšířila se také na výrobu specializované obuvi, což vedlo se ke zlepšení pohodlí. V leteckém průmyslu se touto metodou vytváří lehké a vysoce pevné komponenty. V automobilkách se touto metodou vyrábí hodně složité díly, které dosud nebylo možné vyrobit. [16]

2 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY

Kompozitní materiály jsou tvořeny ze dvou nebo více složek, jejichž spojením, vlivem synergického efektu, získáme lepší vlastnosti nad rámec součtu vlastností jednotlivých složek. Využívá se především pozitivních vlastností obou složek a minimalizují se jejich nedostatky. Materiál může být stejně tvrdý jako ocel, ale je lehčí. Existuje velká škála kombinací materiálů. Beton je jedním z příkladů, obsahuje v sobě částčky písku a šterku v matrici z hydratovaného cementu. Samotné polymerní kompozity se skládají z polymerní matrice, kontinuální složky, a plniva, diskontinuální složky, v podobě prášku nebo vlákna. Získáváme tak lepší mechanické vlastnosti, zejména u vláken, kde ve směru orientace vláken jsou mechanické vlastnosti výrazně vylepšeny. Zároveň lze také díky lepším mechanickým vlastnostem snížit celkovou hmotnost výrobku, což je důležité zejména ve aerokosmonautice, kde každá ušetřená hmotnost znamená možnost naložení více nákladu. Polymerní kompozity jsou definovány zejména obsahem plniva, tj. koncentrací, která se uvádí buď v hmotnostních, nebo objemových %. [19-22]

2.1 MATRICE

Matrice spojuje plnivo, udává tvar kompozitnímu materiálu a zároveň chrání plnivo před chemikáliemi, UV zářením, vlhkostí, zvýšenou teplotou a jinými vnějšími vlivy. Při namáhání kompozitu matrice také přenáší zatížení na jednotlivá vlákna, čímž umožňuje kompozitu odolávat větším tlakovým, ohybovým či smykovým zatížením, než kterým by odolala matrice samotná. Při volbě matrice je nutné zvážit přilnavost k plnivu, která zajišťuje houževnatost kompozitu. [19-22]

2.1.1 Materiál matrice

Pevnost matrice je nižší než pevnost vláken výztuže. Materiál matrice může ovlivnit vlastnosti výsledného kompozitu zejména skrz velikost napětí v určitých rovinách, poškození nárazem a různé chování při zvýšení teploty či vystavení kompozitu vlhkosti. Materiály matrice mohou být polymerní, kovové či keramické, zde však bude zaměření primárně na polymerní matrice vzhledem k obsahu Praktické části. Termoplasty jsou nereaktivní pevné látky uzpůsobené tak, aby při vhodných podmínkách změkly, roztavili se a aby po ochlazení ztuhly do požadovaného tvaru, což je dáno přítomností fyzikálních vazeb, které drží materiál pohromadě a lze je narušit zvýšenou teplotou, čímž se dostávají do oblasti vhodné pro zpracování. Termosety jsou reaktivní látky složené z organických pryskyřic a

dalších složek, které způsobí vytvrzování. Zde během výroby kompozitu dochází ke vzniku chemických vazeb, které způsobují nevratnost procesu. Kvůli své reaktivní vlastnosti musí být termosety skladované v chladniče, jelikož by při pokojové teplotě mohlo dojít k samovolnému vytvrzení. [19-23]

Mezi nejčastěji využívané materiály se řadí například polykarbonát, polyamid, nebo polyetheretherketony, které se vyznačují výbornými mechanickými vlastnostmi a jsou také značně tepelně odolné. V případě kompozitů určených pro 3D tisk se pro matrici používá nejčastěji ABS, TPU nebo PLA. [21,22,24,25,26]

2.2 VÝZTUŽ

Výztuž, nebo také plnivo v případě práškových částic, je důležitou částí kompozitního systému, jelikož udává mechanické nebo speciální vlastnosti kompozitu. Z hlediska mechanických vlastností je to zejména tím, že dochází k přenosu namáhání z matrice na vlákna. Tato složka kompozitního systému však nemusí pouze vylepšovat mechanické vlastnosti, například vhodnou volbou lze získat polymerní kompozit, který bude elektricky vodivý, nebo bude mít magnetické vlastnosti. Existuje několik různých výztuží a plniv, jako třeba skelné, uhlíkové nebo aramidové vlákna. Prášky lze pak využít například železné, měděné nebo neodymové. [19-22]

2.2.1 Materiál

Skleněná vlákna se vyrábí tažením roztaveného skla do velmi malých vláken. Skleněná vlákna jsou pevná, ale postrádají tuhost. Vlastnosti vláken lze upravit změnou chemického složení skla, avšak se na výrobu kompozitního materiálu používá nejčastěji sklo borosilikátové známé taky jako E-sklo. Může se použít i S-sklo které má lepší vlastnosti než E-sklo, ale jeho vysoká cena omezuje všestranné použití. [19,21,22]

Uhlíková vlákna vyrábí se oxidací a pyrolýzou taženého textilního vlákna jako je například polyakrylonitril. Pevnost uhlíkového vlákna se blíží ke krystalové struktuře grafitu. Vlákna jsou povrchově upravena, aby se zlepšila přilnavost na matrici. Zesilují především pevnost a tepelnou odolnost kompozitu. Kromě vláken se využívají také další strukturní varianty uhlíku, jako třeba grafit, grafen, uhlíkové nanotrubice nebo saze. Tyto plniva při překročení perkolačního prahu, který se liší u každé strukturní varianty, umožňují v kompozitu vedení elektrického proudu. [19,21,22,24,25]

Organická vlákna se vyrábí supertažením v pevném stavu izotropního polymeru. Tato vlákna mají vysokou pevnost oproti anorganickým vláknům a nejsou především křehká. [19]

Známé jsou aromatická polyamidová vlákna známé jako „aramidy“, z nichž je nejznámější Kevlar nebo Twaron. Aramidy mají nabízejí kromě vysoké pevnosti taky flexibilitu. Je extrémně obtížné ho řezat, je nezbytné použít laserové metody či vodní paprsek na ořezávání kompozitů či tkanin, které jej obsahují. Jedinou nevýhodou aramidových vláken je, že jsou velmi citlivé na vlhkost. [19]

Dalším možným plnivem mohou být kovové prášky z materiálů jako třeba měď, železo nebo neodým. Tyto částice opět při překročení perkolačního prahu umožňují vedení elektrického proudu skrz kompozit, avšak zde je vlivem tvaru a kontaktu mezi částicemi nutné mnohem vyšší koncentrace než u uhlíkových plni pro překročení perkolačního prahu. Pro získání elektrické vodivosti se do matrice přidávají nejčastěji měděné prášky, a to hlavně z důvodu jejich vysoké vodivosti. Využití pak v případě 3D tisku nachází při výrobě senzorů, antén a podobné drobné elektroniky. Železné prášky se pak nejčastěji používají pro propůjčení magnetických vlastností kompozitu. Magnetické vlastnosti prášku lze popsat několika parametry, konkrétně magnetickou saturací, která popisuje, jakého maximálního magnetického nasycení může materiál dosáhnout, remanentní magnetizace, jež popisuje zbytkovou magnetizaci poté, co ustane působení magnetického pole, a koercivita, která charakterizuje sílu nutnou k úplné demagnetizaci. V závislosti na požadovaných magnetických vlastnostech se volí vhodný materiál prášku. Jedním z využívaných železných prášků je karbonylové železo, které nachází aplikaci zejména u MR materiálů a stínění elektromagnetického záření. Prášek je charakteristický vysokou magnetickou saturací a úzkou hysterezní křivkou, která poukazuje na nízkou remanentní magnetizaci. [24-28]

2.3 Výroba

Při výrobě polymerního kompozitu lze jít dvěma cestami, v první řadě přes zvýšenou teplotu nebo přes rozpuštění matrice ve vhodném rozpouštědle. U zvýšené teploty se výztuž nebo plnivo zakomponuje do roztavené matrice ve vícešnekových vytlačovacích strojích nebo hnětacích strojích. V případě využití rozpouštědla se matrice rozpustí a plnivo se opět zakomponuje pomocí míchacího zařízení, kdy po homogenizaci proběhne odpaření rozpouštědla. Výhodou první metody je možnost zpracovávat větší množství materiálu najednou, avšak oproti druhé metodě vzniká v materiálu tepelná historie. [24,25]

3 ROZDĚLENÍ PLASTŮ

Plasty se mohou dělit do několika skupin dle určitých hledisek. Na základně teplotního chování, dle působení teploty na termoplasty, reaktoplasty a elastomery, dle struktury na amorfní, krystalické či semikrystalické, dle druhu přísad plněné a neplněné plasty či dle původu přírodní (organické) a syntetické (anorganické). [30]

3.1 TERMOPLASTY

Jedná se o polymerní materiály, které při zahřívání přechází do plastického stavu a lze je snadno tvářet a zpracovávat. Do tuhého stavu přejdou ochlazením. Při zahřívání nedochází k chemickým reakcím, můžou se termoplasty po ztuhnutí opakovaně zpracovávat. [30]

3.2 REAKTOPLASTY

Oproti termoplastům jsou reaktoplasty tvarovatelné pouze po určitou dobu. Byly nazývané jako termosety. Při teplotní změně měknou a dochází k chemické reakci, která zapříčiní zesíťování (vytvrzení), tento vytvrzený materiál již nelze dále zpracovávat a jeho forma je trvalá, dalším zahříváním dochází k rozkladu hmoty. Reaktoplasty mají vysokou chemickou odolnost. [30,31]

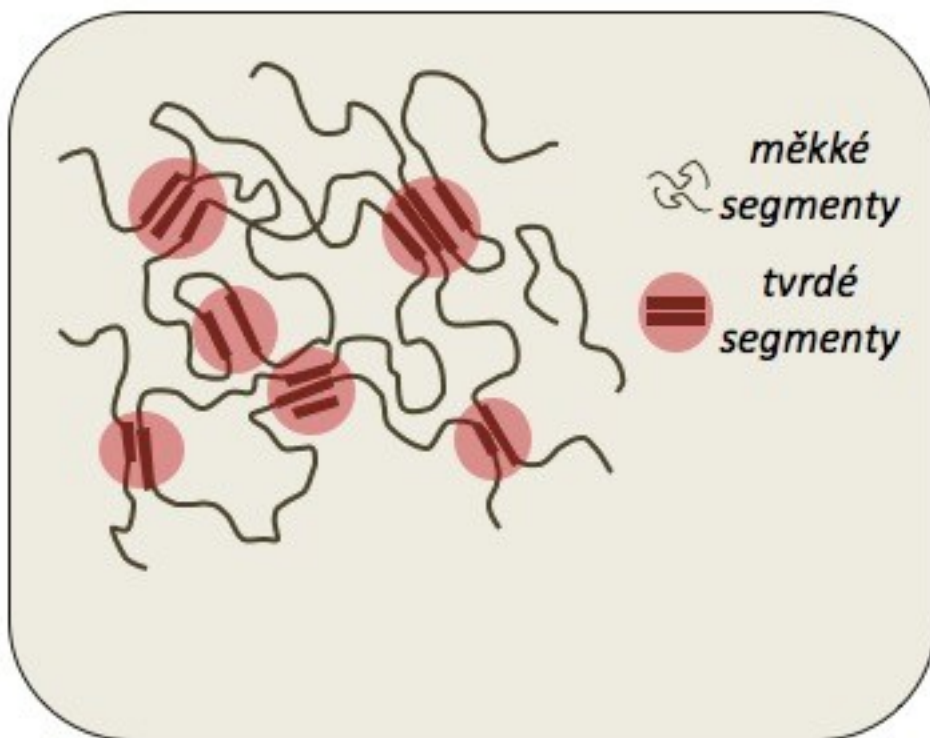
3.3 ELASTOMERY

Jedná se o polymerní materiál, které při zahřívání měknou a lze je tvářet, ale jen po omezenou dobu. Během dalšího zahřívání dochází k chemické reakci a probíhá tzv. vulkanizace. U elastomerů na bázi termoplastů nedochází k chemickým změnám struktury a lze je opakovaně tvářet. [30]

3.4 TERMOPLASTICKÉ ELASTOMERY

Polymerní systémy spadající do termoplastické elastomery (TPE) se vyznačují chováním podobným klasickým elastomerům, zejména tedy elasticitou, avšak lze je zpracovávat opakovaně, stejně jako termoplasty. Je to dáno obsahem měkké elastomerní fáze, která definuje právě elasticitu materiálu, a tvrdé termoplastické fáze, jež funguje podobně jako chemické vazby v elastomerech, v tomto případě však tyto vazby jsou fyzikální a udávají pevnost materiálu. Fyzikální vazby jsou zde stěžejní pro opakovatelnost zpracování. Podle typu tvrdé fáze můžeme tyto materiály dělit do několika skupin, jedná se tak primárně o TPE-S, u kterých dochází ke střídání elastomeru se styrenovými bloky, TPE-E, kde se mezi

elastomery nachází polyesterové bloky, TPE-A, kdy zde se střídají elastomerové bloky s polyamidovými, a nakonec TPE-U, což jsou jedny z nejpoužívanějších z tohoto druhu materiálů a tvrdá fáze se zde skládá z polyuretanu (často jsou označovány jako TPU). [32,33]



Obrázek 10 Struktura TPE [32]

Z hlediska aplikace převzaly TPE nejčastěji funkci po vulkanizovaných kaučucích, u nichž zdoluhavý proces přípravy kaučukových směsí a následné vulkanizace byl jednou z největších nevýhod. Část TPE, zejména těch měkkých, má malou odolnost vůči rozpouštědlům a olejům, tudíž pro styk s takovými kapalinami je nutné využít TPE s polyamidovými nebo polyuretanovými bloky. Obecně lze tyto materiály použít pro výrobu hadiček, těsnění, hnacích pásů, izolace kabelů, dále také nalézají využití v obuvnictví a automobilovém průmyslu. [32,33]

4 MAGNETOREOLOGICKÉ MATERIÁLY

Tyto polymerní kompozity, jenž lze řadit do skupiny chytrých materiálů, mění řízeně své vlastnosti v závislosti i na vnějším magnetickém poli. Umožňují mazání, tlumení sil či přenos tepla. Za poslední desetiletí vzniklo několik magnetoreologických (MR) materiálů, mohou být ve formě magnetoreologické kapaliny (MRF), magnetoreologického gelu, magnetoreologického elastomeru (MRE) či magnetoreologické pěny a očekává se, že se bude jejich vývoj a použití i nadále zvyšovat. [27,28,29,34,35]

4.1 VLASTNOSTI

Magnetoreologický (MR) efekt je měnící se proces a závisí na několika faktorech, jako je síla, teplota a taky na magnetickém poli. Zejména magnetické pole je důležitým aspektem, jelikož umožňuje změnu orientace a pozice magnetických mikročástic, čímž také vede ke změně reologických (obecně mechanických) vlastností. Vliv teploty na MR materiály nemůže být zanedbatelný, teplota úzce souvisí s výkonem MR zařízení. MRE má problémy z hlediska rozptýlení magnetických mikročástic a jejich koncentraci. Zásadní je také tuhost matrice, která by měla být co nejnižší za účelem vyšší míry volnosti pohybu feromagnetických částic, a zachování jejích vlastností před i po aplikaci magnetického pole. Při vysoké koncentraci mikročástic se snižuje její účinnost, jelikož dochází k úbytku viskoelastických oblastí, které právě umožňují pohyb feromagnetických částic. Nejběžnějším plnivem je karbonylové železo (CI), které má vysokou magnetickou saturaci a také nízkou remanentní magnetizaci, tedy se jedná o materiál magneticky měkký, což je důležité pro přesnost řízení MR efektu. [27,28,29,34,35,36]

4.2 ROZDĚLENÍ MATERIÁLŮ

MRF se může měnit z tekutého stavu do pevného stavu v řádu milisekund, změni se tím její viskozita, oproti běžně používaným materiálům, jako je hydraulická kapalina je tohle užitečná vlastnost. U aplikace MRF lze počítat s tichým chodem, velmi jednoduchým ovládáním a rychlou odezvou na změny v působícím magnetickém poli, a to i při znečištění prachem, či jinými částicemi. Avšak i tyto materiály mají své nevýhody, jako například unikání tekutiny, čímž může dojít ke znečištění prostředí, anebo sedimentace feromagnetických částic [28,29,34]

MRF mají nespočet aplikací, jednou z nich je například regulace pohonu pomocí MR zařízení, kde lze vlivem proměnného magnetického pole řídit velikost točivého momentu.

Schopnost přenosu točivého momentu se však bude snižovat se zvyšující se teplotou, proto se při návrhu tohoto zařízení nesmí opomenout rozložení teploty a chlazení. Spojka na bázi MRF se používá v systémech pro oddělení a zapojení hnací soustavy a je také dalším příkladem využití MR efektu. Opět zde je však nutné vzít v potaz vyšší teplotu při chodu takových spojek, což negativně ovlivňuje funkčnost, a je proto nutné účinně rozptylovat teplo. Využívá se zejména v oblasti robotů, u nichž zajišťuje hladký a bezpečný chod. [28,29,34]

Mezi další využití lze zařadit brzdu na bázi MRF, která může poskytnout vyšší brzdný moment, bránit vibracím brzdového pedálu a zlepšit pohodlí jízdy, MRF čerpadlo, které přes regulaci magnetického pole umožňuje přenos tekutiny, a MR mazivo. [28,29,34]

Magnetoreologický gel je druh kompozitního gelu s magnetickým médiem suspendovaný v polymerní gelové matrici. Magnetoreologický gel z hlediska vlastností mezi MRF a MRE. Vlastnosti gelu závisí hlavně na magnetickém poli a mají vynikající ovladatelnost. [28,29,34]

Magnetoreologické elastomery jsou inteligentní materiály, schopné změnit vlastnosti materiálu podle vnějšího magnetické pole. Skládají se z magnetických mikročástic zabudovaných v elastické polymerní matrici a tím patří mezi kompozitní materiály. Nesmíme opomenout působení tepla, změna teploty materiálu může přímo ovlivnit stabilitu kompozitního materiálu. Jako matrice se zde nejčastěji využívá termoplastických elastomerů, které oproti standardním elastomerům umožňují jednodušší výrobu a opakovatelné zpracování. Mohou být využity uvnitř senzorů, nositelných zařízení a robotů, avšak primární aplikací jsou absorbery či izolátory vibrací. Materiály s vyšším obsahem feromagnetických částic lze také používat pro stínění elektromagnetického záření, jelikož tyto částice mají schopnost záření v určitých frekvencích absorbovat. [27,28,29,34,35]

Tlumiče se používají v letectví na rozptyl vibrací a energie. MR tlumiče mají výhodu v širokém nastavení rozsahu tlumení a rychlosti reakce. MR tlumiče jsou zabudovány v odpružení a podvozku. Tlumič MR je schopný zlepšit mechanické vlastnosti budov. [28,29,34]

4.3 RECYKLACE

Používání magnetoreologických materiálů roste, což vyvolává otázku opětovného použití, recyklace a dopad na životní prostředí společně s hospodárností. Jako matrice se používají

nitrilové kaučuky, polyuretany, které představují důležitou složku běžných MRE. Recyklace souvisí hlavně s podobou vazeb, které drží matrici pospolu. Jedná-li se o elastomery, recyklace je velmi složitá, jelikož vazby jsou zde chemické a jejich odstranění komplikované. V případě TPE jsou však vazby fyzikální a lze je narušit zvýšením teploty, tudíž jsou pro recyklaci mnohem vhodnější, avšak s dalším tepelným zpracováním začne u polymeru docházet k tepelné degradaci, tedy se začne snižovat molekulární hmotnost polymeru, což má negativní vliv na vlastnosti polymeru a tím pádem celého kompozitního systému. [28,29,36]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

5 FILAMENT S MAGNETOREOLOGICKÝMI VLASTNOSTMI

Praktická část této bakalářské práce se bude zabývat výrobou filamentu s magnetoreologickými vlastnostmi pro 3D tiskárnu založenou na technologii FFF. Část je tedy rozdělena na několik kapitol, z nichž první se věnuje výběru matrice a plniva, následně další kapitola pojednává o přípravě materiálu, dále je pak kapitola o výrobě filamentu. Čtvrtá kapitola popisuje tisk filamentu na 3D tiskárně a pátá kapitola zkoušení magnetoreologického efektu. V závěru se nachází vyhodnocení výsledků.

5.1 Výběr matrice a plniva

Matrice musí být z materiálu, který je elastický, ale zároveň i tisknutelný. Při vyšší elasticitě, která se u flexibilních filamentů popisuje hodnotou tvrdosti Shore A, může při tisku dojít k namotání filamentu na podávací kolečka nebo tisk nebude vůbec možný. Extrudér 3D tiskárny funguje jako pístový vytlačovací stroj, kde filament je jak píst, tak i materiál. Právě při nižší hodnotě tvrdosti Shore A, tedy vyšší flexibilitě, filament již nedokáže plnit funkci pístu a dochází ke vzpěru, čímž se zneprůchodní extrudér a nedojde k vytlačení materiálu skrz trysku. Nejčastěji se flexibilní filamenty vyrábí z TPU, jehož tvrdost se pohybuje mezi 90A až 98A, nižší tvrdost vyžaduje pak buď mnohem menší rychlost tisku, nebo úpravu konstrukce extrudéru.



Obrázek 11 Estane TPU F98A (vlevo) a prášek karbonylového železa (vpravo)

Pro matrici byl vybrán materiál Estane TPU F98A od společnosti Lubrizol, jehož tvrdost je Shore 98A. Důvodem pro zvolení tohoto materiálu bylo zejména to, že je přímo určený na vytlačování filamentu a následné použití v 3D tiskárnách. Z hlediska tisku je u něj od výrobce daná tisknutelnost při teplotě trysky kolem 230 °C a teplotě podložky 100 °C.

Pro dosažení magnetoreologického efektu je nutné vybrat kovový prášek, který splňuje dvě podstatné podmínky. V první řadě musí mít materiál vysokou magnetickou saturaci, tedy musí být schopný se co nejvíce magneticky nasýtit. Druhou podmínkou je co nejmenší remanentní magnetizace, která po ukončení působení magnetického pole zůstane v materiálu, tedy materiál musí být magneticky měkký. Tato vlastnost je stěžejní zejména z důvodu řízení změn vlastností pomocí magnetického pole, které jakmile přestane působit, tak musí být materiál opravdu nezmagnetizovaný, nikoliv v přechodném stavu se zbytkovou magnetizací. Takové podmínky splňuje právě prášek karbonylového železa se značením CIP CN od společnosti BASF, jehož medián průměru částic se pohybuje mezi 6,5 až 8 μm a čistota prášku dosahuje mimořádných 99,8 % Fe. [37]

5.2 Příprava materiálu

V rámci této kapitoly bude rozebrán postup přípravy materiálu pro výrobu filamentu, tedy od prvotního stanovení navážky přes míchání až nakonec po drcení na velikost vhodnou pro extruzi.

Pro přípravu byly zvoleny 4 koncentrace prášku karbonylového železa, a to od 10 hm. % až po 40 hm. %, jejichž konkrétní navážky jsou uvedeny v Tabulce 2.

Tabulka 1 Navážka jednotlivých koncentrací

Hmotnostní koncentrace CIP [%]	10	20	30	40
M TPU [kg]	1,8	1,6	1,4	1,2
M CIP [kg]	0,2	0,4	0,6	0,8

Veškeré míchání bylo provedeno na planetovém šnekovém extrudéru Platex, jehož dvě teplotní zóny byly vytopeny na teploty uvedené v Tabulce 3.

Tabulka 2 Nastavené teploty

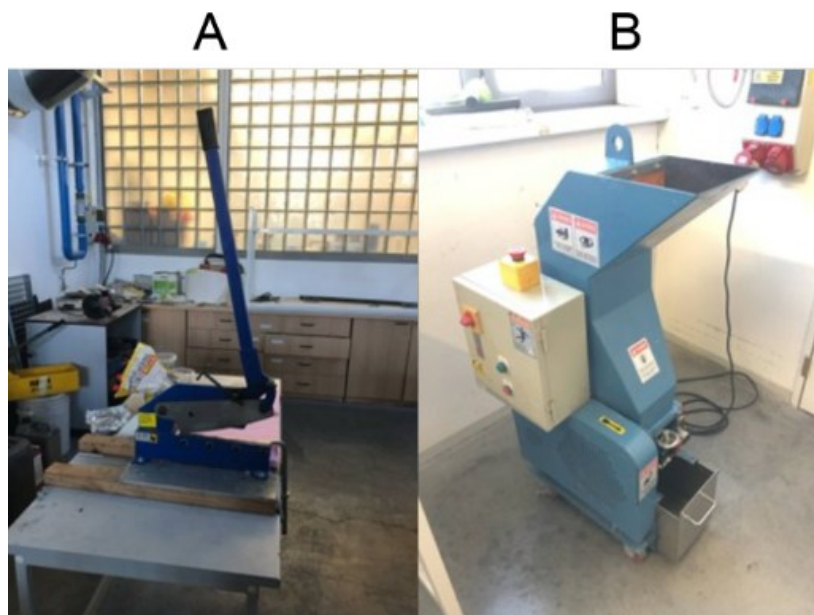
Zóna	1	2
Teplota [°C]	210	215

Po přípravě navážek byla vložena první koncentrace, tedy 10 hm. %, do stroje, kde došlo k míchání materiálu, který poté vystoupil v podobě hrudek, jež se následně odložily na hliníkovou fólii pro chladnutí na pokojovou teplotu. Po dokončení první koncentrace byla do násypky vložena koncentrace 20 hm. %, vytlačený materiál byl však odkládán, jelikož se jednalo o přechod mezi koncentracemi a až po určité chvíli došlo k odebrání materiálu opět na hliníkovou fólii. Tento postup byl pak dále zopakován pro zbylé dvě koncentrace.

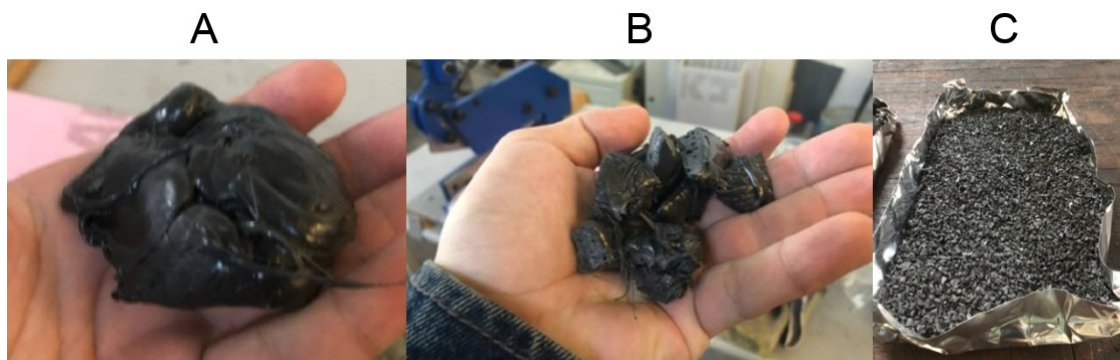


Obrázek 12 Planetový šnekový extruder Platex

Po ochlazení materiálu byly hrudky nastříhány pomocí pákových nůžek na velikost, kterou by byl schopný drtič zpracovat. Samotné drcení pak proběhlo přes dvě různá síta, první s průměrem děr 10 mm a druhé, jemnější, s průměrem 5 mm.



Obrázek 13 Zařízení využitá pro dělení materiálu
A – Pákové nůžky; B – Drtič



Obrázek 14 Postupné dělení materiálu.

A – hrudky z vytlačovacího stroje; B – materiál nastříhaný na pákových nůžkách;
C – granulát nadrcený na drtiči

Výsledkem drcení byl materiál v takové podobě, která je vhodná pro vytlačování filamentu.

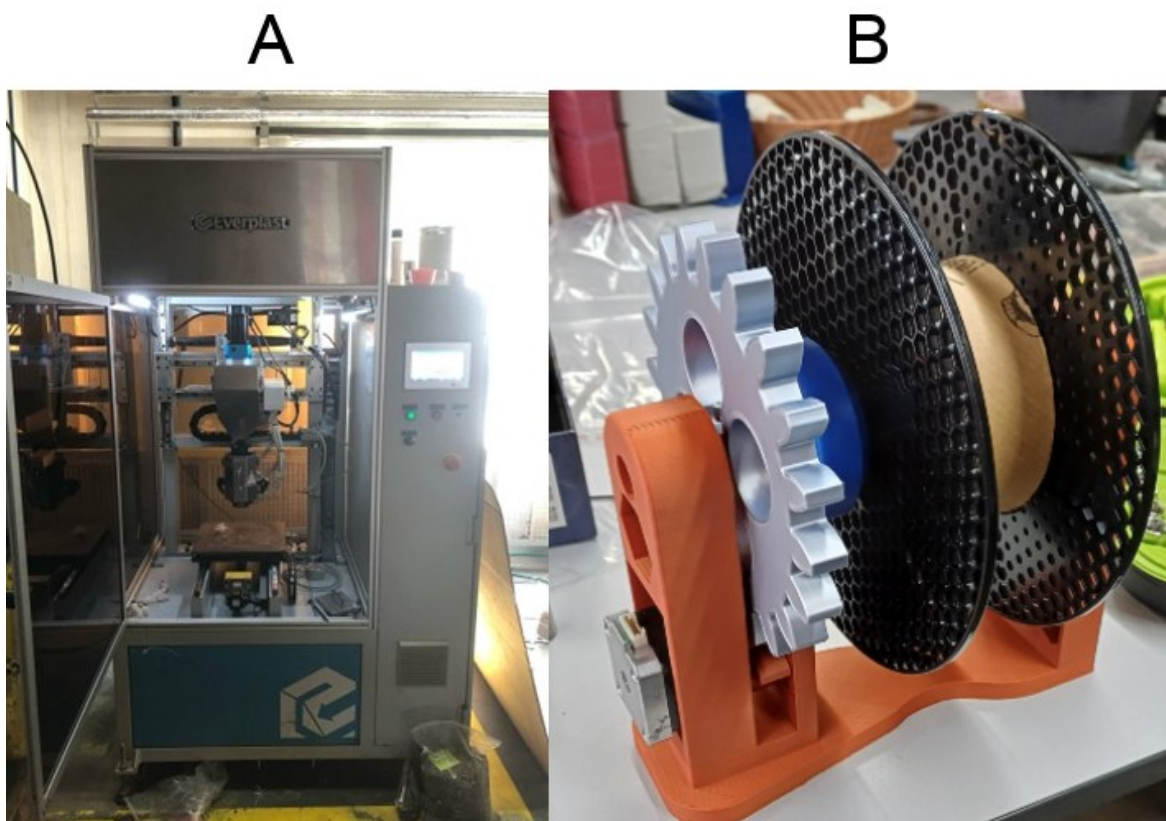
5.3 Výroba filamentu

Před samotnou výrobou bylo nutno materiál dokonale vysušit, jelikož materiál matrice TPU na sebe podstatně váže vlhkost ze vzduchu. Pro vysušení materiálu byla tedy využita sušárna MEMMERT UN55 53I, kde sušení probíhalo při 70 °C, a to po dobu 12 hodin. Pokud by k tomuto kroku nedošlo, mohl by proces vytlačování být problematický a vytlačený materiál nekvalitní.



Obrázek 15 Sušárna MEMMERT
UN55 53I

Pro vytlačování filamentu byla zvolena tiskárna Everplast, která je osazena speciálním extruderem. U standardních 3D tiskáren typu FFF jsou v extrudéru podávací kolečka, která tlačí filament ke trysce, zde je však místo koleček vytlačovací šnek, který dopravuje materiál k výstupu z trysky. Jedná se tedy ve své podstatě o šnekový vytlačovací stroj, a proto ho lze využít na výrobu filamentu.



Obrázek 16 Stroj pro výrobu filamentu
A – 3D tiskárna Everplast; B – připravený odtah

Samotnému stroji ale chybí odtah, proto bylo ve spolupráci s Ing. Martinem Možíšem z Ústavu výrobního inženýrství Fakulty technologické Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně navrženo jednoduché zařízení, které kromě odtahu zastává také funkci navíjení filamentu na špulku. Pro pohon byl zvolen krokový motor Nema 17HS3401, který byl řízen přes driver AT4988 s regulací otáček přes potenciometr a Arduino Uno. Krokový motor sám však nezvládl nižší rychlost než 12 ot/min, proto byl přidán převod do pomala pomocí pastorku a ozubeného kola. S převodovým poměrem 4 bylo možné snížit otáčky až na 3 ot/min, což s řízením rychlosti přes potenciometr umožnilo najít vhodnou rychlost pro navíjení filamentu.

Stroj se skládá ze 3 topných zón, které byly vytopeny na teploty uvedené v Tabulce 4. Jakmile bylo dosaženo požadovaných teplot, tak byla první koncentrace v podobě granulátu vložena do násypky a byla zapnuta rotace šneku rychlostí 16 otáček za minutu.

Tabulka 3 Teploty pro vytlačování filamentu

Zóna	1	2	3
Teplota [°C]	190	195	200

Materiál byl poté dopravován, taven a vytlačován skrz trysku o průměru 3 mm a následně odebrán pomocí ocelové tyčinky a zafixován na otáčející špulku. Průměr filamentu byl poté řízen rychlostí odtahu, která se pohybovala kolem 4,5 ot/min, čímž se podařilo zajistit průměr $1,6 \pm 0,1$ mm. Po dokončení vytlačování první koncentrace byl do násypky vložen granulát s další koncentrací, avšak vytlačený filament nebyl ihned namotán na



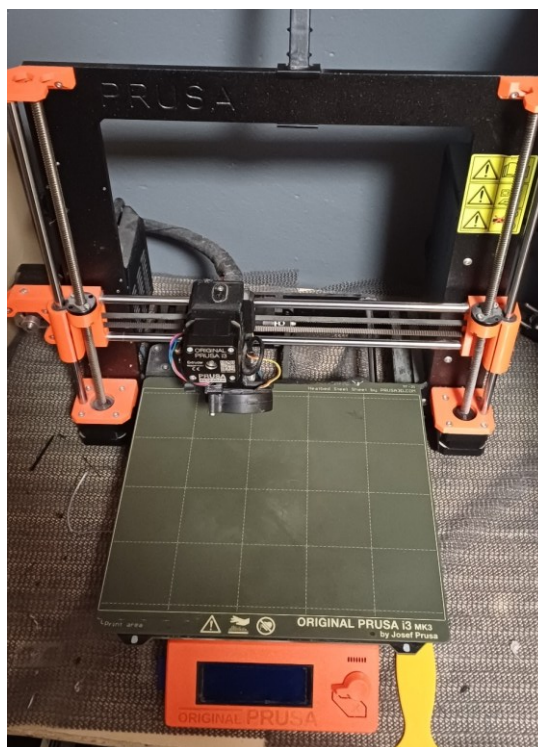
Obrázek 17 Vyrobený filament

špulku, jelikož se jednalo o přechod. Po přibližně 5 minutách extruze, kdy vytlačený filament byl již zaručeně se správnou koncentrací prášku karbonylového železa, se opět zafixoval konec filamentu na rotující špulku. Tento postup se pak opakoval pro všechny koncentrace.

5.4 Tisk

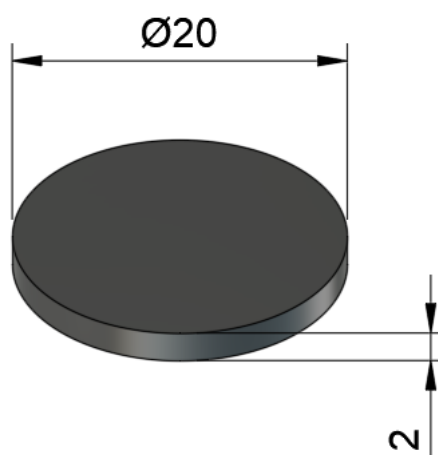
Pro tisk vyrobených filamentů byla zvolena 3D tiskárna Prusa MK3S+, u které byla vyměněna původní mosazná tryska o průměru 0,4 mm za kalenou ocelovou s průměrem otvoru 0,6 mm. Tato výměna proběhla primárně z důvodu přítomnosti abrazivních částic,

prášku karbonylového železa, v materiálu, které poměrně rychle poškozují standardní mosazné trysky, což ve výsledku zhoršuje kvalitu tisku.



Obrázek 18 Prusa MK3S+

Na testování tiskových vlastností byl vymodelován v programu Autodesk Fusion obyčejný váleček s průměrem 20 mm a výškou 2 mm.



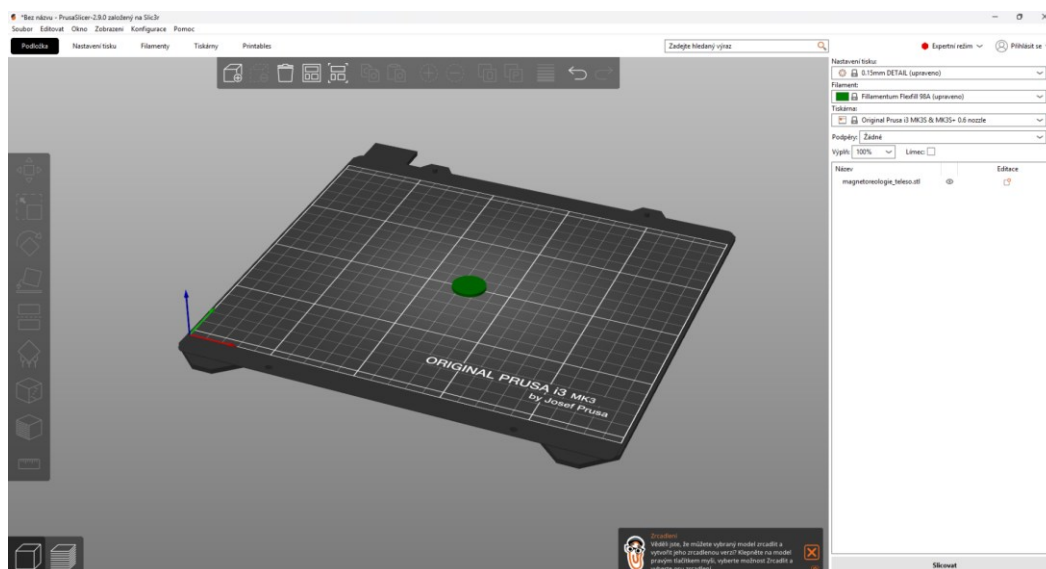
Obrázek 19 Zkušební model

Model byl dále vyexportován z programu Fusion ve formátu STL, který byl dále vložen do PrusaSlicer, což je program, který model rozdělí do vrstev a vygeneruje G-KÓD, který tiskárně říká například, na jakou teplotu vytopit, do jaké pozice se posunout, a také kolik

materiálu vytlačit. V programu bylo nutné zvolit u tiskárny 0,6mm trysku, aby extruze materiálu probíhala v pořádku. V rámci nastavení tisku zkušebního modelu byla nastavena výška vrstvy na 0,15 mm, počet perimetrů 2 a výplň objektu na 100 %, čímž se automaticky vzor výplně změnil na přímočarý. Také, vzhledem k průměru vyrobeného filamentu, bylo nutné přepsat tuto hodnotu z 1,75 na 1,6 mm, aby tento rozdíl byl brán v potaz při generaci G-KÓDU. Teplota tisku byla poté nastavena na 260 °C a teplota podložky na 70 °C. Tisk probíhal za vyšších teplot, než je dané výrobcem, jelikož flexibilní filament s menším průměrem je náchylnější na vzpěr a vyšší teplota tento problém částečně řeší. Dále byl snížena tisková rychlost, a to na 20 mm/s pro perimetry a 30 mm/s pro výplň. Podobně byla snížena i maximální objemová rychlost na 1,3 mm³/s. Na extruderu byl dále povolen šroub, který pomocí pružiny zajišťuje přídržnou silou mezi podávacími kolečky a filamentem, aby nedošlo k namotání filamentu na zmíněná podávací kolečka. Veškeré důležité parametry jsou uvedeny v Tabulce 5.

Tabulka 4 Tiskové parametry

Tiskové parametry	
Teplota trysky [°C]	260
Teplota podložky [°C]	70
Průměr filamentu [mm]	1,6
Násobič extruze [-]	1,3
Maximální objemová rychlost [mm ³ /s]	1,3
Výplň [%]	100
Vzor výplně	Přímocaráý
Počet perimetrů [-]	2
Rychlost tisku perimetrů [mm/s]	20
Rychlost tisku výplně [mm/s]	30



Obrázek 20 Prostředí programu PrusaSlicer



Obrázek 21 Vytisknuté těleso

5.5 Magnetoreologie

Tato zkouška materiálu popisuje změny vlastností materiálu, pokud dojde k vystavení magnetickému poli. Změna vlastností je při přítomnosti magnetického pole iniciována pohybem částic karbonylového železa, které se ve flexibilní matrici snaží zorientovat podle magnetického pole, čímž se matrice deformuje, a tak právě mění svoje vlastnosti. Poté, co ustane působení magnetického pole, se částice přesunou do původní polohy vlivem tvarové paměti (elasticity) matrice, čímž se též obnoví původní vlastnosti materiálu. Pro změnu chování materiálu jsou stěžejní dvě vlastnosti, a to koncentrace plniva a flexibilita matrice.

V první řadě nám vyšší obsah do určité koncentrace zvyšuje magnetoreologický prvek, avšak při zvyšování obsahu prášku nad určitou koncentraci dochází k úbytku viskoelastických oblastí, které zejména magnetoreologický efekt umožňují. Tato hranice se pohybuje kolem 40 až 50 hm.%. I flexibilita matrice má velký vliv na magnetoreologický efekt, jelikož vyšší flexibilita matrice umožňuje větší míru pohybu pro prášek karbonylového železa. Při 3D tisku může však vyšší flexibilita způsobovat problémy při samotném procesu tisku.

Zkouška byla provedena na vylisovaných zkušebních tělesech tvaru válce o průměru 20 mm a výšce 2 mm. Původně bylo uvažováno testování na tištěných vzorcích, avšak vzhledem k tomu, že se výtisk skládá z vrstev, které nejsou plně spojeny, bylo rozhodnuto pro lisovaná tělesa, jelikož u tištěných těles by mohly být hodnoty zkresleny. Lisování probíhalo na ručním lisu při teplotách 210 °C pro horní i spodní desku. Použit byl rámeček s rozměry vnitřní dutiny 100×100×2 mm. Z toho byl vypočítán objem, konkrétně 20 cm³, který byl dále vynásoben hustotou jednotlivých koncentrací, čímž bylo zajištěno optimální množství materiálu pro vyplnění celé formy. Tyto hmotnosti jsou uvedeny v Tabulce 6.

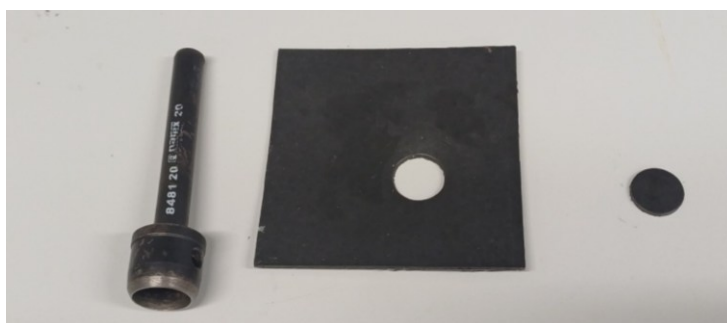
Tabulka 5 Potřebné množství materiálu pro lisování

Koncentrace CIP [%]	10	20	30	40
Hustota [g/cm ³]	1,19	1,32	1,47	1,66
Objem [cm ³]	20			
Hmotnost [g]	23,84	26,30	29,34	33,16

Jako separační fólie byla zprvu použita PET fólie, na kterou však lisovací teplota byla příliš vysoká a spekla se dohromady s lisovaným materiálem. Z toho důvodu byla vyměněna za teflonovou fólii, se kterou bylo lisování již bez problémů. Lisování trvalo 7 minut, kdy poté byly desky z lisu vyňaty a vloženy do lisu chlazeného pomocí vody. Zde byly desky ponechány 5 minut. Poté došlo k odstranění separační fólie a vyjmutí vylisované destičky z formy. Po vylisování bylo z destičky vyseknuto zkušební těleso.

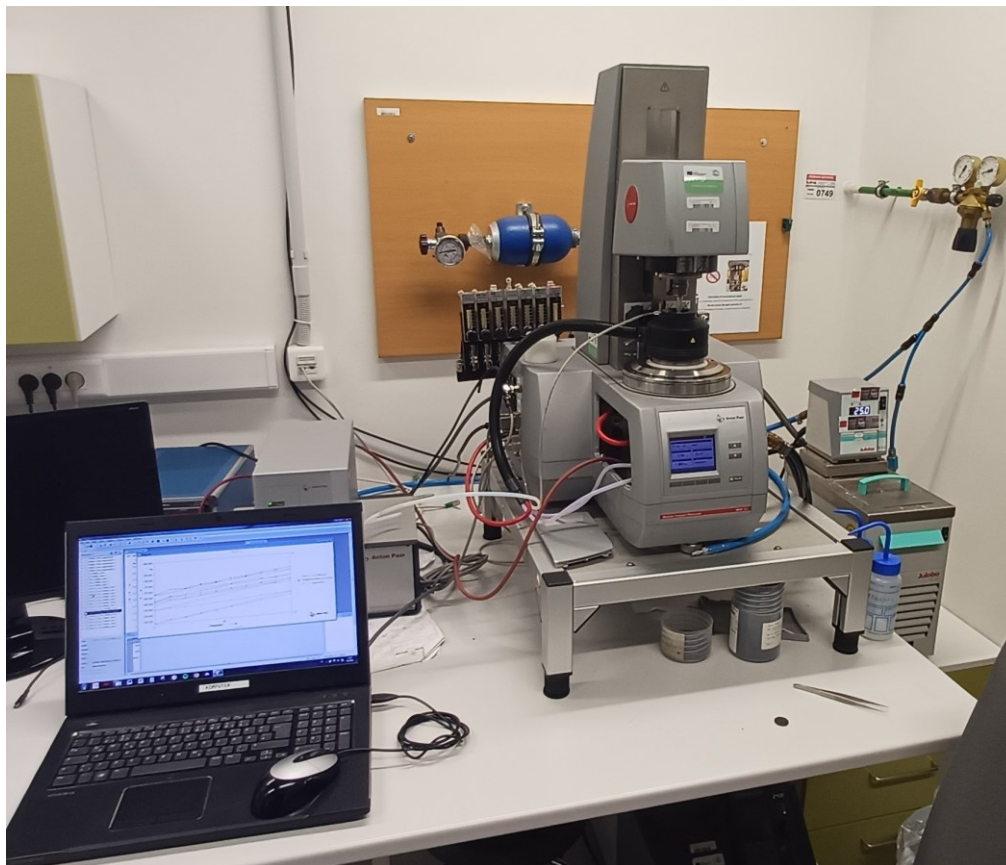


Obrázek 22 Lis použitý na výrobu zkušebních těles



Obrázek 23 Vylisovaná destička s nožem pro vyseknutí zkušebního tělesa

Magnetoreologie se realizovala na rotačním reometru Anton-Paar MCR 502, kdy bylo provedeno několik postupných měření, poprvé bez vystavení zkušebního tělesa magnetickému poli a poté při vystavení magnetickým polím o různé intenzitě. Spodní část reometru je statická, vrchní část pak osciluje a namáhá zkušební těleso na smyk, přičemž zároveň tato část vyvolává normálovou přidržovací sílu. Měření takto probíhalo na frekvenčním intervalu 0,1 až 1 Hz. V následujících kapitolách se nachází výsledky této zkoušky pro vyrobené koncentrace.



Obrázek 24 Rotační reometr Anton-Paar MCR 502

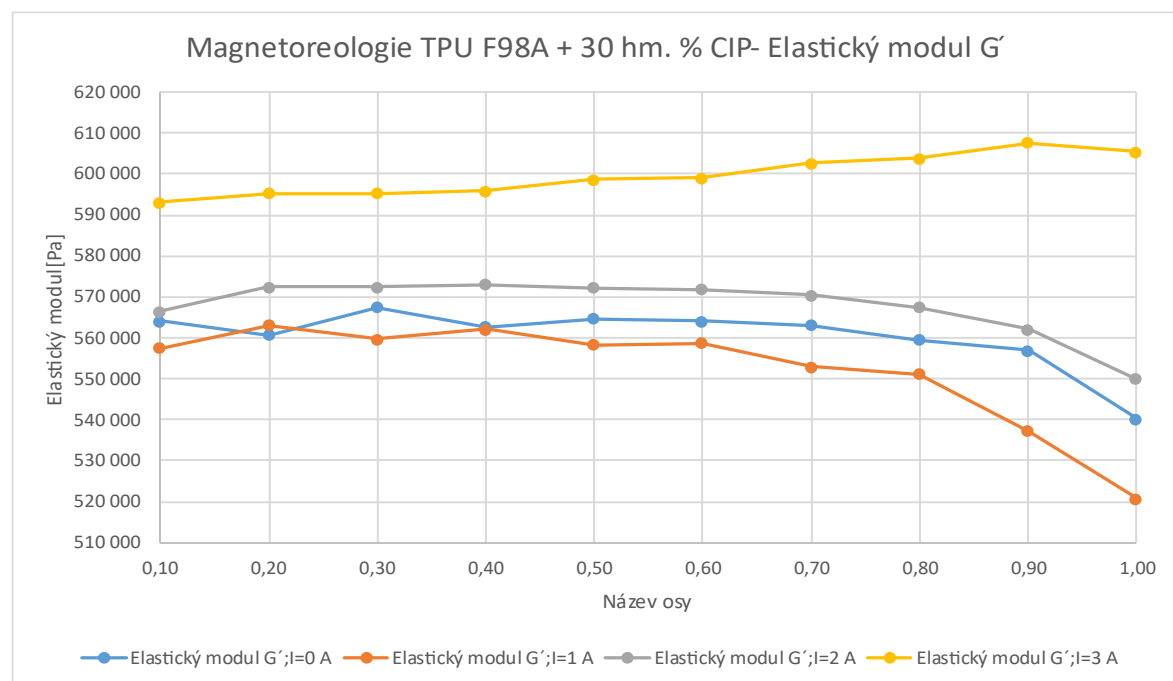
5.5.1 TPU F98A + 10 a 20 hm. %

Při testování těchto dvou koncentrací se nepodařilo naměřit důvěryhodná data, jelikož je zde pravděpodobně příliš malé množství kovového plniva, a tudíž nízká odezva na vnější aplikované magnetické pole. Z výsledků je patrné, že rozdíly mezi vlastnostmi bez a s působením magnetického pole jsou zanedbatelné nebo přímo nesprávně poukazovaly na záporný magnetoreologický efekt. Z toho důvodu tyto výsledky byly označeny za nespolehlivé a nejsou uvedeny v této práci.

5.5.2 TPU F98A + 30 hm. %

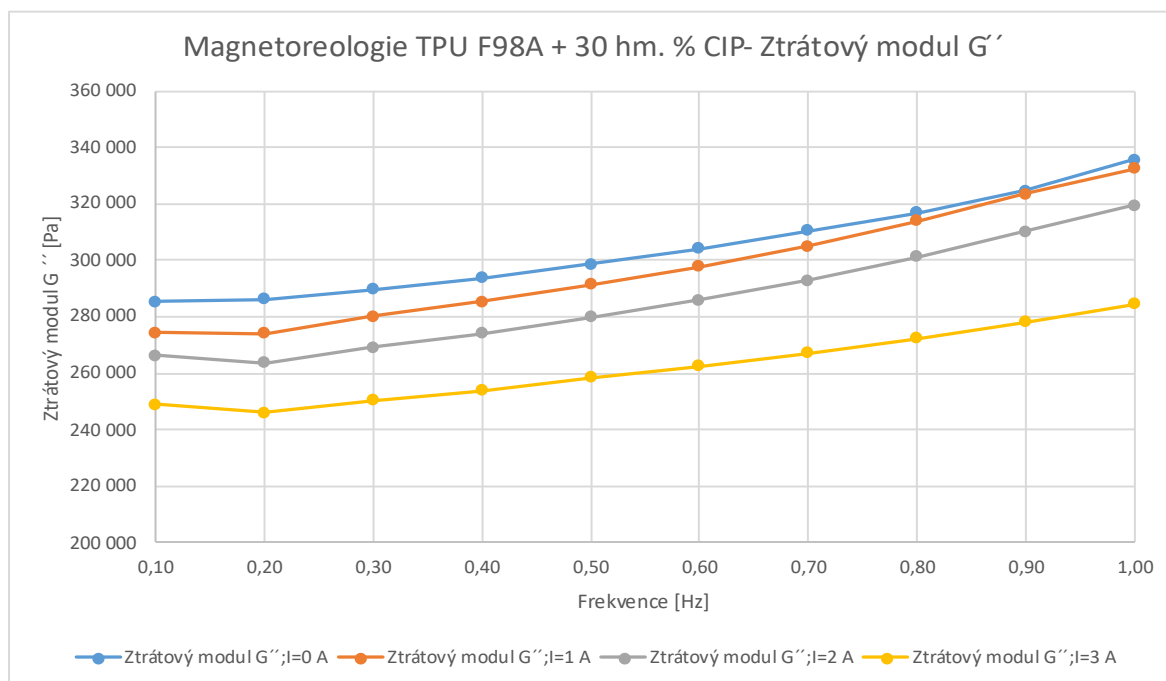
Tabulka 6 Magnetoreologie TPU F98A + 30 hm. % CIP – Elastický modul G'

Magnetoreologie TPU F98A + 30 hm. % CIP - Elastický modul G'							
Frekvence [Hz]	Elastický modul G' ; I=0 A	Elastický modul G' ; I=1 A	Elastický modul G' ; I=2 A	Elastický modul G' ; I=3 A	$\Delta G' \text{ 0-1 A}$ [Pa]	$\Delta G' \text{ 0-2 A}$ [Pa]	$\Delta G' \text{ 0-3 A}$ [Pa]
0,10	564 100	557 600	566 500	593 100	-6 500	2 400	29 000
0,20	560 800	563 200	572 400	595 300	2 400	11 600	34 500
0,30	567 500	559 800	572 400	595 300	-7 700	4 900	27 800
0,40	562 800	562 100	573 100	595 900	-700	10 300	33 100
0,50	564 600	558 400	572 300	598 700	-6 200	7 700	34 100
0,60	564 000	558 700	571 900	599 000	-5 300	7 900	35 000
0,70	563 200	552 900	570 500	602 700	-10 300	7 300	39 500
0,80	559 600	551 100	567 500	603 900	-8 500	7 900	44 300
0,90	557 000	537 200	562 200	607 700	-19 800	5 200	50 700
1,00	540 300	520 800	549 900	605 500	-19 500	9 600	65 200
Průměr	560 390	552 180	567 870	599 710	-8 210	7 480	39 320

Obrázek 25 Magnetoreologie TPU F98A + 30 hm. % CIP – Elastický modul G'

Tabulka 7 Magnetoreologie TPU F98A + 30 hm. % CIP – Ztrátový modul G''

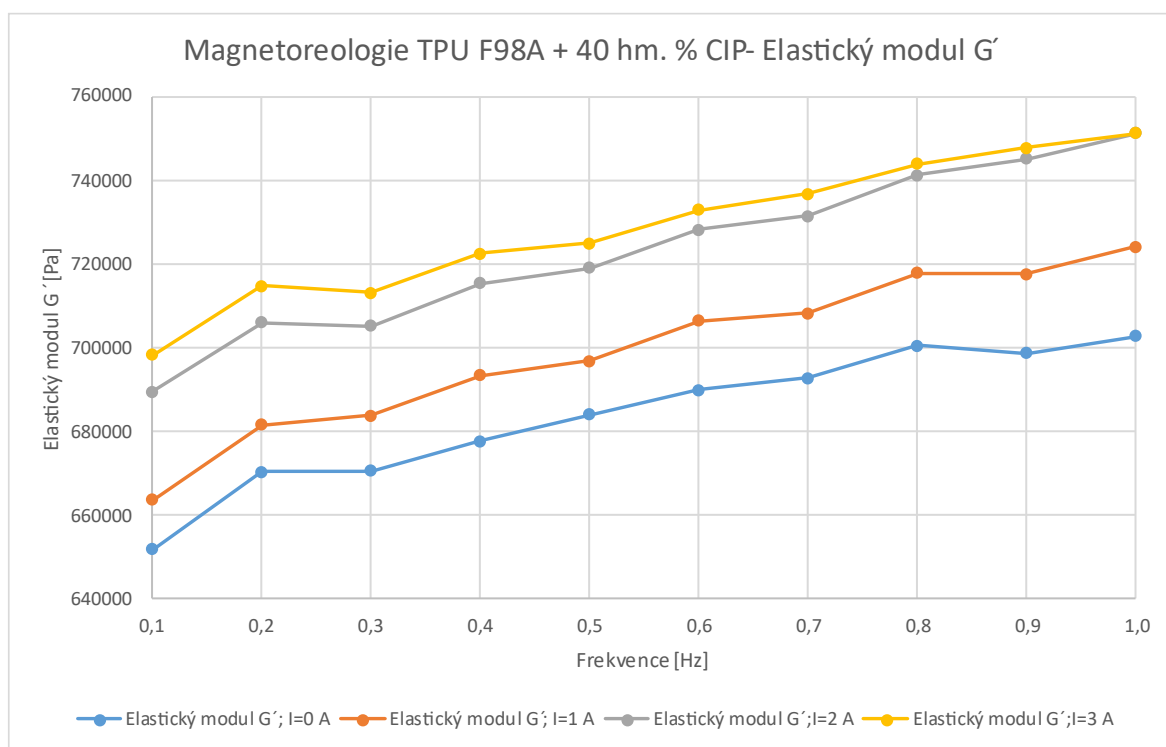
Magnetoreologie TPU F98A + 30 hm. % CIP - Ztrátový modul G''							
Frekvence [Hz]	Ztrátový modul G'' ; I=0 A	Ztrátový modul G'' ; I=1 A	Ztrátový modul G'' ; I=2 A	Ztrátový modul G'' ; I=3 A	$\Delta G''$ 0-1 A [Pa]	$\Delta G''$ 0-2 A [Pa]	$\Delta G''$ 0-3 A [Pa]
0,10	285 300	274 200	266 100	248 800	11 100	19 200	36 500
0,20	286 100	274 000	263 600	246 100	12 100	22 500	40 000
0,30	289 600	280 000	269 100	250 400	9 600	20 500	39 200
0,40	293 700	285 200	274 000	253 900	8 500	19 700	39 800
0,50	298 600	291 300	279 800	258 300	7 300	18 800	40 300
0,60	304 100	297 800	285 900	262 400	6 300	18 200	41 700
0,70	310 600	304 900	292 800	267 000	5 700	17 800	43 600
0,80	316 900	313 900	301 100	272 200	3 000	15 800	44 700
0,90	324 700	323 500	310 300	278 200	1 200	14 400	46 500
1,00	335 500	332 400	319 500	284 400	3 100	16 000	51 100
Průměr	304 510	297 720	286 220	262 170	6 790	18 290	42 340

Obrázek 26 Magnetoreologie TPU F98A + 30 hm. % CIP – Ztrátový modul G''

5.5.3 TPU F98A + 40 hm. %

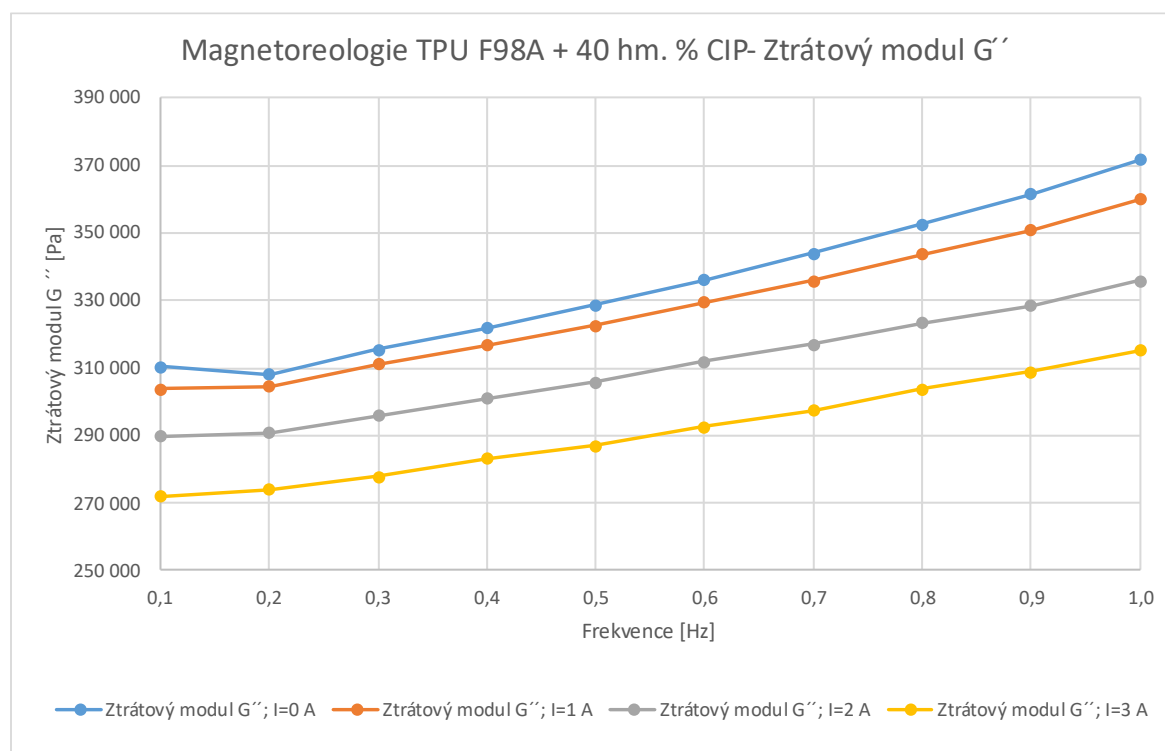
Tabulka 8 Magnetoreologie TPU F98A + 40 hm. % CIP – Elastický modul G'

Magnetoreologie TPU F98A + 40 hm. % CIP - Elastický modul G'							
Frekvence [Hz]	Elastický modul G' ; I=0 A	Elastický modul G' ; I=1 A	Elastický modul G' ; I=2 A	Elastický modul G' ; I=3 A	$\Delta G'$ 0-1 A [Pa]	$\Delta G'$ 0-2 A [Pa]	$\Delta G'$ 0-3 A [Pa]
0,1	651 800	663 800	689 600	698 300	12 000	37 800	46 500
0,2	670 500	681 600	706 000	714 800	11 100	35 500	44 300
0,3	670 700	683 900	705 300	713 300	13 200	34 600	42 600
0,4	677 700	693 400	715 500	722 500	15 700	37 800	44 800
0,5	684 100	696 900	719 100	725 100	12 800	35 000	41 000
0,6	690 000	706 400	728 400	732 900	16 400	38 400	42 900
0,7	692 800	708 400	731 600	736 800	15 600	38 800	44 000
0,8	700 600	717 900	741 300	744 000	17 300	40 700	43 400
0,9	698 700	717 800	745 200	747 900	19 100	46 500	49 200
1,0	702 800	724 300	751 300	751 300	21 500	48 500	48 500
Průměr	683 970	699 440	723 330	728 690	15 470	39 360	44 720

Obrázek 27 Magnetoreologie TPU F98A + 40 hm. % CIP – Elastický modul G'

Tabulka 9 Magnetoreologie TPU F98A + 40 hm. % CIP – Ztrátový modul G''

Magnetoreologie TPU F98A + 40 hm. % CIP - Ztrátový modul G''							
Frekvence [Hz]	Ztrátový modul G'' ; $I=0$ A	Ztrátový modul G'' ; $I=1$ A	Ztrátový modul G'' ; $I=2$ A	Ztrátový modul G'' ; $I=3$ A	$\Delta G''$ 0-1 A [Pa]	$\Delta G''$ 0-2 A [Pa]	$\Delta G''$ 0-3 A [Pa]
0,1	310 400	303 700	289 800	271 900	6 700	20 600	38 500
0,2	308 200	304 600	290 900	274 100	3 600	17 300	34 100
0,3	315 500	311 200	295 800	277 800	4 300	19 700	37 700
0,4	321 800	316 700	301 100	283 300	5 100	20 700	38 500
0,5	328 800	322 600	305 900	287 100	6 200	22 900	41 700
0,6	336 200	329 400	312 000	292 600	6 800	24 200	43 600
0,7	344 000	335 800	317 100	297 500	8 200	26 900	46 500
0,8	352 700	343 600	323 400	303 900	9 100	29 300	48 800
0,9	361 500	350 900	328 400	308 900	10 600	33 100	52 600
1,0	371 800	360 100	335 800	315 300	11 700	36 000	56 500
Průměr	335 090	327 860	310 020	291 240	7 230	25 070	43 850

Obrázek 28 Magnetoreologie TPU F98A + 40 hm. % CIP – Ztrátový modul G''

5.5.4 Vyhodnocení výsledků

Z výsledků magnetoreologie pro koncentraci 30 hm. % CIP lze vidět, že pro magnetické pole generované elektrickým proudem $I = 1$ A, tj. o intenzitě $H = 307$ kA/m, se elastický modul oproti měření bez účinku magnetického pole zmenšuje průměrně o **8 200 Pa**. Nastává tedy hodnotově záporný magnetoreologický efekt. Avšak při zesílení magnetického pole el. proudem $I = 2$ A, tj. $H = 606$ kA/m již dochází ke správné změně vlastností, a to tedy, že se elastický modul zvyšuje průměrně o **7 500 Pa**. Při dalším zesílení magnetického pole na (el.

proud $I = 3 \text{ A}$) $H = 885 \text{ kA/m}$ je magnetoreologický efekt ještě výraznější a průměrně dojde ke zvýšení modulu o **39 300 Pa**.

V případě ztrátového modulu, tedy viskózní složky, by mělo správně docházet k poklesu při zesilujícím magnetickém poli. Pro magnetické pole o intenzitě $H = 307 \text{ kA/m}$ z měření vychází, že ztrátový modul se průměrně sníží o **6 800 Pa**, tudíž se materiál chová podle očekávání. Pro silnější pole, tedy $H = 606 \text{ kA/m}$ opět dojde k výraznější změně vlastností, a to průměrně o **18 300 Pa**. V případě magnetického pole intenzitě $H = 885 \text{ kA/m}$ se průměrně hodnota ztrátového modulu zmenší oproti měření bez působení magnetického pole o **42 300 Pa**.

Pro koncentraci 40 hm.% CIP lze díky většímu obsahu feromagnetického plniva očekávat silnější magnetoreologický efekt, nárůst elastického modulu a pokles ztrátového modulu by měl být tedy výraznější. Pro pole $H = 307 \text{ kA/m}$ ($I = 1 \text{ A}$) z měření vychází průměrný nárůst elastického modulu o **15 500 Pa**. Dále pro pole $H = 606 \text{ kA/m}$ ($I = 2 \text{ A}$) je zvýšení průměrně o **39 400 Pa**. Pro nejsilnější pole $H = 885 \text{ kA/m}$ ($I = 3 \text{ A}$) dochází k mírnému poklesu na průměrné zvýšení o **44 700 Pa**.

Zde by měl ztrátový modul opět klesat. Pro první pole, které indukuje proud $I = 1 \text{ A}$ z dat vychází průměrný pokles o **7 200 Pa**. Pro pole $I = 2 \text{ A}$ a $I = 3 \text{ A}$ pak **25 000 Pa** a **43 900 Pa**.

Z výsledků měření je zřejmé, že se zvyšující se intenzitou magnetického pole se opravdu MR efekt zvyšuje. Z výsledků měření lze vidět, že s rostoucí koncentrací CIP dochází také k zesilování efektu. Nejvýraznější je to zejména při porovnání měření s působením magnetického pole o intenzitě $H = 606 \text{ kA/m}$, kdy u koncentrace 30 hm. % CIP byl zjištěn průměrný rozdíl elastického modulu oproti měření bez působení pole **7 500 Pa**, přičemž u koncentrace 40 hm. % CIP byl zjištěn průměrný rozdíl až **44 700 Pa**. U vyšší intenzity magnetického pole již takový podstatný rozdíl není, což může být způsobeno dosažením magnetické saturace v systému dispergovaných částic. Z hlediska ztrátového modulu lze z dat vyvodit, že zde také s rostoucí koncentrací CIP dochází k výraznější změně hodnot modulu, specificky tedy ke snižování jeho hodnoty. Podobně jako u elastického modulu, porovnání dat z obou koncentrací při působení pole $H = 885 \text{ kA/m}$ neukazuje na výrazný nárůst, což je opět pravděpodobně způsobeno dosažením magnetické saturace CIP. Obecně lepších výsledků by bylo možné dosáhnout použitím elastičtější matrice, s čímž se však vážou problémy při samotném 3D tisku.

ZÁVĚR

V rámci této bakalářské práce byly připraveny 4 různé koncentrace kompozitního materiálu, jehož matrice se skládala z termoplastického polyuretanu Estane 3D od společnosti Lubrizol s tvrdostí Shore 98A a magnetického plniva v podobě prášku karbonylového železa od společnosti BASF s mediánem průměru částic pohybující se mezi 6,5 až 8 μm a čistotou prášku 99,8 % Fe. Konkrétně se jednalo o koncentrace 10, 20, 30 a 40 hm. % CIP.

Míchání těchto směsí probíhalo na planetovém šnekovém extruderu Platex, kdy po extruzi byly obdrženy hrudky, které se následně stříhaly a drtily na velikost vhodnou pro vytlačování filamentu. Před samotným vytlačováním filamentu bylo nutné nadrcený granulát řádně vysušit, aby nedocházelo k defektům při vytlačování. Vytlačování poté probíhalo na speciální 3D tiskárně Everplast, u níž je místo standardního extrudéru s podávacím kolečky extrudér s vytlačovacím šnekem, což umožňuje kromě výroby filamentu i tisk přímo z granulátu. K tomuto stroji byl připraven i odtah, který zároveň sloužil jako navíjení filamentu. Po vytlačení filamentu bylo opět nutné materiál vysušit. Tisk poté probíhal na 3D tiskárně Prusa MK3S+, u které byla z důvodu abraze vlivem kovového prášku v matrici nahrazena standardní 0,4mm mosazná tryska za 0,6mm kalenou ocelovou trysku.

Provedena byla také analýza magnetických vlastností všech koncentrací, a to přes magnetoreologickou zkoušku. Zkouška byla prováděna na lisovaných zkušebních vzorcích, jelikož tištěná struktura by mohla zkreslit výsledky měření. U prvních dvou koncentrací, tedy 10 a 20 hm.% CIP, byl však obsah feromagnetického plniva příliš nízký, a proto byla odezva na působení vnějšího magnetického pole nevýrazná. Výsledky tedy nesprávně poukazovaly na záporný magnetoreologický efekt a byly označeny za nespolehlivé, což byl také důvod pro jejich neuvedení v práci. Měření na vyšších koncentracích poté již poskytla zajímavější výsledky, z nichž je patrné, že při zvyšování intenzity působícího magnetického pole se zvyšuje i magnetoreologický efekt, konkrétně dochází ke zvyšování elastického modulu a snižování ztrátového modulu. Nejvýraznější změnu hodnot lze pozorovat mezi daty z magnetických polí o intenzitě $H = 307 \text{ kA/m}$ a $H = 606 \text{ kA/m}$. Při srovnání se silnějším magnetickým polem $H = 885 \text{ kA/m}$ již nelze vidět takovou výraznou změnu, což je pravděpodobně způsobeno dosažením magnetické saturace dispergovaných magnetických částic. Vyšší koncentrace pak má kladný vliv na posílení magnetoreologického efektu, kdy data poukazují na výraznější změnu jak elastického, tak i ztrátového modulu u koncentrace 40 hm.% CIP oproti 30 hm.% CIP. Data z měření s magnetickým polem o intenzitě $H = 885 \text{ kA/m}$ pak opět při porovnávání mezi oběma koncentracemi poukazují na malou změnu, což

může být zapříčiněno dosažením magnetické saturace částic. Lepších výsledků by pak bylo možné dosáhnout využitím matrice s vyšší elasticitou, tedy nižší tvrdostí Shore A, což by ale poté mohlo vést k problémům při 3D tisku kompozitního systému.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] STAFF, Weerg, 2021. Rapid Prototyping: Purpose, Advantages, Costs. Weerg.com [online]. B.m.: Weerg [vid. 2025-05-15]. Dostupné z: <http://www.weerg.com/guides/what-is-rapid-prototyping>
- [2] ROSSI, Sergio; PUGLISI, Alessandra a BENAGLIA, Maurizio, 2018. Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing in Organic Synthesis. Online. ChemCatChem. 2018-04-09, roč. 10, č. 7, s. 1512-1525. ISSN 1867-3880. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/cctc.201701619>. [cit. 2025-01-23].
- [3] GIBSON, Ian, David ROSEN a Brent STUCKER, 2015. Additive Manufacturing Technologies [online]. New York, NY: Springer New York. ISBN 9781493921126. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2113-3>
- [4] DOBBS, Sarah, 2014. The Ultimate Guide to 3D Printing. London: Dennis Publishing Ltd. ISBN 1-78106-309-5.
- [5] GUPTA, Ram K., 2023. 3D Printing [online]. Boca Raton: CRC Press [vid. 2025-02-19]. ISBN 9781003296676. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1201/9781003296676>
- [6] HORVATH, Joan a Rich CAMERON, 2020. Mastering 3D printing : a guide to modeling, printing, and prototyping. [New York, New York]: Apress. ISBN 9781484258422.
- [7] SINGH, Sunpreet, Seeram RAMAKRISHNA a Filippo BERTO, 2019. 3D Printing of polymer composites: A short review. Material Design & Processing Communications [online]. [vid. 2019-10-30]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1002/mdp2.97>
- [8] SHAHRUBUDIN, N., T.C. LEE a R. RAMLAN, 2019. An Overview on 3D Printing Technology: Technological, Materials, and Applications. Procedia Manufacturing [online]. 35(35), 1286–1296. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2351978919308169>
- [9] STŘÍTESKÝ, Ondřej; PRŮŠA, Josef a BACH, Martin, 2020. Základy 3D tisku s Josefem Průšou. 2020. Praha: Prusa Research. ISBN 978-80-907798-0-8. Dostupné z: <https://www.prusa3d.com/downloads/zaklady-3d-tisku.pdf>

- [10] SWETHAM, Thirunahary, Ketham Madhana Mohan REDDY, Akhil HUGGI a Mavoori Naveen KUMAR. A Critical Review on of 3D Printing Materials and Details of Materials used in FDM. International journal of scientific research in science, engineering and technology [online]. 2017, 3(2), 353–361. Dostupné z: doi:10.32628/IJSRSET173299
- [11] DAVIES, Sam, 2020. Exclusive interview: Retiring Stratasys founder Scott Crump on his 3D printing legacy. TCT Magazine [online]. Dostupné z: <https://www.tctmagazine.com/additive-manufacturing-3d-printing-news/exclusive-stratasys-scott-crump-3d-printing-legacy/>
- [12] Anon., [b.r.]. 3d Printer Parts. indiamart.com [online]. Dostupné z: <https://www.indiamart.com/proddetail/3d-printer-parts-23490466588.html>
- [13] Anon., 2025. Prusament PLA Galaxy Green 1kg. Prusa3D by Josef Prusa [online] [vid. 2025-05-15]. Dostupné z: <https://www.prusa3d.com/cs/produkt/prusament-pla-galaxy-green-1kg/>
- [14] Anon., 2025a. Fully assembled 3D-printable wrench made of flexible TPU filament. Flickr [online]. B.m.: Fully assembled 3D-printable wrench made of flexible TPU f... | Flickr [vid. 2025-05-15]. Dostupné z: https://www.flickr.com/photos/creative_tools/16361116926/in/photostream/
- [15] Anon., [b.r.]. TECHNOLOGIE 3D TISKU. 3DTISK-ONLINE [online] [vid. 2025-05-15]. Dostupné z: <https://www.3dtisk-online.cz/3d-tisk-brno-technologie-3d-tisku/>
- [16] EQUBAL, Azhar; EQUBAL, Md. Asif; KHAN, Zahid A. a BADRUDDIN, Irfan Anjum. A review on the rapid liquid printing (RLP): future 3D printing technology. Online. Progress in Additive Manufacturing. ISSN 2363-9512. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s40964-024-00815-6>. [cit. 2024-12-05].
- [17] M., Padmakumar, 2020. Additive Manufacturing of Tungsten Carbide Hardmetal Parts by Selective Laser Melting (SLM), Selective Laser Sintering (SLS) and Binder Jet 3D Printing (BJ3DP) Techniques. Online. Lasers in Manufacturing and Materials Processing. Roč. 7, č. 3, s. 338-371. ISSN 2196-7229. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s40516-020-00124-0>. [cit. 2025-01-23].
- [18] Anon., [b.r.]. Rapid Liquid Printing. Self-Assembly Lab [online]. Dostupné z: <https://selfassemblylab.mit.edu/rapid-liquid-printing>

- [19] HARRIS, Bryan, 1999. Engineering composite materials. Brookfield: Institute of Materials. Dostupné z: https://learn.skillman.eu/pluginfile.php/1902/mod_resource/content/0/Engineering%20Composites.pdf
- [20] HULL, D. a CLYNE, T.W, 2019. An introduction to composite materials. 3rd ed. Cambridge solid state science series. Cambridge: Cambridge Univ. Press. ISBN 0-521-38855-4.
- [21] Anon., 2017. Polymer Composite - an overview | ScienceDirect Topics. Sciencedirect.com [online]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/topics/materials-science/polymer-composite>
- [22] HSISSOU, Rachid, Rajaa SEGHIRI, Zakaria BENZEKRI, Miloudi HILALI, Mohamed RAFIK a Ahmed ELHARFI, 2021. Polymer composite materials: A comprehensive review. Composite Structures [online]. 262, 113640. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.113640>
- [23] SAE International. (2022). <i>Composite Materials Handbook, Volume 1 (revision H) - Polymer Matrix Composites Guidelines for Characterization of Structural Materials.</i> SAE Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpCMHPMCGB/composite-materials-handbook/composite-materials-handbook>
- [24] KWOK, Sen Wai, Kok Hin Henry GOH, Zer Dong TAN, Siew Ting Melissa TAN, Weng Weei TJIU, Je Yeong SOH, Zheng Jie Glenn NG, Yan Zhi CHAN, Hui Kim HUI a Kuan Eng Johnson GOH, 2017. Electrically conductive filament for 3D-printed circuits and sensors. Applied Materials Today [online]. 9, 167–175. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.apmt.2017.07.001>
- [25] MORA, A., P. VERMA a S. KUMAR, 2020. Electrical conductivity of CNT/polymer composites: 3D printing, measurements and modeling. Composites Part B: Engineering [online]. 183, 107600 [vid. 2020-01-12]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107600>
- [26] ZHAI, Haorui, Xiaodong LI, Shuzhou YU, Jianlei WANG, Ying CHANG, Jun LI, Xinghua CHENG, Lei ZHOU, Yikun FANG, Tao LIU, Xiaojun YU, Minggang ZHU, Bo LI a Wei LI, 2025. Review on the 3D printing technology and application of magnetic materials: Material-process-structure-application. Composites Part B: Engineering [online]. 298, 112387. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2025.112387>

[27] G, Krishnaja a Balasubramanian KANDASUBRAMANIAN, 2022. Exertions of Magnetic Polymer Composites Fabricated via 3D Printing. Industrial & Engineering Chemistry Research [online].

2022-11-23, 61(46), 16895-16909 [cit. 2024-10-24]. ISSN 0888-5885.

Dostupné z: <https://doi.org/doi:10.1021/acs.iecr.2c02299>

[28] KANG, Sung Soon, Kisuk CHOI, Jae-Do NAM a Hyoung Jin CHOI, 2020. Magnetorheological Elastomers: Fabrication, Characteristics, and Applications. Materials [online]. 13(20), 4597. Dostupné z: [doi:https://doi.org/10.3390/ma13204597](https://doi.org/10.3390/ma13204597)

[29] BASTOLA, Anil K, Milan PAUDEL, Lin LI a Weihua LI, 2020. Recent progress of magnetorheological elastomers: a review. Smart Materials and Structures [online]. 29(12), 123002. Dostupné z: [doi:https://doi.org/10.1088/1361-665x/abbc77](https://doi.org/10.1088/1361-665x/abbc77)

[30] Anon., 2025. Katedra tváření kovů a plastů - Skripta. Ksp.tul.cz [online] [vid. 2025-05-15].

Dostupné z: https://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/01.htm

[31] MINION INTERACTIVE S.R.O, 2021. Rozdělení a charakteristika plastů | Multiplast. Multiplast.cz [online]. Dostupné z: <https://www.multiplast.cz/poradna/rozdeleni-a-charakteristika-plastu-26>

[32] Anon., 2025b. Termoplastické elastomery. Publi.cz [online]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/23.html>

[33] LOUIS, Stephen, 2015. Handbook of thermoplastic elastomers. New York, Ny: Ny Research Press. ISBN 9781632382825.

[34] YANG, Guangxin, Jiabao PAN a Daoming WANG, 2024. A review on the magnetorheological materials and applications. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics [online]. 2024-08-09, 75(4), 407-443 [cit. 2024-10-24]. ISSN 13835416. Dostupné z: <https://doi.org/doi:10.3233/JAE-230195>

[35] DHIMAN, Nishant Kumar, Sandeep M. SALODKAR, GAGANDEEP a Chanderkant SUSHEEL, 2024. Advances in Modeling and Control of Magnetorheological Elastomers for Engineering Applications. Archives of Computational Methods in Engineering [online]. 31(3), 1823-1865 [cit. 2024-10-24]. ISSN 1134-3060. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s11831-023-10031-0>

[36] MUNTEANU, A., A. RONZOVA, E. KUTALKOVA, et al., 2022. Reprocessed magnetorheological elastomers with reduced carbon footprint and their piezoresistive properties. Scientific Reports [online]. 12(1) [cit. 2024-10-24]. ISSN 2045-2322. Dostupné z: <https://doi.org/10.1038/s41598-022-16129-y>

[37] Anon., 2025a. Česká republika. Basf.com [online]. Dostupné z: <https://www.basf.com/cz/cs>

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 Steven Scott Crump představuje technologii FDM [11]	14
Obrázek 2 Tiskárna Creality Ender [12]	15
Obrázek 3 Prusament PLA [13]	16
Obrázek 4 Klíč vytištěný z TPU [14]	17
Obrázek 5 Princip technologie SLS [15]	18
Obrázek 6 Princip technologie SLA [15]	19
Obrázek 7 Princip technologie LOM [15]	21
Obrázek 8 Schéma procesu při Binder Jet 3D printing [17]	22
Obrázek 9 Metoda RLP [18]	23
Obrázek 10 Struktura TPE [32]	28
Obrázek 11 Estane TPU F98A (vlevo) a prášek karbonylového železa (vpravo)	33
Obrázek 12 Planetový šnekový extruder Platex	35
Obrázek 13 Zařízení využívané pro dělení materiálu A – Pákové nůžky; B – Drtič	35
Obrázek 14 Postupné dělení materiálu. A – hrudky z vytlačovacího stroje; B – materiál nastříhaný na pákových nůžkách; C – granulát nadrcený na drtiči	36
Obrázek 15 Sušárna MEMMERT UN55 53I	36
Obrázek 16 Stroj pro výrobu filamentu A – 3D tiskárna Everplast; B – připravený odtah	37
Obrázek 17 Vyrobený filament	38
Obrázek 18 Prusa MK3S+	39
Obrázek 19 Zkušební model	39
Obrázek 20 Prostředí programu PrusaSlicer	41
Obrázek 21 Vytištěné těleso	41
Obrázek 22 Lis použitý na výrobu zkušebních těles	43
Obrázek 23 Vylisovaná destička s nožem pro vyseknutí zkušebního tělesa	43
Obrázek 24 Rotační reometr Anton-Paar MCR 502	44
Obrázek 25 Magnetoreologie TPU F98A + 30 hm. % CIP – Elastický modul G'	45
Obrázek 26 Magnetoreologie TPU F98A + 30 hm. % CIP – Ztrátový modul G''	46
Obrázek 27 Magnetoreologie TPU F98A + 40 hm. % CIP – Elastický modul G'	47
Obrázek 28 Magnetoreologie TPU F98A + 40 hm. % CIP – Ztrátový modul G''	48

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Navážka jednotlivých koncentrací	34
Tabulka 2 Nastavené teploty.....	34
Tabulka 3 Teploty pro vytlačování filamentu.....	38
Tabulka 4 Tiskové parametry	40
Tabulka 5 Potřebné množství materiálu pro lisování.....	42
Tabulka 6 Magnetoreologie TPU F98A + 30 hm. % CIP – Elastický modul G'	45
Tabulka 7 Magnetoreologie TPU F98A + 30 hm. % CIP – Ztrátový modul G''	46
Tabulka 8 Magnetoreologie TPU F98A + 40 hm. % CIP – Elastický modul G'	47
Tabulka 9 Magnetoreologie TPU F98A + 40 hm. % CIP – Ztrátový modul G''	48

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

%	procento z celku
°C	stupeň Celsia – jednotka teploty
μm	mikrometr – jednotka délky
∅	symbol průměru
3D	„trojrozměrný“ prostor definovaný třemi rozměry
A	Ampér - jednotka proudu
ABS	akrylonitril butadien styren
ASA	akrylonitril styren akrylát
BASF	německá agrochemická firma
BVOH	- butenediol vinylakoholový kopolymer
CIP	karbonylonový železný prášek
cm ³	centimetr kubický – jednotka objemu
Dr.	akademický titul Doktorát
EBM	Electron Beam Melting
E-sklo	borosilikátové sklo
FDM	Fused Deposition Modeling
Fe	chemická značka železa
FFF	Fused Filament Fabrication
FLEX	zkratka označující flexibilní filament
G′	elastický modul
G′′	ztrátový modul
g/cm ³	gram na centimetr kubický – jednotka hustoty
G-kód	programovací jazyk pro počítačem ovládané stroje
H	Intenzita magnetického pole

HIPS houževnatý polystyren (high impact polystyren)

Hm. %hmotnostní procento

Hz Hertz – jednotka frekvence

I Fyzikální veličina pro Elektrický proud

IBM americká mezinárodní firma International Business Machines Corporation

Ing. akademický titul Inženýr

kA/m kiloampér metr – jednotka hustoty elektrického proudu

kg kilogram – jednotka hmotnosti

LOM Laminated Object Manufacturing

mm milimetr – jednotka délky

mm/s milimetr za sekundu – jednotka rychlosti

mm³/s milimetr kubický za sekundu – jednotka průtoku

MR Magnetoreologický

MRF Magnetoreologické kapaliny

MRE Magnetoreologický elastomery

ot/m otáčky za minutu – jednotka frekvence

Pa Pascal – jednotka tlaku

PC Polykarbonát

PET Polyethylen tereftalát

PETG Polyethylen tereftalák glykol

PLA Kyselina polymléčná (poly lactic acid)

PVA Polyvinyl alkohol

RLP Rapid Liquid Printing

SLA Stereolitografie

SLM Selective Laser Melting

SLS Selective Laser Sintering

STL formát souboru programu pro 3D tisk

TPE Termoplastický elastomer

TPE-A Termoplastický elastomer s polyamidovými bloky

TPE-E Termoplastický elastomer s polyesterovými bloky

TPE-U Termoplastický elastomer s polyuretanovými bloky

TPU Termoplastický polyuretan

UV Ultrafialové (Ultraviolet)

X,Y,Z Osy kartézské soustavy souřadnic