

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

**Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie-
Ú12134**



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

**Porovnání vlastností moderních materiálů využitelných v
technologii FDM**

Autor: Radek Stehno
Studijní program: Výroba a ekonomika ve strojírenství
Studijní obor: Technologie, materiály a ekonomika
strojírenství
Vedoucí práce: Ing. Jan Šimota

Praha 2022



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Stehno** Jméno: **Radek** Osobní číslo: **491573**
 Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
 Zadávající katedra/ústav: **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**
 Studijní program: **Výroba a ekonomika ve strojírenství**
 Studijní obor: **Technologie, materiály a ekonomika strojírenství**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Porovnání vlastností moderních materiálů využitelných v technologii FDM

Název bakalářské práce anglicky:

Comparison of modern materials properties usable in FDM technology

Pokyny pro vypracování:

1. Shrnutí materiálů využívaných u 3D tisku běžně dostupných tiskáren
2. Alternativy k moderním typům materiálů
3. Výroba typových vzorků, provedení ověřovacích zkoušek a analýza výsledků

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:


Ing. Jan Šimota ústav technologie obrábění, projektování a metrologie FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **15.03.2022**

Termín odevzdání bakalářské práce: **29.07.2022**

Platnost zadání bakalářské práce:


 Ing. Jan Šimota
 podpis vedoucí(ho) práce

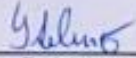

 Ing. Libor Beránek, Ph.D.
 podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry


 prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
 podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

6.4.2022
 Datum převzetí zadání


 Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci Porovnání vlastností moderních materiálů využitelných v technologii FDM vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce, s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu použitých zdrojů na konci práce.

V Praze dne: _____

Radek Stehno

Poděkování

Chtěl bych poděkovat panu Ing. Janu Šimotovi za odborné vedení práce a cenné rady, které mi pomohly tuto práci zkompletovat. Mé poděkování patří též Ing. Františku Tatíčkoví, Ph. D. a Ing. Eleně Čižmárové, Ph. D. za odborné rady při práci na praktické části.

V neposlední řadě bych chtěl poděkovat Lukáši Holoubkovi za vypůjčení FDM 3D tiskárny

Abstrakt

Cílem této práce je seznámení se s vybranými materiály pro technologii FDM 3D tisku. Následně práce pojednává o mechanických vlastnostech, náročnosti procesu tisku a v neposlední řadě konečnému využití těchto materiálů. V teoretické části práce je popisována technologie FDM, celý proces výroby modelu a vady vzniklé v průběhu procesu tisku. Praktická část této práce se zabývá komplexním testováním vybraných materiálů. Testování spočívá v provedené tahové a rázové zkoušce. Následně je vyroben referenční artefakt, na kterém jsou pozorovány zvolené vlastnosti tisku jednotlivých materiálů. Pro zvolený materiál byla vybrána mechanicky zatěžovaná funkční součást, jež následně byla aplikována v praxi.

Klíčová slova

Aditivní technologie, 3D tisk, FDM, Tahová a Rázová zkouška, Materiály, Referenční artefakt, Porovnání materiálů, Funkční model

Abstract

The main goal of this work is to get acquainted with selected materials for FDM 3D printing technology. The conclusion of the thesis discusses the mechanical properties, the demandingness of the printing process and, ultimately, the final use of these materials. In the theoretical part of the work, FDM technology, the entire process of model production and defects arising during the printing process are described. The practical part of this work deals with comprehensive testing of selected materials. The testing consists of a tensile and impact test. Finally, a reference artifact is used, on which the properties of the selected print of individual materials are observed. A mechanically loaded functional component was selected for the selected material, which was subsequently applied in practice.

Keywords

Additive technology, 3D printing, FDM, Tensile and Impact testing, Materials, Reference artifact, Materials comparison, Functional model

Obsah

1	Úvod	10
2	Historie 3D tisku	11
3	Technologie 3D Tisku	13
3.1	STEREOLITOGRAFIE.....	14
3.2	FDM (Fused Deposit Modeling).....	14
4	Postup výroby	16
4.1	CAD model	16
4.2	STL.....	17
4.3	Slicer	17
4.4	Tisk.....	18
4.5	Post-procesing	18
5	Podpůrná konstrukce	19
6	Materiály pro 3D tisk.....	20
6.1	PLA	21
6.2	ABS.....	22
6.3	PC.....	23
6.4	PET-G.....	23
6.5	Nylon.....	24
6.6	PMMA	25
6.7	ULTEM.....	25
6.8	Diran	26
6.9	PEKK	27
7	Vliv FDM 3D tisku na mechanické vlastnosti modelu	28
8	Poruchy a časté vady při FDM tisku	30
8.1	Warping	30

8.2	Stringing.....	31
8.3	Bridging.....	31
9	Testovací artefakt pro různé materiály v FDM 3D tisku	32
10	Úvod do praktické části	34
11	Výroba součástí	35
11.1	Prusa i3 MK3S	35
11.2	Stratasys F370.....	35
11.3	Zkušební vzorky	36
11.4	Průběh tisku.....	37
11.5	Parametry tisku vzorků pro tahovou a rázovou zkoušku	40
12	Tahová zkouška	42
12.1	Použité vztahy.....	43
13	Výsledky tahové zkoušky	44
13.1	Diran	44
13.2	Nylon.....	44
13.3	PC-ABS	44
13.4	PET-G.....	45
13.5	PMMA	45
13.6	Vyhodnocení tahové zkoušky	45
14	Rázová zkouška metodou Charpyho kladiva	48
14.1	Použité vztahy.....	49
15	Výsledky zkoušky rázové houževnatosti	50
15.1	Diran	50
15.2	Nylon.....	50
15.3	PC-ABS	51
15.4	PET-G.....	52

15.5	PMMA	52
15.6	Vyhodnocení rázové zkoušky Charpyho kladivem	53
16	Referenční artefakt.....	55
16.1	Stringing test.....	55
16.2	Overhang test	55
16.3	Bridging test.....	55
16.4	Zkouška rozměrové přesnosti.....	55
16.5	Parametry tisku referenčního artefaktu.....	57
17	Analýza referenčních artefaktů	59
17.1	Vyhodnocení overhang testu	60
17.2	Vyhodnocení stringing testu.....	61
17.3	Vyhodnocení bridring testu	63
17.4	Naměřené hodnoty přesnosti tisku vybraných materiálů.....	64
17.5	Vyhodnocení rozměrové přesnosti artefaktu.....	66
18	Výroba mechanicky namáhané součásti	68
18.1	Montáž brzdové páčky a zatížení při jízdě.....	69
19	Závěr	70
20	Zdroje	72
21	Seznam obrázků	78
22	Seznam tabulek	80

1 Úvod

3D tisk je aditivní výroba, při které dochází k postupnému nanášení jednotlivých vrstev materiálu na sebe pro vznik celých dílů bez použití jiných technologií nebo složitých technologických postupů. Nanášení různých druhů materiálů po jednotlivých vrstvách je možné buď vytvrzováním fotopolymeru laserem, nanášením vrstev termoplastu nebo ve spékání prášku různého chemického složení. Nanášení materiálu ve vrstvách nazvané FDM (Fused Deposition Modeling) je nejznámější a nejpoužívanější metoda. V posledních letech se tento způsob výroby rozšířil snad do všech průmyslových odvětví. Jeho použití nám nabízí rychlou a levnou výrobu plastových dílů s minimálním odpadem.

Od druhé poloviny dvacátého století, kdy byla technologie 3D tisku vynalezena, výrazně pokročila ve svém vývoji a má významné uplatnění v průmyslovém a komerčním světě. K prvním úspěšným metodám 3D tisku patřily technologie: stereolitografie, modelování tavené depozice a selektivní laserové slinování, které se začaly využívat v průmyslovém prototypování. Postupně se technologie 3D tisku vyvíjela nejen pro komerční použití v různých oblastech výroby, ale i pro běžné osobní využití. Technologie 3D tisku se využívá na výrobu prototypů hlavně v automobilovém průmyslu, zdravotnictví, letectví a stavebnictví. Na příklad Boeing využívá 3D tiskárny k vytváření tisíců prvků pro potřebu vojenských a civilních letadel. Široké uplatnění má tato výroba ve zdravotnictví, hlavně v rozvoji tkáňového inženýrství a biomedicínského výzkumu, kde se nabízí široké využití 3D tiskáren pro výrobu unikátních lékařských předmětů, které se obtížně vyrábějí běžným způsobem.

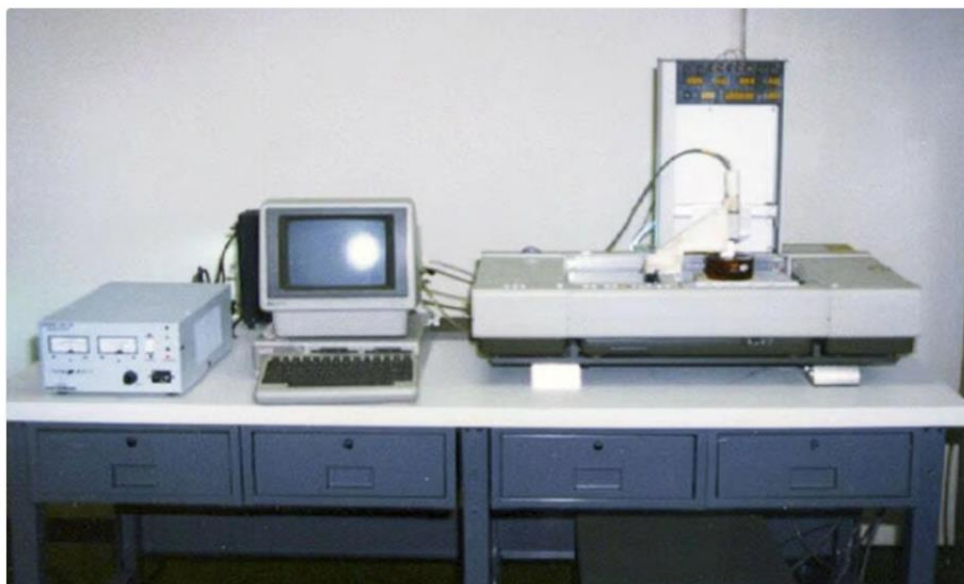
V současné době se na výzkumných pracovištích vyvíjejí stále nové druhy materiálů pro využití při 3D tisku. U nových materiálů se provádí testy mechanických vlastností a určují se u nich podmínky tisku, které ovlivňují výsledné mechanické vlastnosti výrobku a jeho rozměrovou přesnost.

V budoucnosti se bude využití 3D tisku i nadále stále více rozšiřovat a uplatňovat, ale přesto nenahradí tradiční technologie výroby produktů důsledkem anizotropie a nehomogenity modelu. [1]

2 Historie 3D tisku

3D tisk je nová technologie, která vznikla ve druhé polovině 20. století a způsobila velký rozmach v mnoha oborech. Uplatňuje se v průmyslu, letectví, dopravě, lékařství i umění. První významný patent desetiletí podal japonský vynálezce Dr. Hideo Kodama v roce 1981. Svůj vynález popsal jako „zařízení pro rychlé prototypování“. Ještě důležitější je, že byl prvním člověkem, který kdy o patent požádal. V patentu popisoval proces vytvrzování laserovým paprskem. Jeho patent ale nikdy neprošel procesem schválení, protože jeden rok po jeho podání přestal Kodama patent financovat.

Dne 11. března 1986 získal patent na 3D tisk Američan Charles Hull. Svůj patent podal o tři týdny později než francouzský tým, který vedl Alain Le Méhauté. Byl to právě Hull, který dokázal svoji myšlenku uvést do finálního produktu a je dnes označován za takzvaného „otce 3D tisku“. Ve své technice využil tekutého polymeru s laserovým paprskem. Založil svou vlastní firmu s názvem 3D Systems a vytvořil první komerční přístroj pro 3D tisk, zvaný Stereolitografní aparát SLA-1, který ale mohlo využívat je několik zákazníků. V této době se tomuto zařízení neříkalo ještě 3D tiskárna. Společnost 3D Systems postupně vyvinula nový prototyp 3D tiskárny, který byl nazván SLA – 250 a od roku 1988 již mohl být nabídnut široké veřejnosti.



Obrázek 1 Stereolitografní aparát SLA-1 [2]

V roce 1987 vynalezl Carl Deckart techniku SLS (Selective Laser Sintering), což je technika tisku s pomocí laseru. Následně v roce 1989 S. Scott Crump vyvinul techniku FDM (Fused Deposition Modeling), v níž se využívá polymerních vláken termoplastů. V roce 1993 si MIT (Massachusettský institut technologie) nechal patentovat techniku tisku s materiálem ve formě prášku. Firma Z-Corporation tento patent odkoupila a její tiskárny se staly základem těch dnešních.

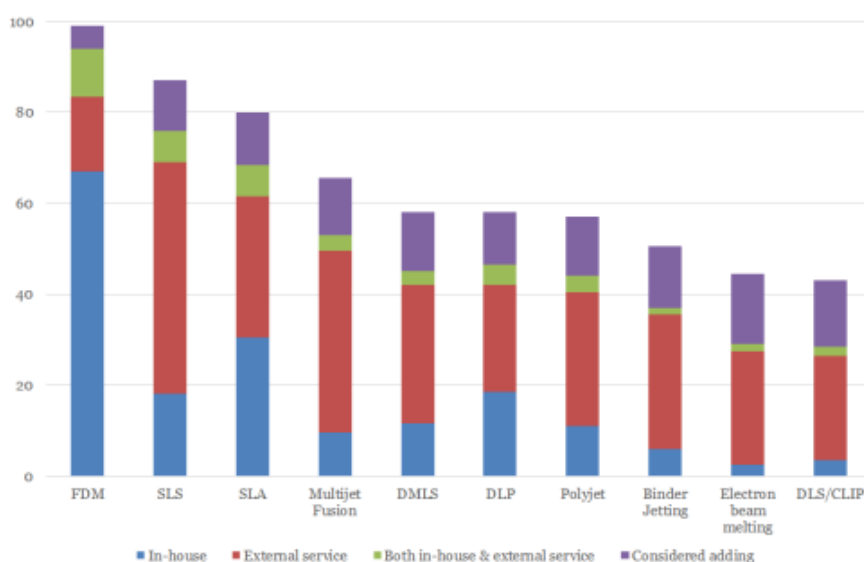
Jako u všech nových technologií byly i začátky 3D tisku pomalé. Využívání 3D tiskáren bylo finančně nákladné a tisk trval dlouhou dobu. Využívaly se nenáročné materiály a vytvářely se jednoduché modely. Následný vývoj a rozšíření 3D tiskáren mezi veřejnost umožnilo jejich využití i v domácích podmínkách.

Objev vytváření složitých struktur vrstvu po vrstvě je převratný. Důvodem úspěchu je přizpůsobivost nárokům zákazníka. Někdy využíváme ke zhotovení produktu laser, elektrickou energii a teplo. Všechny tyto postupy automatizují jednoduchý mechanický postup. Rozvoji potenciálu 3D tiskáren se oprávněně věnuje velká pozornost, protože jejich využití sahá napříč různými odvětvími. V současnosti je tato metoda nejvíce využívána ve vývojových odděleních firem pro rapid prototyping (výroba prototypů pomocí 3D tisku). Uplatnění má v průmyslu, zdravotnictví, stavebnictví, umění, u spotřebního zboží, zbraní, letectví, kosmonautice, ale má například i možnost využití v domácnosti.

Společnost Charlese Hulla 3D Systems Corporation je jedním z nejúspěšnějších výrobců strojů pro rapid prototyping. Největšími světovými výrobci 3D tiskáren jsou společnosti Stratasys a 3D Systems. 3D tisk má obrovský potenciál, aditivní technologie i používané materiály se stále vyvíjejí a zpřístupňují široké veřejnosti. Typickým zástupcem je česká firma Prusa Research, která umožnila cenovou dostupnost 3D tiskáren do všech domácností.[1], [2], [3]

3 Technologie 3D Tisku

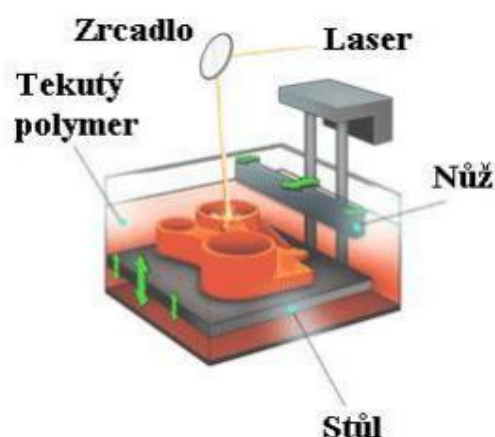
Proces výroby 3D tištěných výrobků spočívá v postupném nanášení jednotlivých vrstev (layer by layer). Typy 3D tiskáren můžeme rozdělit do několika základních typů dle použitého materiálu pro následný tisk. Mezi tiskárny s tuhým stavebním materiálem řadíme FDM (Fused deposition modeling) nebo také pod jiným názvem FFF (Fused Filament Fabrication), dále zde můžeme řadit technologii LOM (Laminated Object Manufacturing), která spočívá v odřezání jednotlivých vrstev materiálu, které jsou srolovány na cívkách. Další způsobem je využití materiálu ve formě prášku. Do této kategorie řadíme technologie SLS, DMLS pro tisk z kovového prášku. Poslední možností je využití materiálu ve formě tekutého roztoku. Mezi technologie, které využívají tuto formu stavebního materiálu patří: Multi Jet, SLA nebo také SHS, kde se oproti laseru u SLA využívá topné těleso. [4]



Obrázek 2 Graf nejprodávanějších typů tiskáren za rok 2020 [6]

3.1 STEREOLOGRAFIE

Metoda stereolitografie označovaná ve zkratce SLA či SL byla vyvinuta v roce 1986 společností 3D Systems a tento typ výroby se používá dodnes. Princip této metody spočívá v reakci fotopolymeru na ozáření laserovým paprskem. Poté dochází k vytvrzení ozářené plochy a postupným osvětlením vznikají jednotlivé vrstvy, které následně zhotoví celý model. Při ozáření se také pohybuje celá podložka směrem dolů, kde je umístěný tisknutý artefakt. Jednotlivá výška vrstev se pohybuje v rozmezí 0,05-0,2 mm. [5]



Obrázek 3 Princip SLA tiskárny [5]

3.2 FDM (Fused Deposit Modeling)

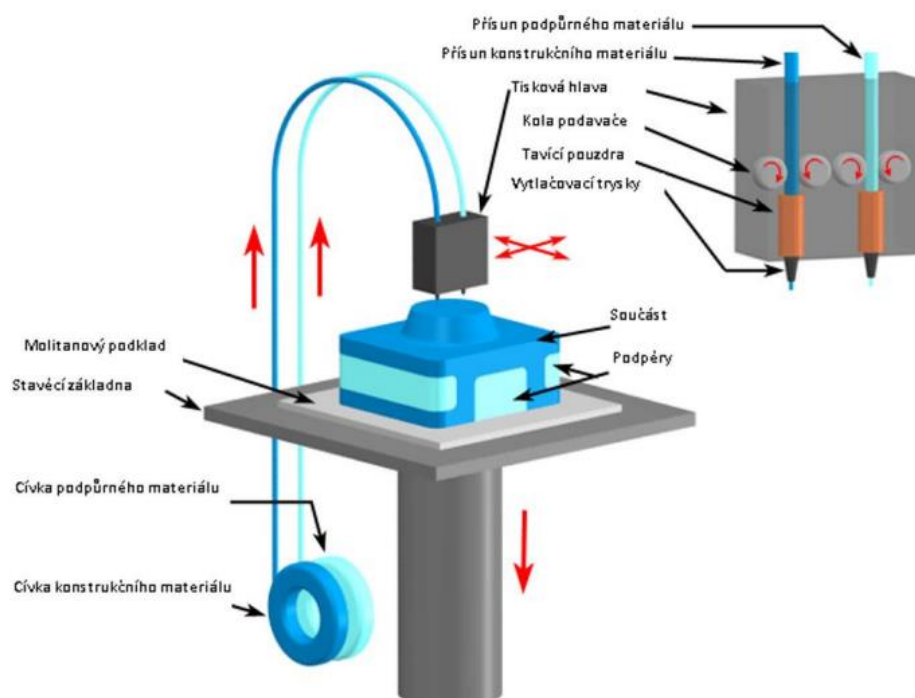
Technologie aditivní výroby, která má název Fused Deposit Modeling (zkráceně FDM), je metoda profesionálního 3D tisku, která přinesla řešení na snížení pořizovacích nákladů na tisk. V roce 1989 S.Scott Crump, jenž je zakladatelem společnosti Stratasys, získal patent na 3D tisk metodou FDM. Po vypršení platnosti patentu v roce 2009 se stala tato metoda dostupnější i pro širší veřejnost.

Základem FDM technologie je natavování filamentu z termoplastu do polotuhého stavu a pomocí trysky daného průměru se nanáší vrstva po vrstvě na tiskovou podložku. Po nanesení jedné vrstvy se podložka posune a tiskne se další vrstva. Tento postup pokračuje až do úplného zhotovení tisknutého modelu.

Klíčem 3D tisku je možnost pohybu ve třech osách X, Y a Z. Příkladem může být tiskárna Prusa i3 MK3. U tohoto typu tiskárny je pohyb v ose Y vykonáván deskou a pohyby v osách X

a Z zajišťuje tisková hlava. To vše umožňují tiché, elektricky poháněné motory. Nejdůležitější částí každé 3D tiskárny je její tisková hlava, kde dochází k zahřívání a ochlazování materiálu. Ochlazování materiálu je nutné při retrakci, kdy se materiál nasouvá zpátky do tiskové hlavy. Ohřátím filamentu dochází k objemové roztažnosti, což může mít za následek ucpání celého hotendu. Další neméně důležitou součástí 3D tiskárny je její podložka, na kterou pokládáme první vrstvy roztaveného filamentu. Hlavní funkcí této části tiskárny je docílení dostatečné adheze a menší teplotní diference. Tisková podložka je vyrobena z pružinové oceli a hladký povrch umožňuje tenká vrstva PEI. Tiskové podložky se však mohou měnit v závislosti na použitém materiálu. Tento typ podložky je však zdaleka nejpoužívanější. Podložky jsou dostupné v různých materiálových variantách s různými úpravami povrchů.

Využití FDM technologie nám umožňuje použití velkého množství materiálu k tisku a zhotovení modelů různých tvarů, u kterých je možné dělat další úpravy jako je například broušení, pokovování, lakování a podobně. Tato technologie se hlavně využívá v automobilovém průmyslu při výrobě funkčních prototypů plastových dílů s mechanickými vlastnostmi, dále pak ve stavebnictví, leteckém průmyslu, zdravotnictví a kosmonautice. [6], [7], [8]

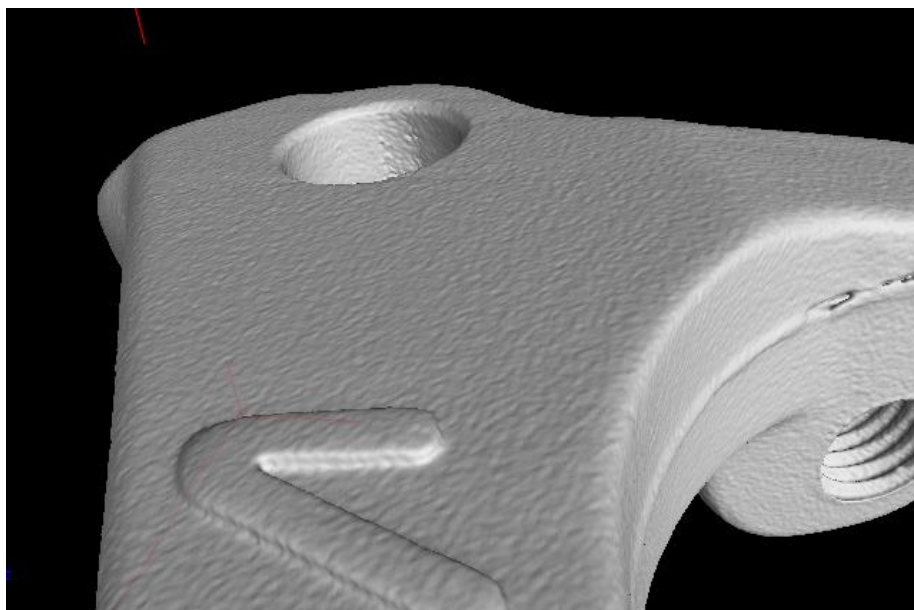


Obrázek 4 Princip FDM tiskárny [9]

4 Postup výroby

4.1 CAD model

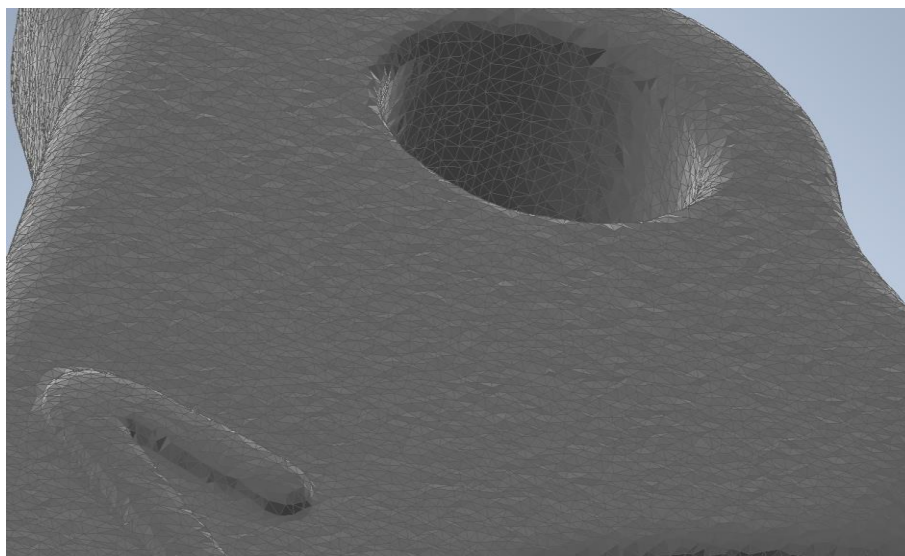
Na počátku každého 3D tisku je zapotřebí zhotovit návrh modelu, který následně bude tisknut. Pro tvorbu 3D modelu je využíván CAD software. Ve své práci jsem použil software Autodesk Inventor. Existují také další možnosti jako například Solidworks. Jedním z postupů získání trojrozměrných modelů je jejich skenování. Moderním způsobem získání potřebných dat jsou programy, které mohou být součástí mobilních telefonů. Pro skenování do těchto zařízení se využívá Fotogrammetrie. Tato technologie využívá fotografií předmětu, který je vyfocen z více úhlu za použití kamery nebo fotoaparátu. Celý proces vychází z výpočtu umístění bodů v trojrozměrném prostoru. Tyto série fotografií předmětu se exportují do programu, který poté vyhodnocuje společné prvky na všech fotografiích. Tento způsob získávání informací není zdaleka tak dokonalý jako při využití CT (Computed Tomography), které využívá rentgenového záření. [10]



Obrázek 5 Získaný 3D model motorkové páčky pomocí technologie CT

4.2 STL

V 80. letech 20. století Chuck Hull vynalezl formát pro přenos informací mezi CAD softwarem a 3D tiskárnou pod názvem STL (Standard Triangle Language). Základní myšlenkou je mozaikování povrchu 3D modelu pomocí malých trojúhelníků (Obr. č.6). V závislosti na velikosti trojúhelníků se odvíjí také přesnost výsledného modelu. Čím menší budou trojúhelníky, tím přesnější výsledný model bude. [6], [11]



Obrázek 6 Model páčky převedený do formátu STL

4.3 Slicer

Slicer je program, do kterého vkládáme model ve formátu STL (Standard Triangle Language). Máme zde možnost vizualizace postupných vrstev materiálu a také jejich podpěr. Při použití tohoto programu si nejprve volíme typ tiskárny a materiál, který použijeme. Pro optimální požadovanou kvalitu a postup tisku zvolíme například: teplotu trysky, teplotu vyhřívané podložky či komory, tloušťku a výšku vrstvy, hustotu a tvar výplně, rychlost tisku, chlazení, orientaci drah, re-trakci, vzdálenost trysky od artefaktu a jiné. Různé Slicer programy mohou mít omezený přístup pro nastavení tisku a jsme proto nuceni využít přednastavené parametry. Výstupní parametry tisku jsou nejčastěji převedeny do tzv. G-kódu. Jedná se o textový soubor, který vkládáme do tiskárny. Nejčastěji používané programy pro 3D tisk jsou Cura, Prusa Slicer, Grabcad, KISSlicer (Keep It Simple Slicer) nebo také Simplify3D, který je jako jediný ze zmíněných zpoplatněný. Program Grabcad disponuje propracovanějším vedlejším programem Insight, ve kterém můžeme do drobných detailů upravovat parametry tisku. [12]

4.4 Tisk

Dalším následným postupným krokem je již samotný tisk požadované součásti na 3D tiskárně. Zde se musíme ujistit, že podložka na tisk je řádně očištěna od prachu, mastnoty nebo jiných nečistot. Pro tisk je velmi důležité správné uchycení prvních vrstev pro celkovou přesnost, proto se například doporučuje u určitých materiálů nanést na podložku lepidlo na papír. Do tiskárny také musíme vložit příslušný filament, pro který jsme zvolili tisk. G-kód přenášíme pomocí externího uložště, které vložíme do tiskárny a na jejím displeji zvolíme příslušný soubor tisku. Před spuštěním procesu tisku je nutné správně nastavit a zkalibrovat tiskárnu. Následný tisk je plně automatizovaný a není proto nutné do procesu tisku nijak zasahovat.

4.5 Post-procesing

Výsledný tisk není zdaleka hotový. I přes správný postup výroby a nastavení tisku vznikly drobné vzhledové vady a povrch není hladký, proto využíváme dokončovacích úprav neboli post-procesing pro konečný požadovaný vzhled a přesnost modelu. Do těchto úprav řadíme také odebrání nechtěných podpor tisku. Odlamováním nebo za pomoci různých roztoků můžeme odstranit příslušné podpory dle použitých materiálů. Na povrch modelu můžeme nanášet barvy nebo brousit pro dosažení hladšího stejnorodějšího povrchu. Některé materiály je možné vystavit nejčastěji používaným acetonovým párám pro zajištění lesklého vzhledu povrchu. [6]

5 Podpůrná konstrukce

S rostoucími nároky na vlastnosti materiálů jde v ruku v ruce i náročnost konstrukce samotného modelu. Podpůrné struktury se využívají u úhlů přesahujících 45° . Materiál se při tisku například různých zkosení postupně rozšiřuje a musí být přichycen na předchozí vrstvu. Při tisku větších úhlů hrozí tisk ve vzduchu a nepřichycení k poslední vrstvě materiálu. V závislosti na délce vyčnívající plochy v artefaktu větších než 5 mm nám slicer vygeneruje potřebné podpory pro náš model.

Ve slicer programu máme také možnost odstranit vygenerovaný support. Důležitou vlastností podpor je jejich snadné odstranění. Support máme možnost jen jednoduše odlomit od modelu, nebo také rozpustit. Při odlamování podpůrné konstrukce nám bohužel hrozí i poškození samotného modelu. Někdy support nemůže být jednoduše odlomen a je nutné jej brousit. Průmyslové tiskárny disponují zpravidla dvěma tiskovými hlavami. Jednou pro samotný materiál a druhou pro support. V tomto případě se využívají rozpustné materiály, jako je například polyvinylalkohol, jenž je rozpustný ve vodě nebo v roztoku hydroxidu sodného a vody, pro rychlejší odstranění. [13]



Obrázek 7 Vytisknutá spojková páčka motorky s neodstraněnými podporami tisku

6 Materiály pro 3D tisk

Materiály používané ve 3D tisku mohou mít několik forem, a to buď v práškové, drátové, kapalinové nebo také pásové formě. Pro FDM 3D tisk se využívají dlouhé tenké dráty obvykle termoplastů o průměru 1,75 mm a váze 1 kg namotaných na malých cívkách. U používaných materiálů jsou kladeny stále větší nároky na jejich mechanické vlastnosti, tepelnou odolnost, kvalitu povrchu, tisknutelnost, design a následný jednoduchý post-processing. Důsledkem toho vědci vyvíjejí nové a lepší materiály pro uspokojení potřeb zákazníků. Vhodnou volbou materiálu zajistíme naplnění požadovaných vlastností finálního výrobku. Pro každý materiál výrobce poskytuje data a rady pro následný tisk (obrázek). Díky technologii 3D tisku je možné snížení odpadu materiálu oproti konvenčnímu soustružení nebo frézování na minimum. Další výhodou je také možnost výroby struktur, kterých běžnými technologiemi nelze dosáhnout. Pro všechny tyto vlastnosti se již plastový 3D tisk objevuje také v leteckém průmyslu, a to i přes vysoké požadavky na vlastnosti použitého materiálu a zajištění celkové bezpečnosti v provozu.

Flexibilita materiálů a jejich dostupnost na trhu je jednou z velkých výhod FDM 3D tisku. Pro tuto metodu tisku můžeme volit z nabídky exotických i zvláštních materiálů, jako jsou například plasty z uhlíkových vláken, materiály svítící ve tmě, vlákna s kovem nebo termoplasty podobné gumě. Zlepšení vlastností materiálů můžeme dosáhnout přidáním vláken nebo minerálů. Můžeme tak dosáhnout lepší tuhosti, pevnosti, tvrdosti, HDP (teploty tepelné deformace) a chemické kompatibility. Funkčnost nebo materiálové vlastnosti (například elektrostatický výboj nebo ESD), které nebyly v materiálu obsaženy, můžeme přidat pomocí aditiv.

Důležitým parametrem pro materiály nejsou jen jejich mechanické vlastnosti, jež jsou definovány různými veličinami jako je například modul pružnosti, tažnost, mez pevnosti a mnohé jiné, ale také hodnota teploty skelného přechodu. Tato teplota nám definuje, kdy polymer mění své vlastnosti a přechází z tvrdé formy na měkkou. Při překročení této teploty hrozí ovlivnění mechanických vlastností dostupných v technickém listu pro daný materiál. [8], [14], [15]

Tabulka 1 Vlastnosti vybraných materiálů [17], [18], [19], [20], [21], [22]

Materiál	Pevnost v tahu [MPa]	Rázová houževnatost metodou IZOD [$\text{J} \cdot \text{m}^{-2}$]	Modul pružnosti v tahu [MPa]	Teplota skelného přechodu [°C]	Tažnost [%]	Hustota [$\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$]	Cena za kg [Kč]
ULTEM 9085	70	88	2510	186	5,4	1,27	5000
PEKK	109	107	3300	165	4	1,34	20000
DIRAN	40	380	1690	117	12	1.12	5000
PC	68	53	2280	150	4,8	1,2	1400
Nylon	61	200	1900	90	10	1,15	2000
ABS	22	107	1627	90	6	1,05	350
PET-G	50	101	1500	80	5,1	1,18	700
PLA	26,4	16	2120	60	4	1,17	350
PMMA	65	10	1300	106	5	1,18	500

6.1 PLA

Jedním z nejvíce rozšířených materiálů pro plastový 3D tisk je PLA (polylaktid), nebo také pod českým názvem kyselina polymléčná. Jedná se o biologicky odbouratelný materiál, který se vyrábí z bramborového nebo kukuřičného škrobu nebo také z cukrové třtiny. Díky tomu je šetrný k životnímu prostředí, je biokompatibilní s lidským tělem a také ekologicky recyklovatelný. Potřebná teplota trysky při tisku se pohybuje okolo 180-220 °C. Má výborné vlastnosti pro tisk teplotně a chemicky nenáročných součástí hlavně díky jeho nízké teplotní roztažnosti. Další výhodou je možná absence vyhřívané podložky. Díky tomu není potřeba investice do dražších typů tiskáren. Velkou oblíbenost také podporuje jeho cenová nenáročnost a dobré mechanické vlastnosti. Teplota skelného přechodu se pohybuje v rozmezí 60-65 °C. Již při těchto teplotách může docházet ke změnám mechanických vlastností. Další nevýhodou PLA je jeho typický zápach a náchylnost na tvorbu deformace ve tvaru bublinek na povrchu při tisknutí ve vlhkém prostředí. PLA také degraduje při vystavení UV záření. Tento materiál je dostupný ve velké barevném spektru. Vzhledem k vlastnostem PLA se jeho využití zužuje do domácích prostorů pro různé hračky, modely, krabičky a jiné. [23], [24], [25]

6.2 ABS

Dalším zástupcem hojně využívaných levných materiálů pro FDM 3D tisk je ABS neboli Akrylonitrilbutadienstyren. Jedná se termoplastický polymer, který je díky svým výborným mechanickým vlastnostem a houževnatosti využíván u namáhaných funkčních dílů. ABS má oproti PLA vyšší teplotní odolnost. Potřebná teplota trysky při tisku se pohybuje okolo 250 °C. Při zvolení toto materiálu je již potřeba použít vyhřívané podložky tiskány, přičemž se teplota podložky pohybuje okolo 100 °C. Nejčastěji se využívá hladká nebo zdrsňená podložka pro snadnější vyjmutí artefaktu. Teplota skelného přechodu se pohybuje okolo 100 °C.

Známým faktem je, že při tisku ABS se uvolňují toxické výpary, které mohou být zdravotně závadné. Z tohoto důvodu by měl tisk probíhat v uzavřeném boxu, ve kterém je tiskárna umístěna nebo u dražších typů tiskáren je již zabudovaná v konstrukci. Pokud není k dispozici žádný box, doporučuje se umístění tiskárny v dostatečně odvětrávané místnosti. Tisk tohoto materiálu by neměl probíhat v obytných místnostech, kde ale většina „hobby“ uživatelů má svoji tiskárnu umístěnou.

Nevýhodou umístění tiskárny do boxu je její snížená živostnost. Vysoké teploty nemají dobrý vliv na elektroniku a plastové části tiskárny, což způsobuje její vyšší poruchovost. Výhodou je ale snadný post-processing. ABS je možné brousit za využití například leštění, při aplikaci acetonových par je možné docílit lesklého a hladkého povrchu tištěného objektu. Leštění nesmí však trvat příliš dlouho, protože pak dochází až k zdeformování ve formě pórů a dutinek, které nepříznivě ovlivní celkovou drsnost povrchu modelu. Při tomto typu post-processing by měla být pečlivě kontrolována teplota, tlak páry a v neposlední řadě také čas. Jednou z dalších nevýhod může být smršťování materiálu při chladnutí, či nízká odolnost vůči UV záření, které způsobuje zvýšenou křehkost materiálu. Smrštění se pohybuje v rámci jednoho až dvou procent, což může ovlivnit přesnost výroby. Celkově tisk ABS není jednoduchý, ale při vydařeném tisku má výsledný produkt výborné vlastnosti. Využití tohoto tisku je velmi široké od kostiček LEGO, různých hraček, až po levnější díly do aut. [26], [27]

6.3 PC

Známým materiálem pro svoji pevnost, houževnatost a tepelnou odolnost, ale náročným procesem tisku, je PC (Polykarbonát). Potřebná teplota trysky se pohybuje až k hodnotám okolo 280 °C. Jako u předchozího materiálu ABS je zde nutná vyhřívaná podložka, která musí být vyhřáta na teplotu okolo 110 °C. Tyto vysoké teploty tisku nejsou schopny umožnit všechny tiskárny. Na rozdíl od předešlých dvou materiálů je tento materiál 2krát až 3krát dražší podle značky výrobce. Cena Prusament PC Blend Natural se pohybuje okolo 1400 Kč za kg, což je oproti PLA a ABS značný rozdíl. Kvůli svému rychlému smrštění je důležité, aby došlo k uchycení materiálu na podložku. Na druhou stranu je také nutné dostat vyrobený artefakt z podložky pryč. K tomuto účelu je využíván saténový nebo texturovaný plát magneticky ukotvený na vyhřívaném lůžku tiskárny.

Polykarbonát má podobnou nežádoucí vlastnost jako již zmíněný materiál PLA. Při tisku je velmi náchylný na vlhkost, kterou absorbuje. Vlhkost má vliv na celkové vlastnosti tisku a jeho pevnost. Po vyjmutí z ochranného vaku je nutné filament uzavřít do vzduchotěsných nádob či vaků za účelem zamezení přístupu vlhkosti. Polykarbonát se často tiskne kvůli své vysoké teplotě tisku v uzavřených boxech pro zachování vyšší teploty okolí, která pomůže zajistit kvalitnější výsledek tisku. Tento materiál je velmi odolný vůči vysokým teplotám. Teplota skelného přechodu je 150 °C, což rozšiřuje jeho další možnosti využití. Často se využívají různá aditiva v kombinaci s PC, která umožňují nižší teploty tisku jako například PC-ABS. Při podařeném velmi náročném procesu tisku má polykarbonát široké možnosti uplatnění jako jsou vysoce pevné díly, tepelně odolné modely, nebo také pro své dobré elektro izolační vlastnosti se využívá v elektronice. Tento materiál není známý jen ze světa 3D tisku. Jsou z něho vyráběna například neprůstředná skla nebo také DVD. [28]

6.4 PET-G

(Polyethylentereftalát-Glykol) neboli pod zkratkou PET-G, je velmi dobrá alternativa k levnějším a dobře tisknutelným materiálům jako je například PLA. PET (Polyethylentereftalát) je nejrozšířenějším plastem na světě, jenž se využívá při výrobě lahví, sáčků, různých obalů a vláken. I přes využití PET v syntetických vláknech nemá v 3D tisku tak dobré výsledky jako jiné termoplasty. To je důvodem vzniku varianty PET-G, zkratka G v názvu označuje glykol. Ten je součástí polymerační reakce, která nahrazuje část etylenglykolu

v řetězci molekul. Tento materiál kombinuje vlastnosti PLA a ABS. Jako ABS disponuje PET-G houževnatostí, teplotní a mechanickou odolností. Na druhou stranu je stejně jako PLA dobře tisknutelný. [23], [29], [30]

Bohužel poskytuje horší výsledky při zkoušce převisu a brigde testu. Trpí také problémem lehkého stringování. Teplota trysky při tisku se pohybuje okolo 240°C a teplota vyhřívané podložky 90°C. Nutné je využití texturované nebo saténové podložky pro následný tisk, jinak by mohlo hrozit její poškození. Tento materiál má velmi dobrou přilnavost na podložku a má velmi malou tepelnou roztažnost, tudíž nedochází ke kroucení jako u ABS nebo PC. Teplota skelného přechodu se pohybuje okolo 80°C, což z něho dělá teplotně velmi odolný materiál. Stejně jako PET je i PET-G zdravotně nezávadný a je možné s ním tisknout například různé skleničky, boxy na jídlo nebo také přístroje. Díky lesklému filamentu se hodí k výrobě hraček a je velmi lehce obrobitelný. Pro své dobré vlastnosti je ukázkovým příkladem využití tohoto materiálu česká firma Prusa, která využívá tento materiál při výrobě různých komponentů do svých 3D FDM tiskáren. [29], [30]

6.5 Nylon

Dalším často využívaným materiálem pro svou odolnost a pružnost je nylon (polyamid). Vlákná filamentu vyžadují při tisku vyšší teploty extruderu okolo 250°C, a vyhřívanou podložku s teplotou okolo 90°C. Stejně tak jako řada zmíněných materiálů je i nylonové vlákno velmi hygroskopické. Dochází k velké absorpci vlhkosti ze svého prostředí, která může vést ke snížené kvalitě tisku a deformaci. Jako u PC je velmi důležitým procesem i skladování materiálu ve vzduchotěsných vacích či nádobách. Při absenci vzduchotěsných nádob je možné filament vysušit v potravinářské sušičce či horkovzdušné troubě. Pro dosažení kvalitních výsledků tisku je zapotřebí dosáhnout vyšších teplot okolí při tisku. Za tímto účelem je možné využití boxu pro 3D tiskárny, aby bylo dosaženo teploty okolí přibližně 45°C. Při nižších teplotách hrozí deformace vlivem rychlého chladnutí, následného smrštění a kroucení materiálu. Nylon je nicméně využíván pro tisk mechanických dílů díky své pevnosti a pružnosti. Tento materiál rovněž disponuje vysokou hodnotou lineárního smrštění. Cena tohoto filamentu se pohybuje ve vyšší cenové kategorii, a to okolo 2000 Kč za kg. [31]

6.6 PMMA

Polymethylmethakrylát jinak známý pod zkratkou PMMA je čirý, lesklý, termoplastický akrylát, který se v praxi využívá při nahrazení skla. Dalšími skvělými vlastnostmi PMMA jsou jeho pevnost a hustota. Teplota trysky tiskárny se pohybuje okolo 250 °C s doprovodnou teplotou tiskového lože 100 °C. Teplota skelného přechodu je 106 °C. Ve srovnání se sklem má PMMA srovnatelnou čírost a dobré absorpční vlastnosti UV záření. U těchto teplotně více náročnějších materiálů jako je například nylon nebo PC je také vyžadováno umístění 3D tiskárny do boxu za účelem dosažení vyšších teplot okolí a předcházení tvoření deformací. Nedílnou součástí tisknutí PMMA jsou rovněž toxické výpary jako u ABS. Pro dosažení transparentnosti výsledného produktu je nutná optimalizace rychlosti, teploty tisku a patřičný post-processing. Při nekonstantní teplotě v průběhu tisku hrozí deformace a neprůhlednost objektu. Zpravidla platí čím vyšší bude rychlost tisku, tím průsvitnější by mohl celkový výrobek být. Cena se pohybuje v okolí 700 Kč za kg. [32]

6.7 ULTEM

ULTEM je jeden z nejlepších vysoce odolných materiálů na trhu. Jedná se o termoplastický Polyetherimid (PEI). Tento materiál se odlišuje od jiných termoplastů mechanickou stabilitou pod extrémními podmínkami. ULTEM je na rozdíl od materiálu PEKK až čtyřikrát levnější. Hlavní výhodou ULTEM je jeho pevnost. Tento fakt je jedním z důvodů, proč je tento materiál využíván v leteckém, automobilovém i kosmickém průmyslu. Teplota skelného přechodu ULTEM 1010 je 217 °C a do této teploty je schopen odolávat i delší dobu. K porovnání s ULTEM 9085 se teplota skelného přechodu pohybuje okolo 157 °C. Unikátní vlastností ULTEM je jeho chemická odolnost. Většina amorfních termoplastů se deformují při kontaktu s oleji, tuky a dalšími agresivními látkami, zatímco ULTEM poskytuje odolnost vůči široké škále chemikálií, jako jsou alkoholové roztoky s vodou, slabé zásady, kapaliny do ostříkovačů čelního skla auta, automobilové kapaliny (například benzín a uhlovodíky), a také snese mírné vystavení silným zásadám, nemrznoucí směsi, motorovému oleji, tukům, slabým kyselinám a další. ULTEM je také biokompatibilní a může být využit při transplantacích a mnohých dalších lékařských zákrocích. ULTEM disponuje certifikátem NST-51, který garantuje zdravotní nezávadnost materiálu při kontaktu s potravinami. Značnou nevýhodou ULTEM 1010 je velmi náročný proces tisku. Ten musí probíhat v uzavřené tiskárně s okolní teplotou

okolo 160 °C, teplotou trysky okolo 350 až 400 °C v závislosti na rychlosti tisku. Teplota podložky se pohybuje okolo 180 °C. Tyto faktory nás při tisku limitují a dochází ke značnému ohýbání a kroucení. Tisk velkých součástí bez těchto parametrů tisku je zcela nemožný. Tento fakt dal impulz ke vzniku ULTEM 9085, který disponuje lepšími parametry pro tisk za cenu nižší teplotní a mechanické odolnosti, která přesto zůstává velmi vysoká. Teplota trysky je 350 °C, teplota vyhřívané podložky je 150 °C s teplotou v uzavřeném boxu v rozmezí 80-150 °C v závislosti na rychlosti tisku a velikosti součásti. Tento materiál se řadí svými vlastnostmi k naprosté špičce FDM 3D tisku. [33], [34]

6.8 Diran

Diran 410MF07 je termoplast od firmy Stratasys a je založen na nylonové bázi. Pro zlepšení svých pevnostních vlastností je plněný minerály ze 7 % své celkové váhy. Výsledný produkt je hladký s nízkým kluzným odporem. Díky své houževnatosti a chemické odolnosti hlavně vůči uhlovodíkům nachází Diran uplatnění například v části robotických ramen, kde může nahradit těžší hliníkovou konstrukci, která může i teoreticky poškodit povrch objektu. Diran je jako většina FDM 3D tisknutelných materiálů citlivý na vlhkost, která může způsobit deformaci cíleného produktu. Teplota trysky při tisku je 280 °C s doprovodnou teplotou vyhřívané komory 90 °C. Pokud byl materiál v nečinném stroji uložen déle než 24 hodin, je nutné jej vysušit, a to například vložením cívky s filamentem do horkovzdušné trouby na teplotu 70 °C po dobu 4 hodin. Tato doba vysoušení se může lišit dle délky vystavení materiálu vlhkosti. Tisk je prováděn na jednorázové teplotně odolné desce, která napomáhá snadnému vyjmutí modelu. Díky svým minerálním aditivům je Diran velmi anizotropní, tudíž musíme dle zatížení modelů volit správnou orientaci vrstev. Teplota skelného přechodu je u tohoto typu materiálu 90 °C, což z něho dělá teplotně odolný materiál. Tisk je uzpůsobený na tiskárně F370 od firmy Stratasys, která disponuje rovněž vyhřívanou komorou pro docílení požadovaných parametrů modelů. Nevýhodou využívání tohoto materiálu je pořizovací cena tiskárny, která se může pohybovat v jednotkách milionů. [18]

6.9 PEKK

Poly-Ether-Keton-Keton je jedním z dražších a nejvýkonnějších materiálů pro FDM 3D tisk. Disponuje extrémní tepelnou, mechanickou a chemickou odolností. Je nástupcem velmi špatně tisknutelného plastu PEEK. Teplota skelného přechodu je 162 °C. Teplota extruderu se pohybuje v rozmezí 340 až 360 °C s teplotou vyhřívané desky v rozmezí 120 až 140 °C a teplotou vyhřívané komory 70 až 150 °C. Tyto hodnoty se odvíjejí od velikosti modelu a rychlosti tisku. Mezi žádané vlastnosti tohoto materiálu se řadí: nízká produkce kouře a vysoká odolnost vůči ohni, vynikající mechanické vlastnosti, odolnost vůči široké škále chemikálií používaných v leteckém, automobilovém a kosmickém průmyslu. Výborným poměrem hmotnosti a pevnosti dokáže nahrazovat díly v leteckém průmyslu, za účelem snížení hmotnosti. PEKK je také dostupný ve variantě, kde je filament vyztužený uhlíkovým vláknem. Cena může vyšplhat až ke 20 000 Kč za kg, což je více než cena běžných „hobby“ tiskáren. [35]

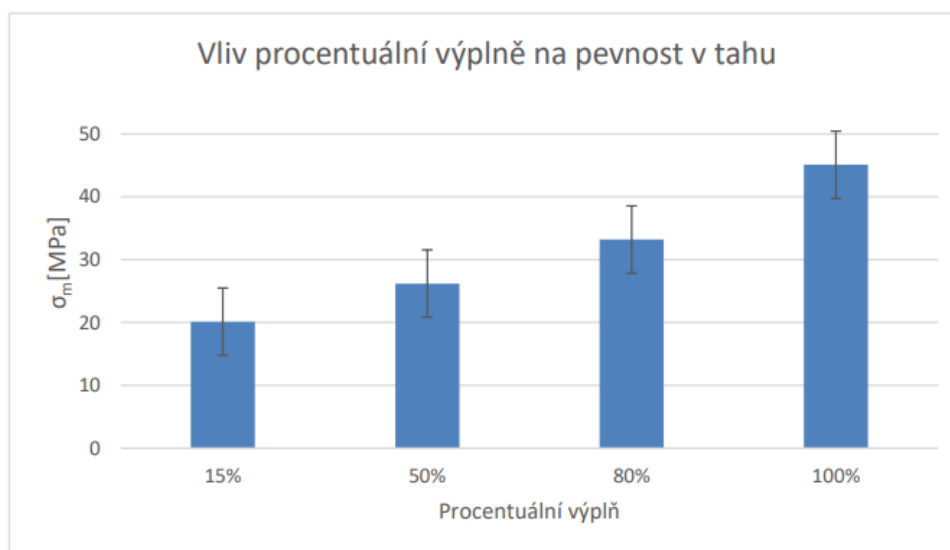
7 Vliv FDM 3D tisku na mechanické vlastnosti modelu

Může se zdát, že technologie 3D tisku je bezchybná. Bez větších obtíží jsme schopni za pár hodin vyrobit tvarově velmi náročné součásti. Tato technologie má však svá úskalí a tradiční způsoby výroby nemůže nikdy zcela nahradit. Mezi problémy této technologie můžeme řadit problematiku spojování dvou vrstev. Kvalita spojení dvou roztavených filamentů se odvíjí na velikosti překryvu vrstev a teplotě tisku. Při správně zvoleném překryvu nám dochází k žádoucí molekulové difúzi, která způsobí propojení filamentu a zlepšení mechanických vlastností. Pokud by však při tisku vznikla mezera mezi vrstvami nebo by byl překryv příliš malý, dochází k nedostatečnému provázání molekul materiálu. Tento problém může vést ke vzniku vzduchových mezer a horších mechanických vlastností, čímž vzniká nehomogenita.

Problém týkající se nehomogenity vzniká již při zpracování dat modelu programem typu Slicer. Tento program generuje trajektorie tiskové hlavy a zobrazuje trajektorii vrstvy v jednotlivých výškových úrovních modelu. Po následném vygenerování těchto cest je patrné, že vrstva materiálu nemůže být nikdy plná a vzniká tedy chyba v podobě vzduchových kapes. Tato nedokonalost může být pouze redukována velikostí vrstvy materiálu, ale nikdy nemůže být úplně odstraněna.

Mezi další faktory ovlivňující mechanické vlastnosti patří anizotropie modelu závisící na orientaci tisku. Při upravování tiskových parametrů je nutné si uvědomit, jak bude požadovaný model zatěžován a následně tomuto faktu přizpůsobit orientaci výplně či natočení součásti. S. Ahn a spol. [36] provedli řadu testů optimálního překrytí a orientace výplně. Provedli řadu tahových zkoušek termoplastu ABS a nejvyšších hodnot síly při přetržení bylo docíleno při orientaci vrstev 0° a $0^\circ/90^\circ$. Orientace při 0° znamená, že vlákna jsou umístována podélně po delší straně testovaného objektu. Orientace při typu $0^\circ/90^\circ$ označuje, že filamenty jsou pootočený o 90° po jedné vrstvě. V tomto případě se jednalo o 100% množství výplně v celém objektu. Při tisku máme možnost zvolit hodnotu výplně (infil) a také předem předvolených tvarů výplně. Zpravidla platí, čím nižší je hodnota infilu, tím horší jsou mechanické vlastnosti tištěného modelu. Analogicky tento trend smyslu orientace výplně můžeme pozorovat u zkoušek rázové pevnosti. Nejlepšími výsledky disponovaly materiály, u kterých byla zvolena orientace na podložce v osách X a Y při hodnotě infilu 100 %. Hodnoty

rázové houževnosti jsou proto uváděny v technických listech při tomto nastavení tisku. [22], [37]



Obrázek 8 Graf vlivu procentuální výplně na pevnost v tahu [38]

8 Poruchy a časté vady při FDM tisku

Nedílnou součástí FDM tisku jsou vady na konečném modelu. Výsledný model není nikdy dokonalý a je velmi závislý na mnoha proměnných faktorech: na zvoleném materiálu, samotné optimalizaci tisku jako je například teplota extruderu a vyhřívané podložky, rychlost tisku, hustota a tvar výplně, výška vrstvy a mnohé další. Jak bylo již zmíněno některé materiály jsou velmi náchylné na vlhkost a je proto nutné dbát i na jejich správné skladování dle podmínek definovaných výrobcem.

„Hobby“ FDM tiskárny jsou často nechráněné, a proto je následný proces tisku velmi náchylný na vnější vlivy prostředí. Je obecně známo, že většina uživatelů „hobby“ tiskáren nechává tisk probíhat celý den a noc a v posledních minutách tisku se jdou podívat, jak tisk nakonec dopadl. V řadě případů může být uživatel velmi překvapen, jak konečný předmět ve výsledku vypadá. Různé problémy s tiskem mohou být také způsobeny novým hůře tisknutelným materiálem jako je například polykarbonát, se kterým uživatel „hobby“ tiskáren nemusí mít velké zkušenosti. Dále uvedu pár příkladů vad tisku, které mohou být způsobeny použitím náročnějších a hůře tisknutelných materiálů s nedostatečnou optimalizací tisku. [39]

8.1 Warping

Warping neboli pod českým výrazem kroucení nastává vlivem kontrakce mezi jednotlivými vrstvami materiálu. Kontrakce vznikají postupným ochlazováním vrstev, které zmenšují svůj objem a nadzvedávají tím vrstvy pod sebou. Jednou z možností, jak může být tento problém eliminován, je dostatečná přilnavost materiálu k podložce. Nedostatečnou přilnavost materiálu k podložce máme možnost částečně nebo také úplně odstranit. Nejdříve je nutné se ujistit, že tisková plocha je čistá bez prachu, mastnoty a jiných nečistot. Dále zvolíme doporučenou tiskovou desku pro příslušný materiál.

U určitých materiálů jako je například nylon je možné použití lepidla, kterým potřeme plochu, kde bude následný objekt tištěn. Další možností je snížení rychlosti tisku, které pomůže k vyšší celkové adhezi vrstev pomalejším chladnutím. Nákladnějším ale velmi účinným řešením je vestavení tiskárny do boxu, nebo zakoupení tiskárny se zabudovanou vyhřívanou komorou. Toto řešení nám umožní tisk problematictějších materiálů jako je nylon, Polykarbonát a jiné. U tisku modelů z PLA a PET-G s nízkou teplotou skelného přechodu může v tiskárnách

s vyhřívanou komorou docházet k deformaci. Součástí ohybu je spojováno také praskání celého artefaktu. Tento problém je rovněž způsoben kontrakcemi mezi vrstvami a má podobné řešení jako kroucení. Pro eliminaci praskání je zapotřebí vyšších teplot tisku a zajištění požadovaných teplot okolí dle použitého materiálu. [39], [40]

8.2 Stringing

Stringing je často doprovázeno odkapáváním filamentu z teplé části trysky. Tento problém může vzniknout špatnou teplotou trysky, ze které se odkápnou menší množství materiálu, který se nalepí na trysku. Poté dochází ke vzniku typických tenkých vláken mezi jednotlivými částmi modelu. Řešení tohoto problému spočívá ve snížení teploty extruderu a kalibrační rychlosti navíjení (retraction speed). [39], [41]

8.3 Bridging

Bridging neboli přemostění spočívá v tisknutí vodorovné části modelu na delší vzdálenosti bez použití podpůrných konstrukcí, které by v tomto případě byly zcela na místě. Pro získání co nejlepších výsledků je důležitá nižší rychlost tisku pro dosažení dostatečné adheze materiálu.

Dalším parametrem tisku, kterým můžeme docílit neprohnutého přemostění, je snížení teploty extruderu a zapnutí ventilace pro rychlejší chlazení. Důsledkem toho je materiál méně tekutý a nedochází tak k značnému prohnutí. Teplota však nesmí být příliš nízká, jinak by mohlo dojít k podextruzi (nerovnoměrnému vytlačení materiálu). Důsledkem podextruze jsou chybějící nevytištěné části na modelu. [39], [42]

9 Testovací artefakt pro různé materiály v FDM 3D tisku

Technologie a materiály se nám ve světě 3D tisku stále více modernizují, jejich limity se stále zvyšují a rozšiřují se možnosti jejich využití. Pro zjištění vlastností materiálů a optimalizace tisku nám slouží referenční artefakty. Tyto artefakty vznikají k posouzení vlastností materiálů a omezení dostupné technologie tisku. Vzhledem k dostupnosti FDM 3D tisku neexistuje žádný standardizovaný artefakt, který by byl schopen dostatečně reprezentovat rozmanitost studovaných aspektů. V dnešní době dostupnosti softwarů a aditivních technologií má téměř každý možnost navrhnout referenční artefakt se sledovanými parametry tisku. Příkladem sledovaných parametrů je mimo jiné rovinnost výsledných ploch, tisk přemostění, převisů nebo strmých stěn a mnohé další. Ideální model musí poskytovat snadno změřitelné rozměrové údaje. Součástí artefaktu musí být řada praktických prvků, jako jsou například různé otvory a výstupky. Celý artefakt však nesmí být příliš velký. Od tohoto tisku očekáváme nízkou spotřebu materiálu a krátký čas výroby. [43],[44]

Ve světě „hobby“ uživatelů FDM tiskáren je velmi oblíbeným referenčním artefaktem malá lodička, která nese název 3DBenchy. STL model ve vysokém rozlišení této lodičky je volně stahovatelný a každý uživatel 3D tiskárny si jej může doma vytisknout. Každá malá část této nenápadné lodičky slouží ke kalibraci tisku a zjištění tiskových vlastností jednotlivých materiálů. Spodek lodi kontroluje kvalitu adheze materiálů k podložce. Trup lodi slouží ke zjištění finální kvality povrchu a také převisu. Okénka v kabině testují převis a přemostění. Jsou zde malé detaily, jako je například komín, u kterého měříme přesnost jeho vnějšího a vnitřního průměru a mnohé další. Výhodou tohoto modelu je jeho velikost, délka lodi činí jen 60 mm se šířkou 31 mm. Od tohoto faktu se odvíjí i nízký čas tisku. Čas tisku se bude odvíjet na zvolených parametrech tisku. Model může být hotový již do 30 min. tisku, ale většinou se čas pohybuje kolem jedné hodiny. [44]

Praktická část

10 Úvod do praktické části

V této části své Bakalářské práce jsem se zaměřoval na komplexní porovnání pěti moderních dostupných materiálů pro FDM 3D tisk. Těmito jsou PC-ABS, jenž kombinuje vlastnosti polycarbonátu a ABS, Diran, PET-G, PMMA a v neposlední řadě nylon. U materiálů jsem především zkoušel jejich mechanické vlastnosti.

Pro zjištění mechanických vlastností byly zvoleny tyto zkoušky:

- I. Zkouška tahem
- II. Rázová zkouška metodou Charpyho kladiva

Neméně důležitými vlastnostmi materiálů pro 3D tisk jsou také jeho tiskové vlastnosti, jež byly porovnávány na mnou navrženém referenčním artefaktu. Na tomto artefaktu bylo pozorováno několik vlastností, mezi které patří: stringing, bridging, převis, kvalita povrchu a rozměrová přesnost.

V poslední části díky technologii reverzního inženýrství jsem získal model mechanicky zatěžované součásti, která následně byla vytištěna metodou FDM 3D tisku. Tato vytištěná součást by mohla v praxi nahradit těžší hliník. Pro tento model jsem vybral jeden z uvedených materiálů. Po vytištění jsem následný model otestoval v praxi.

11 Výroba součástí

Princip FDM metody spočívá v postupném nanášení jednotlivých vrstev na sebe, k tomu nám slouží speciální 3D tiskárny. Pro výrobu součástí byly zvoleny dvě tiskárny Prusa i3 MK3S a Stratasys F370. Na tiskárně od značky Prusa Research byly tisknuty materiály nylon AF80 Aramid (Fillamentum), PMMA (Devil Desing) a PET-G (Prusament), zatímco na tiskárně značky Stratasys byl tisknut Diran (Stratasys), PC-ABS (Stratasys).

11.1 Prusa i3 MK3S

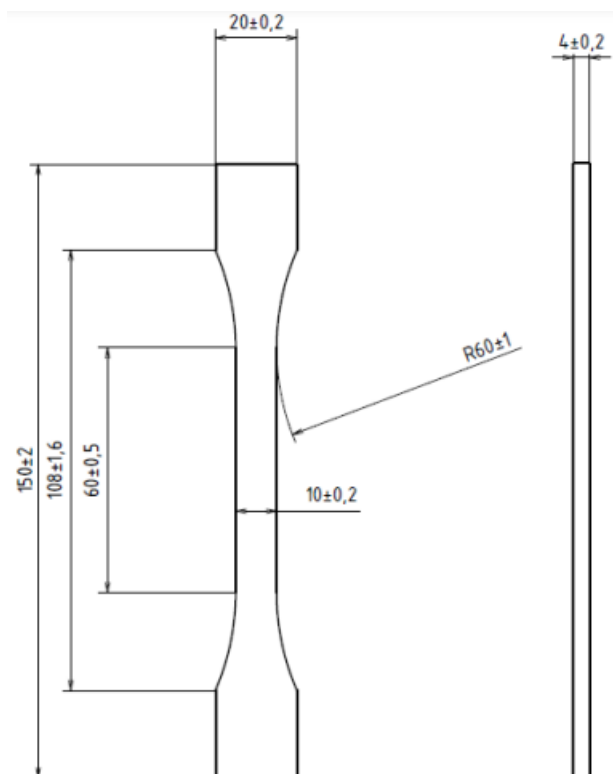
Tento typ tiskárny je především určen pro „hobby“ uživatele. Tiskárna disponuje jednou tryskovou hlavou a vyhřívanou podložkou s maximálními rozměry tisku 250x210x210mm. Maximální teplota trysky činí 300 °C a podložky 120 °C. Mezi podporované materiály pro tuto tiskárnu řadíme široké spektrum termoplastů od PLA, PET-G, PC, nylon až po kompozitní materiály s odpovídajícími parametry tisku v rozmezí možností tiskárny. Firma Prusa Research také poskytuje bezplatný program Prusaslicer pro následný tisk modelu. Součástí této tiskárny není vyhřívaná komora. Cena se pohybuje lehce přes 20 000 Kč. [45]

11.2 Stratasys F370

Tiskárna F370 od značky Stratasys je již průmyslová tiskárna, která se v praxi hlavně využívá na rapid prototyping. Tato tiskárna disponuje vyhřívanou komorou a dvěma tiskovými hlavami. Jedna tisková hlava slouží k nanášení vrstev vybraného materiálu a druhá pro tisk pomocných konstrukcí z dobře odstranitelného materiálu. Trysky se před tiskem samotné součásti automaticky čistí o vestavěný kartáč. Tiskárna disponuje velkými tiskovými rozměry 355x254x355 mm. F370 nám umožňuje tisk široké škály materiálů a díky vyhřívané komoře umožňuje tisk velmi náročných materiálů pro proces 3D tisku. Tyto materiály se pak v praxi mohou využít u funkčních dílů. [46]

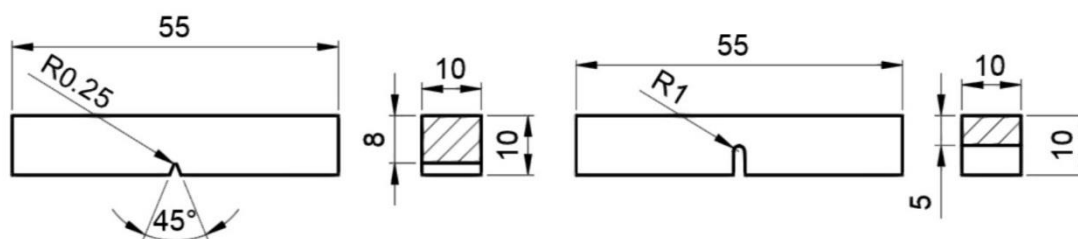
11.3 Zkušební vzorky

Pro tahovou zkoušku byly testované vzorky vybrány dle ČSN EN ISO 527-2 s označením 1B s parametry (Obr. č.9)



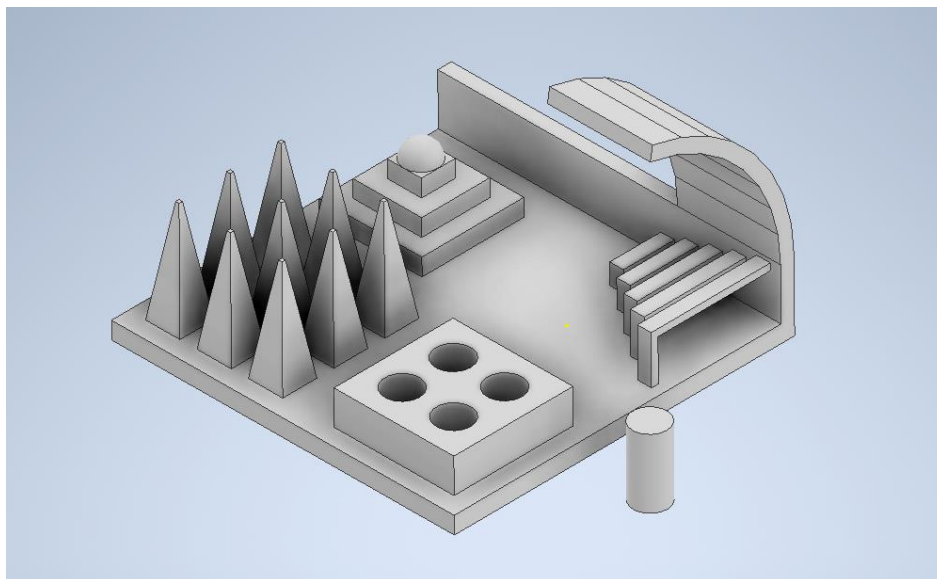
Obrázek 9 Geometrie modelu pro tahovou zkoušku [47]

Pro zkoušku rázové houževnatosti metodou Charpyho kladiva byly testované vzorky vybrány dle ČSN EN ISO 148-1 s parametry (Obr. č.10).



Obrázek 10 Geometrie modelu pro metodu Charpyho kladiva [48]

Pro pozorování již zmíněných vlastností 3D tisku byl použit mnou navržený zkušební artefakt, jenž splňoval doporučené rozměry základní desky dle normy ISO/ASTM 52902:2019.



Obrázek 11 Model zkušebního artefaktu

Zkušební artefakt byl rozdělen do pěti částí stringig, bridge, a převis, které jsou hodnoceny vizuálně a dva testy na přesnost konečného artefaktu. K vyhodnocení přesnosti bylo využito výpočetní tomografie, jež nám poskytla model celého artefaktu, kde následně docházelo k porovnání počátečních hodnot modelu a výsledného vytištěného modelu.

11.4 Průběh tisku

Jak již bylo zmíněno k tisku vzorků byly použity dvě tiskárny Prusa i3 MK3S a Stratasys F370. Tisk probíhal při ustálených podmínkách při teplotě 21-22 °C a relativní vlhkosti 55-60 %. Pro tahovou a rázovou zkoušku bylo zhotoveno 5 vzorků pro každý materiál, zatímco pro vyhodnocení tiskových vlastností byl zhotoven jeden zkušební artefakt pro každý materiál.

Orientace vzorků pro tahovou zkoušku byla zvolena v osách X a Y, i přes lepší výsledky dosažených v orientaci X a Z dostupných v popisech materiálů dle výrobce. Rozdíl mezi těmito hodnotami byl nepatrný. Úskalí by nastalo při tisku součástí. Zde by bylo zapotřebí nezbytných podpor a doprovodného límce v okolí součástí.

Celý proces tisku by byl tedy náročnější, a proto byla zvolena orientace X, Y. Z praktické části víme, že pro dosažení maximálních mechanických vlastností je důležitá orientace a směr výplně. Pro tahovou zkoušku je tedy důležitá orientace vláken v ose zatížení. Zatímco u rázové

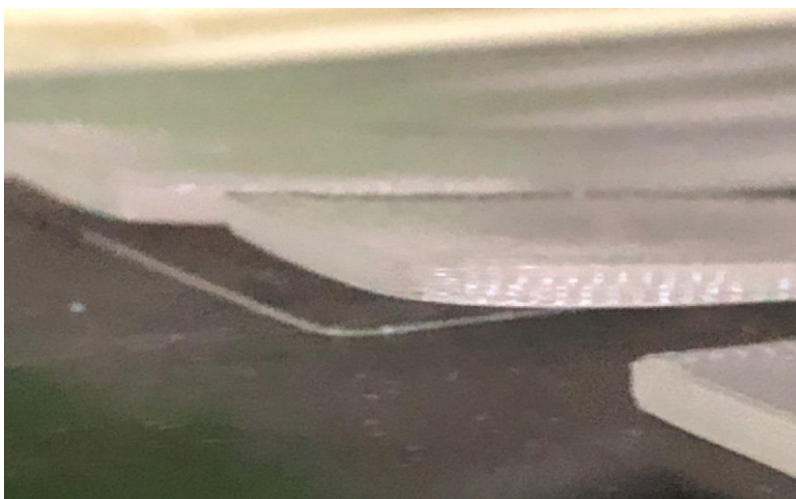
zkoušky je tomu naopak, pro dosažení maximálních hodnot houževnatosti je zapotřebí orientace vláken otočených o 90° oproti ose zatížení. Z tohoto důvodu byla zvolena orientace zkušebního prvku X, Z. Vzorky pro tahovou a mechanickou zkoušku byly proto tištěny se 100 % hodnotou infilu (výplně) a orientací $0^\circ/90^\circ$.

Pro tisk zkušebních vzorků na tiskárně Pruska MK3S bylo využito volně dostupného programu PrusaSlicer. Do tohoto programu byly vloženy modely ve formátu STL a následně upravována jejich orientace a tiskové parametry.

Průběh tisku zkušebních materiálů pro tahovou a rázovou zkoušku byl rozdílný. Materiál PET-G od značky Prusament bylo možné vytisknout bez jakýchkoli potíží. To samé nelze ovšem tvrdit u materiálů Nylon AF80 Aramid (Fillamentum), PMMA (Devil Desing). V průběhu tisku docházelo ke značným problémům. Vzorky se kroutily a docházelo ke špatné adhezi k podložce. Části vzorků se v probíhajícím tisku nadzvedly od tiskové podložky až došlo ke kontaktu modelu s tryskou, která následně pohybovala s modely po podložce. Zkušební vzorky byly po této chybě zcela nepoužitelné pro následné testy (Obr. č.12) a (Obr. č.13).



Obrázek 12 Chybný průběh tisku vzorků pro zkoušku rázové houževnatosti z nylonu



Obrázek 13 Chybný průběh tisku vzorků pro tahovou zkoušku z PMMA

Nezbytně nutná byla optimalizace tisku. Pro dosažení lepší adheze bylo použito běžné lepidlo na papír, kterým byla potřena tisková plocha pod vzorky. Za účelem eliminace kroucení byla zvýšena teplota tisku na horní hranici doporučenou výrobcem. Tisk bylo také nutno rozdělit. U těchto materiálů probíhal tisk jednotlivě jeden díl po druhém. Materiál tedy neměl takovou tendenci chladnout a měnit tak svůj objem, který se s nižší teplotou snižoval. Díky těmto opatřením výsledný model nebyl v takové míře pokroucený a tisk se zdárně dokončil.

Tisk zkušebních vzorků z materiálů Diran 410MF07 (Stratasys) a PC-ABS (Stratasys) probíhal na tiskárně F370 od značky Stratasys. Pro tento typ tiskárny je rovněž volně dostupný slicer program pod názvem GrabCad. V tomto programu docházelo k nastavování tiskových parametrů a orientaci modelu. Průběh tisku u obou materiálů byl zcela bezproblémový a bylo možné tisknutí všech vzorků pohromadě. Pro snadné vyjmutí artefaktu z podložky a eliminaci kroucení bylo však nezbytné využít automaticky vygenerovaného raftu pod vzorkem. Raft je podpůrná konstrukce pod modelem.

Odstraňování raftu u materiálu Diran nebyl žádný problém. Support byl za tepla lehce odlomitelný rukou. Odstraňování raftu u materiálu PC-ABS však muselo probíhat ponořením vzorků do roztoku teplé vody a NaOH. Support se po několika hodinách rozpustil.



Obrázek 14 Výsledek tisku materiálu Diran 410MF07 na tiskárně F370

11.5 Parametry tisku vzorků pro tahovou a rázovou zkoušku

Tabulky 2 Parametry tisku vzorků pro tahovou a rázovou zkoušku materiálu nylon

Nylon (Rázová zkouška)	
Parametry	Hodnoty
Teplota trysky [C°]	250
Teplota podložky [C°]	90
Infil [%]	100
Úhel výplně [°/ °]	0/90
Tloušťka vrstvy [mm]	0,2
Čas tisku [min]	134

Nylon (Tahová zkouška)	
Parametry	Hodnoty
Teplota trysky [C°]	250
Teplota podložky [C°]	90
Infil [%]	100
Úhel výplně [°/ °]	0/90
Tloušťka vrstvy [mm]	0,2
Čas tisku [min]	190

Tabulky 3 Parametry tisku vzorků pro tahovou a rázovou zkoušku materiálu PMMA

PMMA (Rázová zkouška)	
Parametry	Hodnoty
Teplota trysky [C°]	245
Teplota podložky [C°]	100
Infil [%]	100
Úhel výplně [°/ °]	0/90
Tloušťka vrstvy [mm]	0,2
Čas tisku [min]	131

PMMA (Tahová zkouška)	
Parametry	Hodnoty
Teplota trysky [C°]	245
Teplota podložky [C°]	100
Infil [%]	100
Úhel výplně [°/ °]	0/90
Tloušťka vrstvy [mm]	0,2
Čas tisku [min]	185

Tabulky 4 Parametry tisku vzorků pro tahovou a rázovou zkoušku materiálu PET-G

PET-G (Rázová zkouška)	
Parametry	Hodnoty
Teplota trysky [C°]	250
Teplota podložky [C°]	90
Infil [%]	100
Úhel výplně [°/°]	0/90
Tloušťka vrstvy [mm]	0,2
Čas tisku [min]	131

PET-G (Tahová zkouška)	
Parametry	Hodnoty
Teplota trysky [C°]	250
Teplota podložky [C°]	90
Infil [%]	100
Úhel výplně [°/°]	0/90
Tloušťka vrstvy [mm]	0,2
Čas tisku [min]	185

Tabulky 5 Parametry tisku vzorků pro tahovou a rázovou zkoušku materiálu PC-ABS

PC-ABS (Rázová zkouška)	
Parametry	Hodnoty
Teplota trysky [C°]	
Teplota podložky [C°]	
Infil [%]	100
Úhel výplně [°/°]	0/90
Tloušťka vrstvy [mm]	0,18
Čas tisku [min]	105

PC-ABS (Tahová zkouška)	
Parametry	Hodnoty
Teplota trysky [C°]	
Teplota podložky [C°]	
Infil [%]	100
Úhel výplně [°/°]	0/90
Tloušťka vrstvy [mm]	0,18
Čas tisku [min]	143

Tabulky 6 Parametry tisku vzorků pro tahovou a rázovou zkoušku materiálu Diran

Diran (Rázová zkouška)	
Parametry	Hodnoty
Teplota trysky [C°]	280
Teplota podložky [C°]	90
Infil [%]	100
Úhel výplně [°/°]	0/90
Tloušťka vrstvy [mm]	0,18
Čas tisku [min]	104

Diran (Tahová zkouška)	
Parametry	Hodnoty
Teplota trysky [C°]	280
Teplota podložky [C°]	90
Infil [%]	100
Úhel výplně [°/°]	0/90
Tloušťka vrstvy [mm]	0,18
Čas tisku [min]	155

12 Tahová zkouška

Při provádění zkoušky tahem jsem určoval mez pevnosti, tažnost a modul pružnosti materiálu. Tvar a rozměry zkušební vzorku byly dány normou. Než jsem ale začal zkoušku provádět, vzorek jsem si přeměřil a výsledné rozměry vložil do zvoleného programu testovacího stroje. Také jsem si musel nastavit rychlost prodlužování, která se udává v milimetrech za minutu.

Zkouška tahem se provádí tak, že nejdříve umístíte zkušební vzorek do čelistí stroje pro tahovou zkoušku. Zde je vzorek natahován až do jeho přetržení, deformování či k dosažení určené hodnoty napětí nebo prodloužení. Výsledky zkoušky zaznamenáváme do grafu, který nám pak ukáže mechanické vlastnosti zkušební vzorku. [5]

Zkouška proběhla na trhacím stroji LabTest 5.100SP1. Nutností před zkouškou bylo přilepení tenkých hliníkových plíšků za využití dvousložkového lepidla Loctite AE 9466 o velikosti 20x20mm na oba konce vzorků (Obr. č.16). Lepidlo muselo následně 24 hodin tvrdnout. Toto opatření mělo zajistit nepoškození testovaného vzorku a zamezit vyklouznutí z čelistí testovacího přístroje. Pomocí digitálního posuvného měřítka byla u každého vzorku změřena tloušťka a šířka úzké části vzorku. Zvolené parametry: upínací vzdálenost mezi čelistmi $L = 115$ mm, počáteční měřená délka $L_0 = 50$ mm a zkušební rychlost $v = 5$ mm/min.



Obrázek 16 Nalepený hliníkový plíšek na vzorek materiálu Diran pro tahovou zkoušku



Obrázek 15 Trhacím stroj LabTest 5.100SP1

12.1 Použité vztahy

Průřez zkušební vzorku [mm^2]:

$$S = b \cdot h \text{ [mm}^2\text{]} \quad (1)$$

b je šířka zúžené části [mm]

h tloušťka zvoleného vzorku [mm]

Mez pevnosti v tahu [MPa]:

$$R_m = \frac{F_m}{S} \text{ [MPa]} \quad (2)$$

F_m je maximální síla zatížení [N].

Tažnost [%]:

$$A = \frac{\Delta L}{L_0} \cdot 100 \text{ [%]} \quad (3)$$

ΔL je absolutní prodloužení, jež získáme jako $\Delta L = L_1 - L_0$.

L_0 je počáteční délka zkušební tělesa [mm]

L_1 je konečná délka zkušební tělesa [mm]

Modul pružnosti v tahu [MPa]:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \text{ [MPa]} \quad (4)$$

σ je napětí [MPa]

ε je relativní prodloužení [-]

13 Výsledky tahové zkoušky

13.1 Diran

Tabulka 7 Zjištěné hodnoty materiálu Diran pro tahovou zkoušku

Číslo vzorku	R_m [MPa]	F_m [N]	Tažnost [%]	Modul pružnosti v tahu [GPa]
1	43	1760,0	3,39	1,64
2	43	1764,7	2,13	1,73
3	42	1773,4	3,60	1,68
4	37	1519,0	1,84	1,67
5	42	1730,3	3,21	1,72
Průměrná hodnota	41,4	1709,48	2,834	1,688
Směrodatná odchylka	2,24	96,34	0,710	0,033

13.2 Nylon

Tabulka 8 Zjištěné hodnoty materiálu nylon pro tahovou zkoušku

Číslo vzorku	R_m [MPa]	F_m [N]	Tažnost [%]	Modul pružnosti v tahu [GPa]
1	32	1401,0	10,12	0,93
2	32	1414,2	10,60	0,91
3	32	1398,4	9,27	0,97
4	32	1395,1	8,51	0,98
5	31	1401,1	10,39	1,11
Průměrná hodnota	31,8	1401,96	9,778	0,980
Směrodatná odchylka	0,40	6,50	0,779	0,071

13.3 PC-ABS

Tabulka 9 Zjištěné hodnoty materiálu PC-ABS pro tahovou zkoušku

Číslo vzorku	R_m [MPa]	F_m [N]	Tažnost [%]	Modul pružnosti v tahu [GPa]
1	28	1197,5	2,89	1,16
2	27	1135,9	2,66	1,17
3	27	1138,6	2,44	1,28
4	27	1155,0	2,42	1,41
5	28	1180,1	2,83	1,20
Průměrná hodnota	27,4	1161,42	2,648	1,244
Směrodatná odchylka	0,49	23,93	0,193	0,094

13.4 PET-G

Tabulka 10 Zjištěné hodnoty materiálu PET-G pro tahovou zkoušku

Číslo vzorku	R_m [MPa]	F_m [N]	Tažnost [%]	Modul pružnosti v tahu [GPa]
1	47	1774,0	3,61	1,73
2	46	1726,0	3,91	1,52
3	47	1765,8	4,09	1,60
4	46	1740,0	4,11	1,51
5	47	1742,8	4,16	1,74
Průměrná hodnota	46,6	1749,72	3,976	1,619
Směrodatná odchylka	0,49	17,62	0,202	0,098

13.5 PMMA

Tabulka 11 Zjištěné hodnoty materiálu PMMA pro tahovou zkoušku

Číslo vzorku	R_m [MPa]	F_m [N]	Tažnost [%]	Modul pružnosti v tahu [GPa]
1	44	1867,3	1,85	3,04
2	29	1230,8	1,05	2,81
3	44	1878,2	1,69	3,00
4	45	1887,0	1,82	2,73
5	42	1817,6	2,08	2,06
Průměrná hodnota	40,8	1736,18	1,698	2,728
Směrodatná odchylka	5,98	253,83	0,348	0,354

13.6 Vyhodnocení tahové zkoušky

Ze získaných parametrů mechanických vlastností daných materiálů byly zjištěny očekávané hodnoty meze pevnosti, modulu pružnosti v tahu a tažnosti. Velkým překvapením byla výsledná hodnota meze pevnosti v tahu materiálů nylon a PMMA. Zjištěná hodnota se pohybovala přibližně v rámci 60 % tabulkové hodnoty. Rovněž materiál PC-ABS dosahoval pouhých 70 % tabulkové hodnoty. Ostatní materiály odpovídaly přibližně svým tabulkovým hodnotám meze pevnosti v tahu.

Při porovnání zjištěného modulu pružnosti v tahu s tabulkovými hodnotami bylo potvrzeno nejnižších a nejvyšších hodnot modulu pro dané materiály. Nylon opět disponoval o přibližně 50 % nižší výslednou hodnotou modulu pružnosti než je jeho tabulková hodnota. Dalšími materiály, u kterých byla nižší zjištěná hodnota modulu pružnosti v tahu, byly také PMMA a PC-ABS. Velmi přesné výsledky byly naměřeny u materiálů Diran a PET-G.

U hodnocení zjištěné tažnosti docházelo k velkým rozdílům vůči tabulkovým hodnotám. Materiál Diran dosahoval hodnot odpovídajícím přibližně 20 % tabulkové hodnoty. Nízkých hodnot tažnosti dosahovali také materiály PMMA, PC-ABS. Na druhou stranu nylon vykazoval ve zjištěných hodnotách až dvojnásobek tabulkové hodnoty. Jediný materiál, jenž se přiblížil svým tabulkovým hodnotám tažnosti, byl PET-G.

Zajímavostí průběhu zkoušky byl materiál Diran. U toho materiálu docházelo po přetržení většiny plochy k odlepení vnější obrysové vrstvy (Obr. č 17). Špatná adheze vrstvy mohla být způsobena tiskovými mezerami modelu nebo také nízkou teplotou v komoře, kde nedošlo k dostatečnému propojení vrstev. U jiných materiálů se tento jev neobjevoval.

Při pohledu na hodnotu směrodatné odchylky u materiálu PMMA bylo možné pozorovat její vyšší hodnoty, jež byly způsobeny zmetkovým vzorkem. Vzorek nedocílil takové meze pevnosti jako ostatní vzorky.



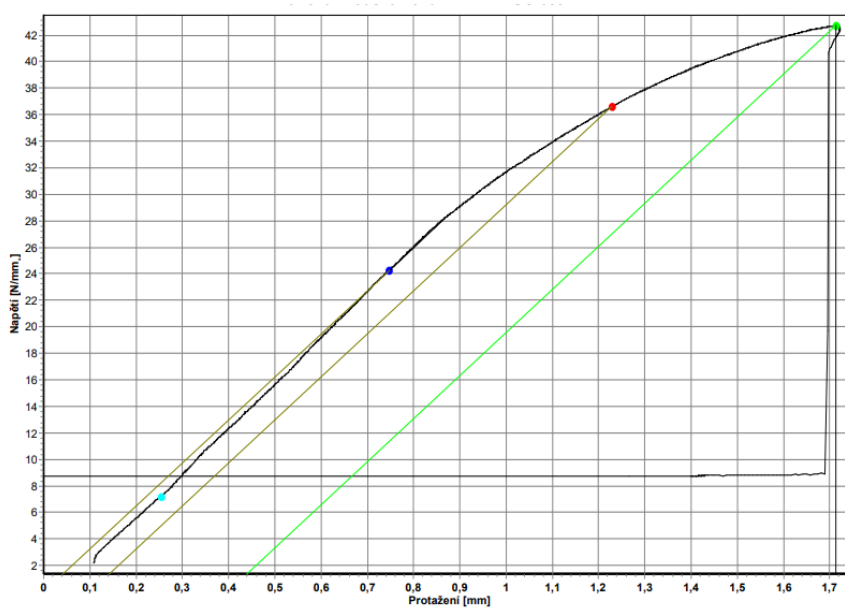
Obrázek 17 Vzorek materiálu Diran po přetržení

Tabulka 12 Průměrné výsledky vypočtených hodnot

Materiály	R_m [MPa]	F_m [N]	Tažnost [%]	Modul pružnosti v tahu [GPa]
Diran	41,4	1709,48	2,834	1,688
Nylon	31,8	1401,96	9,778	0,980
PC-ABS	27,4	1161,42	2,648	1,244
PET-G	46,6	1749,72	3,976	1,619
PMMA	40,8	1736,18	1,698	2,728

Tabulka 13 Data materiálů z technického listu výrobce [18], [22], [49], [50], [51]

Data z technického listu	Pevnost v tahu [MPa]	Modul pružnosti v tahu [GPa]	Tažnost [%]
DIRAN	40	1,69	12
PC-ABS	36,5	1,99	4,7
Nylon	50,4	0,51	5,8
PET-G	47	1,5	5,1
PMMA	65	3,1	5



Obrázek 18 Graf vzorové průběhu tahové zkoušky materiálu Diran vzorku č. 1

14 Rázová zkouška metodou Charpyho kladiva

Při zkoušce se zkušební vzorek umístil vodorovně mezi dvě podpěry. Vzorek byl poté přeražen úderem Charpyho kladiva. Směr úderu musel jít středem mezi podpěrami. Při zkoušce jsme měřili energii, kterou jsme použili k přeražení zkušebního vzorku a také výsledek přeražení, které může být úplné, částečné nebo může nastat nepřeražení. Zkouška proběhla na stroji CEAST. [5]

Před začátkem zkoušky bylo nutné změření plochy vzorku pod vrubem za pomoci posuvného měřítka pro následné vypočtení rázové houževnatosti. Zkušební artefakt s již vytisknutým vrubem byl umístěn do podpěr vzdálených pro velikost daného vzorku ve vzdálenosti 40 mm. Důležitá byla rovněž kontrola, zda je vzorek umístěný na střed podpěr, aby kladivo zasáhlo vzorek v místě vrubu. Nominální energie Charpyho kladiva byla zvolena 7,5 [J].



Obrázek 19 Zkušební stroj CEAST pro zkoušku rázové houževnatosti Charpyho kladivem

14.1 Použité vztahy

Rázová houževnatost těles s vrubem [$\text{kJ} \cdot \text{m}^{-2}$]

$$a_{cN} = \frac{E_c}{h \cdot b_n} \cdot 10^3 \quad (5)$$

E_c je energie potřebná k přeražení tělesa [J]

b_n je šířka tělesa pod vrubem [mm]

h je tloušťka tělesa [mm]

15 Výsledky zkoušky rázové houževnatosti

15.1 Diran



Obrázek 20 Částečně přelomený vzorek materiálu Diran

Tabulka 14 Zjištěné hodnoty materiálu Diran pro rázovou zkoušku

Číslo vzorku	s [mm ²]	E_c [J]	a_{cN} [kJ · m ⁻²]
1	78,78	0,9	11,42
2	80,04	0,85	10,62
3	78,94	0,88	11,15
4	78,14	0,97	12,41
5	78,02	0,84	10,77
Průměrná hodnota	78,784	0,888	11,274
Směrodatná odchylka	0,718	0,046	0,636

15.2 Nylon



Obrázek 21 Přelomený vzorek materiálu nylon

Tabulka 15 Zjištěné hodnoty materiálu nylon pro rázovou zkoušku

Číslo vzorku	S [mm ²]	E_c [J]	a_{cN} [kJ · m ⁻²]
1	78,25	0,57	7,28
2	77,75	0,52	6,69
3	77,78	0,48	6,17
4	78,20	0,58	7,42
5	78,30	0,55	7,02
Průměrná hodnota	78,054	0,540	6,917
Směrodatná odchylka	0,238	0,036	0,448

15.3 PC-ABS



Obrázek 22 Přelomený vzorek materiálu PC-ABS

Tabulka 16 Zjištěné hodnoty materiálu PC-ABS pro rázovou zkoušku

Číslo vzorku	S [mm ²]	E_c [J]	a_{cN} [kJ · m ⁻²]
1	76,99	0,26	3,38
2	77,48	0,26	3,36
3	77,85	0,28	3,60
4	77,18	0,26	3,37
5	77,83	0,26	3,34
Průměrná hodnota	77,467	0,264	3,408
Směrodatná odchylka	0,345	0,008	0,095

15.4 PET-G



Obrázek 23 Přelomený vzorek materiálu PET-G

Tabulka 17 Zjištěné hodnoty materiálu PET-G pro rázovou zkoušku

Číslo vzorku	S [mm ²]	E_c [J]	a_{cN} [kJ · m ⁻²]
1	78,47	0,28	3,57
2	78,19	0,37	4,73
3	78,84	0,39	4,95
4	77,36	0,36	4,65
5	77,43	0,36	4,65
Průměrná hodnota	78,056	0,352	4,510
Směrodatná odchylka	0,577	0,038	0,483

15.5 PMMA



Obrázek 24 Přelomený vzorek materiálu PMMA

Tabulka 18 Zjištěné hodnoty materiálu PMMA pro rázovou zkoušku

Číslo vzorku	S [mm ²]	E_c [J]	a_{cN} [kJ · m ⁻²]
1	73,72	0,16	2,17
2	74,56	0,16	2,15
3	74,33	0,18	2,42
4	73,36	0,22	3,00
5	74,04	0,18	2,43
Průměrná hodnota	74,002	0,180	2,434
Směrodatná odchylka	0,426	0,022	0,307

15.6 Vyhodnocení rázové zkoušky Charpyho kladivem

Výsledky rázových houževnatostí pro jednotlivé materiály nelze porovnat s hodnotami dle technických listů. Výrobci neuvádí hodnoty pro tento typ zkoušky, jen u materiálů nylon a PMMA uvádějí pouze hodnoty rázové houževnatosti pro modely bez vrubu. Výrobce Stratasys materiálů Diran a PC-ABS uvádí hodnoty pro jinou metodu zkoušky. Jediný český zástupce Prusa Research pro svůj materiál PET-G však touto hodnotou disponuje. Udávaná hodnota rázové houževnatosti 6 [kJ · m⁻²] [51]. K této hodnotě se vybraný materiál přiblížil. Průměrná hodnota činila 4,510 [kJ · m⁻²], což je přibližně 75 % z tabulkové hodnoty. U ostatních materiálů jsme však měli porovnání k získaným hodnotám metodou IZOD (Tabulka č. 1). Nejvyšší hodnotou rázové houževnatosti metodou IZOD disponoval materiál Diran. Tento fakt se při vyhodnocení vybraných materiálů potvrdil. Materiál disponoval průměrnou hodnotou rázové houževnatosti 11,274 [kJ · m⁻²]. Nejnižší naměřenou hodnotou však disponoval materiál PMMA, jenž činila 2,434 [kJ · m⁻²]. Z tohoto výsledku bylo možné usoudit, že tento materiál je velmi křehký. U materiálů PMMA, nylon, PET-G a PC-ABS došlo k přelomu zkoušeného vzorku. Jen u materiálu Diran došlo k částečnému lomu. Jako u zkoušky tahem zde došlo k odlepení obrysové vrstvy od zbytku testovaného vzorku. Při pozorování výsledků hodnot směrodatných odchylek byla patrná nerovnoměrnost jednotlivých vzorků mezi sebou. Materiál dosahující nejnižší směrodatné odchylky byl PET-G s hodnotou 0,095.

Tabulka 19 Průměrné hodnoty rázové houževnatosti vybraných materiálů

Materiál	Průměrná hodnota rázové houževnatosti [$\text{kJ} \cdot \text{m}^{-2}$]
Diran	11,274
Nylon	6,917
PC-ABS	3,408
PET-G	4,510
PMMA	2,434

16 Referenční artefakt

Zkušební artefakt byl rozdělen do šesti částí, ve kterých byla pozorována výsledná kvalita tisku jednotlivých materiálů, jenž byly následně vyhodnoceny. Z důvodu závažné poruchy na stroji Stratasys F370 nebylo možné dokončit tisk referenčního artefaktu PC-ABS.

16.1 Stringing test

Tento test byl zaměřen na kontrolu tvorby drobných „vlásků“ materiálu mezi devíti jehlany v levé dolní části artefaktu. Vyhodnocení testu nemělo žádné měřitelné parametry, a proto bylo tedy zcela subjektivní.

16.2 Overhang test

Pro tento typ testu byl na artefaktu zhotoven částečný oblouk rozdělený do osmi stále se zvětšujících úhlů převisu. Každou z osmi částí se zvětšoval celkový převis o 10°. Konečný převis tedy činil 80°. Cílem tohoto testu bylo porovnání spodních stěn oblouku, zda zde dochází k deformaci či nikoliv. Vyhodnocení nemělo žádné měřitelné parametry a bylo zcela subjektivní.

16.3 Bridging test

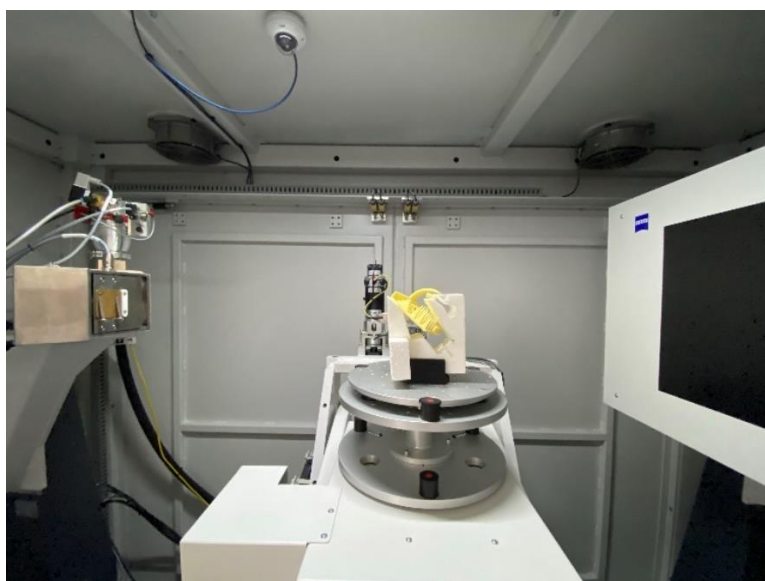
Pro vyhodnocení tohoto testu bylo na artefaktu zhotoveno pět různě dlouhých přemostění o šířce 4 mm a tloušťce 2 mm. Pro lepší pozorování byly jednotlivé mosty v různých výškách. Délky přemostění činily 15, 20, 25, 30 a 35 mm. U tohoto testu byla pozorována spodní stěna přemostění, kde mohlo docházet k prohnutí jednotlivých vláken filament. Vyhodnocení nemělo žádné měřitelné parametry a bylo zcela subjektivní.

16.4 Zkouška rozměrové přesnosti

Pro ověření přesnosti výroby zkušebního artefaktu bylo použito výpočetního tomografu ZEISS METROTOM 1500. Princip získávání informací z tohoto zařízení spočíval ve vyzařování rentgenového záření skrz testovaný objekt a snímání velkého množství snímků z různých pohledů na objekt. Testovaný výrobek musel být upevněn materiálem o jiné hustotě. Použitým materiálem pro uchycení byl polystyren. Artefakt musel být také správně

napolohován, aby nedocházelo k odražení rentgenových paprsků od referenčního modelu. [52]

Upevněný artefakt se pomalu otáčel a přístroj zaznamenával snímky, ze kterých byl následně vygenerován trojrozměrný modul zkušebního artefaktu. Tento model byl poté exportován do programu VG Studio, kde byl editován podle odstínu šedi pro dosažení jasných obrysů tělesa. V tomto programu bylo možné pozorovat i vzniklé vnitřní vady testovaných objektů.



Obrázek 25 Referenční vzorek umístěný ve stroji ZEISS METROTOM 1500

Na artefaktu byl tento test rozdělen do dvou částí. V pravé dolní části byla přesnost měřena čepem o průměru 10 mm, jenž byl poté umístěn do čtyř otvorů. Otvory se od sebe lišily svým průměrem. Průměry jednotlivých otvorů jsou 10,05, 10,10, 10,15 a 10,20 mm. Následně tyto průměry děr byly přeměřeny díky modelu z CT. To samé platilo pro samotný čep.

Ve druhé části v levém horním rohu byla přesnost měřena na pyramidě o čtvercové podstavě o délce strany 30 mm a výšce 5 mm. U následných dvou vrstev pyramidy se čtvercová podstava změnila na 20 mm a poté 10 mm. Výška jednotlivých vrstev byla zachována. Přesnost se měřila ve všech třech směrech v ose X, Y a Z.



Obrázek 26 Stroj ZEISS METRONOM 1500

16.5 Parametry tisku referenčního artefaktu

Tabulka 20 Parametry tisku referenčního artefaktu z materiálu nylon

Nylon (Prusa MK3S)	
Parametry	Hodnoty
Teplota trysky [C°]	250
Teplota podložky [C°]	90
Infil [%]	20
Úhel výplně [°]	45
Tloušťka vrstvy [mm]	0,2
Čas tisku [min]	380

Tabulka 21 Parametry tisku referenčního artefaktu z materiálu PMMA

PMMA (Prusa MK3S)	
Parametry	Hodnoty
Teplota trysky [C°]	245
Teplota podložky [C°]	90
Infil [%]	20
Úhel výplně [°]	45
Tloušťka vrstvy [mm]	0,2
Čas tisku [min]	380

Tabulka 22 Parametry tisku referenčního artefaktu z materiálu PET-G

PET-G (Prusa MK3S)	
Parametry	Hodnoty
Teplota trysky [C°]	250
Teplota podložky [C°]	90
Infil [%]	20
Úhel výplně [°]	45
Tloušťka vrstvy [mm]	0,2
Čas tisku [min]	380

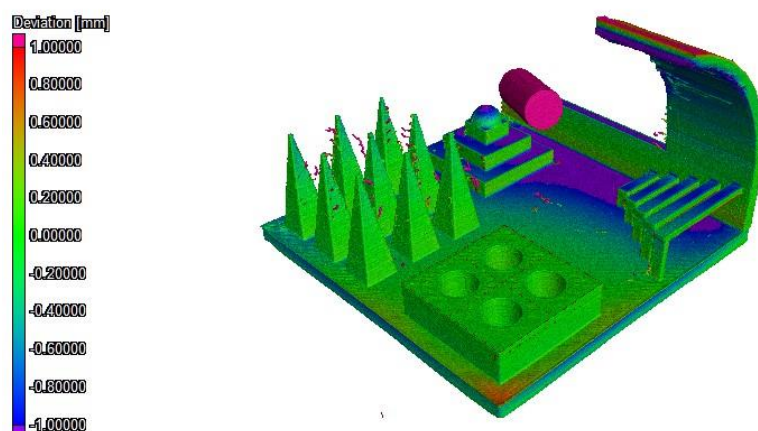
Tabulka 23 Parametry tisku referenčního artefaktu z materiálu PC-ABS

PC-ABS (Stratasys F370)	
Parametry	Hodnoty
Teplota trysky [C°]	260
Teplota podložky [C°]	80
Infil [%]	20
Úhel výplně [°]	45
Tloušťka vrstvy [mm]	0,18
Čas tisku [min]	294

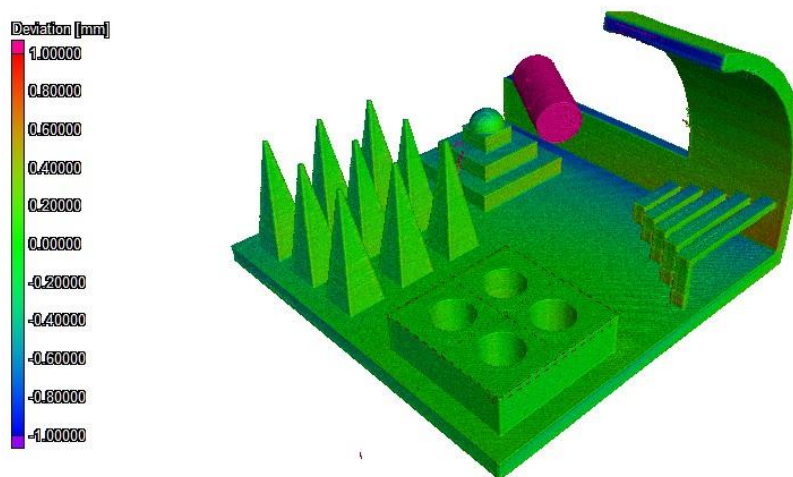
Tabulka 24 Parametry tisku referenčního artefaktu z materiálu Diran

DIRAN (Stratasys F370)	
Parametry	Hodnoty
Teplota trysky [C°]	280
Teplota podložky [C°]	90
Infil [%]	20
Úhel výplně [°]	45
Tloušťka vrstvy [mm]	0,18
Čas tisku [min]	104

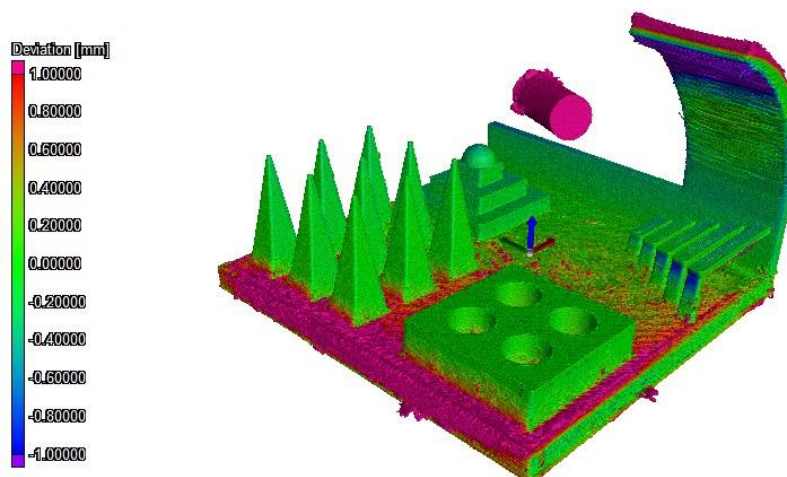
17 Analýza referenčních artefaktů



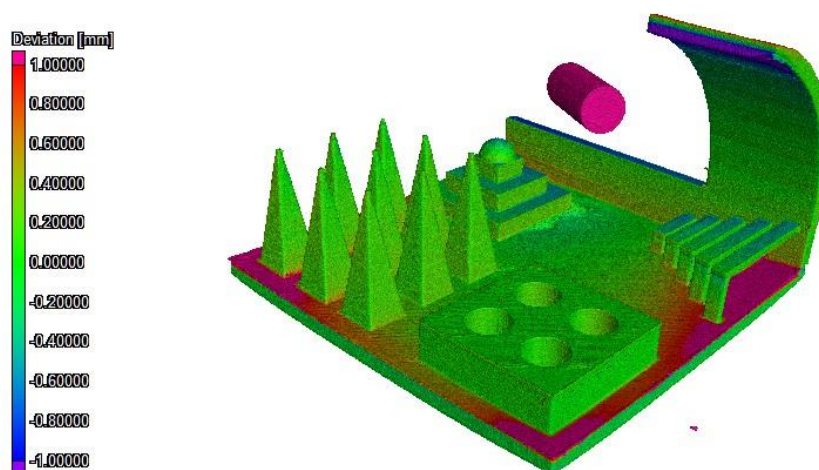
Obrázek 27 Barevná mapa přesnosti materiálu PMMA



Obrázek 28 Barevná mapa přesnosti tisku materiálu PET-G



Obrázek 29 Barevná mapa přesnosti tisku materiálu Diran



Obrázek 30 Barevná mapa přesnosti tisku materiálu nylon

17.1 Vyhodnocení overhang testu

Výsledky vizuálně pozorovatelných testů různých materiálů se od sebe velmi lišily.

U vyhodnocování testu převisu jsem se zaměřil na fakt, při jakém úhlu převisu vzniká u jednotlivých materiálů deformace.

Suverénně nejhorším výsledkem se ukázal být Diran. Deformace nastala již při převisu 20°, kdy materiál ztratil hladký povrch a filamenty materiálu začaly vystupovat z modelu. Příčinou byl zřejmě tisk ve vyhříváné komoře, kde nebylo umožněno dostatečné chlazení.

Důsledkem nedostatečného chlazení bylo tečení materiálu. Další příčinou, jenž mohla způsobit tuto deformaci, mohla být vysoká rychlost tisku.

Materiál, který disponoval vizuálně nejlepšími výsledky, byl nylon. Malé známky deformace se projevily až při tisku posledních vrstev převisu o hodnotě 80°. Horšími výsledky pak také disponoval PMMA. Pro špatnou adhezi PMMA k podložce při tisku vzorků pro tahovou a rázovou zkoušku byla zvýšena teplota trysky. Tento fakt byl pravděpodobně důsledkem méně kvalitního výsledku při testu převisu. Neočekávaným zjištěním u materiálu PMMA bylo, že při převisu 20° docházelo ke snížené průhlednosti vzorku. Materiál PET-G potvrdil v tomto testu své dobré vlastnosti tisku. Deformace se projevily až při převisu 80°.



Obrázek 31 Vybraný test převisu materiálu Diran

17.2 Vyhodnocení stringing testu

Tvorba tenkých „pavučinek“ filamentu se projevila jen u dvou materiálů PMMA a PET-G. Nejvíce patrná chyba navlékání však byla u materiálu PMMA. Tento špatný výsledek mohl být rovněž způsoben vysokou teplotou trysky jako u testu převisu. Další možnou příčinou této deformace bylo chybné nastavení re-trakce. U materiálu Diran a nylon nebyly pozorovány žádné známky stringování.



Obrázek 32 Vybraný test stringování materiálu nylon



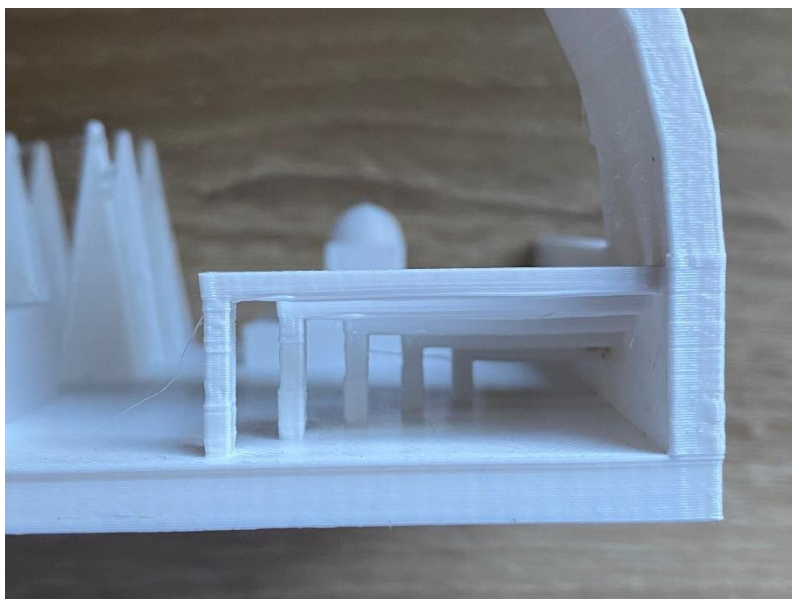
Obrázek 33 Vybraný test stringování materiálu PMMA

17.3 Vyhodnocení bridring testu

Při vyhodnocování vizuálních výsledků testu přemostění byly získány rozporuplné výsledky. Nejlépe si při tomto testu počínal materiál PET-G, jenž nedisponoval žádným prohnutím filamentu na spodní straně pěti různě dlouhých mostů. Podobné výsledky byly pozorovány i u PMMA. Tento výsledek byl velmi překvapivý. Po nekvalitním výsledku tohoto materiálu v testu převisu bylo očekáváno dosažení podobných výsledků. Tyto výsledky byly ovlivňovány stejnými parametry, kterými jsou rychlost tisku, chlazení, a teplota trysky. Nejhorší výsledek poskytoval materiál Diran. U všech pěti sledovaných mostů byly pozorovány filameny vystupující ze spodní strany mostu. Důvodem takto špatného výsledku byla teplotní náročnost tisku, který byl umístěn ve vyhřívané komoře bez možnosti dostatečného chlazení. Materiál nylon, jenž poskytoval nejlepší výsledky v testu převisu, obsahoval u dvou nejdelších mostů vyčnívající filameny, a přesto se tento výsledek mohl považovat za dobrý. Na obrázku č. 34 u materiálu Diran je patrná chyba tiskárny, kde nejspíše došlo k chybě vzdálenosti trysky od modelu, jenž způsobilo tuto deformaci na základní desce aretfaktu.



Obrázek 34 Vybraný test přemostění materiálu Diran



Obrázek 35 Vybraný test přemostění materiálu PET-G

17.4 Naměřené hodnoty přesnosti tisku vybraných materiálů

Tabulka 25 Naměřené hodnoty přesnosti výroby otvorů vybranými materiály

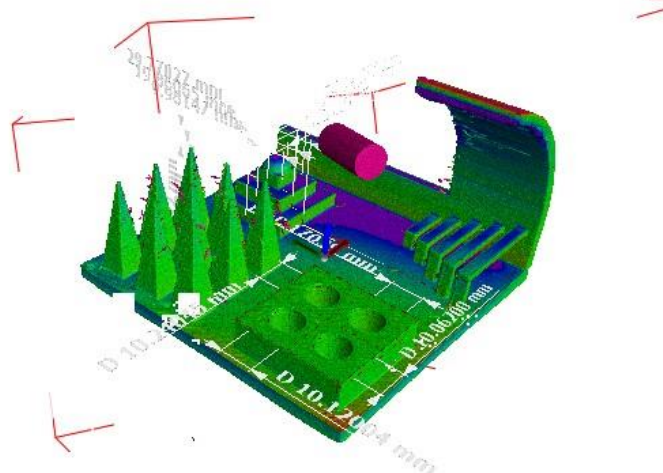
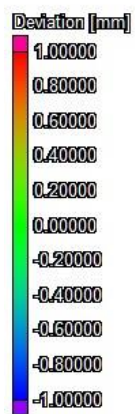
Materiál	Objekt	Modelované hodnoty [mm]	Změřené hodnoty [mm]	Odchylka [mm]
Nylon	Otvor 1	10,05	9,84	-0,21
Nylon	Otvor 2	10,1	9,88	-0,22
Nylon	Otvor 3	10,15	9,93	-0,22
Nylon	Otvor 4	10,2	9,98	-0,22
Diran	Otvor 1	10,05	10,11	0,06
Diran	Otvor 2	10,1	10,18	0,08
Diran	Otvor 3	10,15	10,21	0,06
Diran	Otvor 4	10,2	10,28	0,08
PET-G	Otvor 1	10,05	10,06	0,01
PET-G	Otvor 2	10,1	10,08	-0,02
PET-G	Otvor 3	10,15	10,14	-0,01
PET-G	Otvor 4	10,2	10,19	-0,01

Tabulka 26 Naměřené hodnoty přesnosti výroby pyramidy vybranými materiály

Materiál	Objekt	Rozměr	Modelované hodnoty [mm]	Změřené hodnoty [mm]	Odchylka [mm]
Nylon	Kvádr 1	Šířka	30	29,88	-0,12
Nylon	Kvádr 1	Délka	30	29,87	-0,13
Nylon	Kvádr 1	Výška	5	4,49	-0,51
Nylon	Kvádr 2	Šířka	20	19,97	-0,03
Nylon	Kvádr 2	Délka	20	19,97	-0,03
Nylon	Kvádr 2	Výška	5	4,86	-0,14
Nylon	Kvádr 3	Šířka	10	9,99	-0,01
Nylon	Kvádr 3	Délka	10	10,01	0,01
Nylon	Kvádr 3	Výška	5	4,96	-0,04
Díran	Kvádr 1	Šířka	30	29,88	-0,12
Díran	Kvádr 1	Délka	30	29,8	-0,2
Díran	Kvádr 1	Výška	5	4,87	-0,13
Díran	Kvádr 2	Šířka	20	19,87	-0,13
Díran	Kvádr 2	Délka	20	19,89	-0,11
Díran	Kvádr 2	Výška	5	4,97	-0,03
Díran	Kvádr 3	Šířka	10	9,87	-0,13
Díran	Kvádr 3	Délka	10	9,89	-0,11
Díran	Kvádr 3	Výška	5	5	0
PET-G	Kvádr 1	Šířka	30	29,7	-0,3
PET-G	Kvádr 1	Délka	30	29,7	-0,3
PET-G	Kvádr 1	Výška	5	5,03	0,03
PET-G	Kvádr 2	Šířka	20	19,78	-0,22
PET-G	Kvádr 2	Délka	20	19,8	-0,2
PET-G	Kvádr 2	Výška	5	5	0
PET-G	Kvádr 3	Šířka	10	9,89	-0,11
PET-G	Kvádr 3	Délka	10	10,06	0,06
PET-G	Kvádr 3	Výška	5	4,96	-0,04
PMMA	Kvádr 1	Šířka	30	29,77	-0,23
PMMA	Kvádr 1	Délka	30	29,87	-0,13
PMMA	Kvádr 1	Výška	5	4,58	-0,42
PMMA	Kvádr 2	Šířka	20	19,87	-0,13
PMMA	Kvádr 2	Délka	20	19,87	-0,13
PMMA	Kvádr 2	Výška	5	4,98	-0,02
PMMA	Kvádr 3	Šířka	10	9,98	-0,02
PMMA	Kvádr 3	Délka	10	9,92	-0,08
PMMA	Kvádr 3	Výška	5	5,01	0,01

17.5 Vyhodnocení rozměrové přesnosti artefaktu

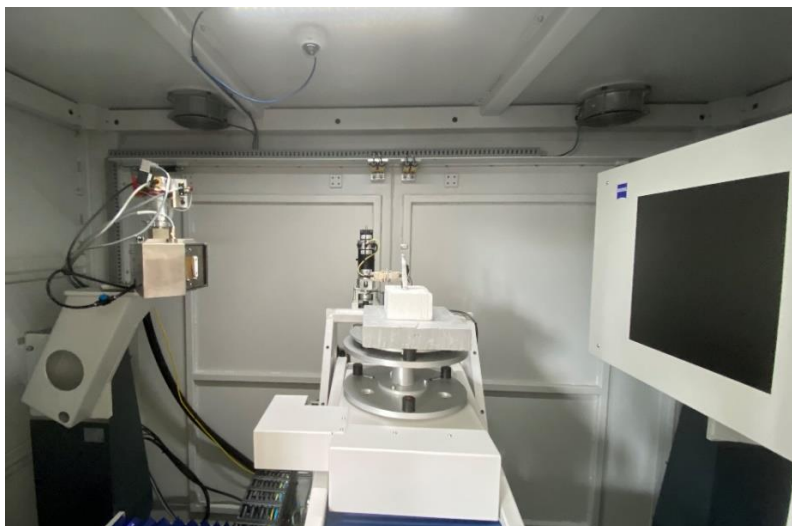
Při vyhodnocení přesnosti tisku byla patrna nepřesnost této technologie, jež se pohybovala převážně v řádu jedné až třech desetin milimetru. Prvním testem bylo vložení čepu do předem připravených otvorů. Nejhorší výsledek poskytoval nylon. Čep bylo možné vložit s obtížemi jen do největšího otvoru. U materiálů Diran a PMMA bylo možné vložit čep do třech největších otvorů a s obtížemi i do nejmenšího. Nejlepším výsledkem disponoval materiál PET-G. U tohoto bylo možné vložení čepu do všech děr. Pokud bychom se zaměřili na naměřené velikosti děr je zřetelné velké zmenšení průměru u materiálu nylon. V teoretické části bylo zjištěno, že tento materiál má problémy ve smršťování. Tento fakt se poté projevil při vyhodnocení přesnosti děr. Ostatní materiály se při této zkoušce pohybovali v přesnosti jedné desetiny. Nejlepší výsledek však poskytoval materiál PET-G, jehož maximální odchylka činila 0,04mm. Při zaměření na výsledky přesnosti na pyramidovém artefaktu byla zjištěna značná nepřesnost materiálů, u nichž se projevil problém kroucení. Těmito materiály byly nylon a PMMA. Následná přesnost se po první vrstvě zlepšila. Velmi dobré výsledky vykázaly materiály Diran a PET-G. Maximální odchylka výšky materiálu Diran byla pouhých 0,03mm a materiálu PET-G 0,04mm. Pyramidový artefakt byl tvořen kvádry o čtvercové podstavě. Hodnota velikosti stran se v jednotlivých směrech od sebe značně nelišila. Překvapujícím zjištěním byla nejvyšší hodnota nepřesnosti u materiálu PET-G, jenž dosahovala nejdelší délky 0,3mm. Ostatní materiály vykazovaly výsledky přesnosti v rámci dvou desetin milimetru. Dalším překvapujícím zjištěním byly výsledky materiálu nylon. Tento materiál disponoval špatnými výsledky při zkoušce přesnosti na otvorech různých průměrů. Při této druhé zkoušce však disponoval nejvyšší přesností ze všech měřených vzorků. Maximální hodnota odchylky dosahovala hodnot 0,13 mm u nejdelší strany, 0,03 mm u středně dlouhé strany a 0,01 u nejmenší délky strany.



Obrázek 36 Vizualizace měřených rozměrů na artefaktu materiálu PMMA

18 Výroba mechanicky namáhané součásti

Zvolenou mechanicky zatěžovanou součástkou byla brzdová páčka k závodnímu kolu. Tento díl byl zvolen díky své vysoké mechanické zátěži a vysokým nárokům na rozměrovou přesnost konečného výrobku. Rozměrová přesnost byla důležitá z důvodu ukotvení a následného osazení seřizovacím šroubkem, kterým byla nastavena optimální poloha páčky od řídítek kola. Vybraným materiálem byl Diran 410MF07 pro své dobré výsledky v provedených mechanických testech. V testu rázové houževnatosti vykazoval výrazně nejlepší hodnoty z testovaných materiálů. V tahové zkoušce měl druhý nejlepší výsledek. Získaný model páčky byl díky technologii reverzního inženýrství vygenerován totožným způsobem jako model referenčního artefaktu za pomoci výpočetní tomografie. Následný tisk probíhal na tiskárně Stratasys F370.



Obrázek 37 Páčka závodního kola umístěna ve stroji ZEIS METROTOM 1500

Tabulka 27 Parametry tisku páčky závodního kola

DIRAN (Stratasys F370)	
Parametry	Hodnoty
Teplota trysky [C°]	280
Teplota podložky [C°]	90
Infil [%]	20
Úhel výplně [° / °]	45
Tloušťka vrstvy [mm]	0,18
Čas tisku [min]	47

18.1 Montáž brzdové páčky a zatížení při jízdě

Před montáží samotné brzdové páčky bylo nejdříve nutné odstranění podpor. Tento podpůrný materiál bylo částečně možné odstranit pouhým odlomením, ale zbylý support bylo nutné odstranit modelářskou bruskou. Po této operaci následovalo zapuštění čepu. Čep bylo možné vložit do příslušného otvoru bez jakýchkoli potíží a bez nutného broušení. Následně byla páčka ukotvena k brzdové pumpě.

V průběhu zatížení páčky při jízdě na kole bylo patrné značné pružení páčky. Tento fakt způsoboval nepřiměřeně a nerovnoměrně vynaloženou sílu potřebnou pro jízdu na závodním kole. Páčka obsahovala různá vykrojení a odlehčení, jež byly navrhovány pro těžší hliník. Tato opatření mohla způsobit vyšší pružení páčky při zatížení. Pro dosažení lepších vlastností páčky by bylo dobré pozměnění modelu, který nepotřebuje nutná vykrojení a odlehčení. I přes tyto výhrady plnila páčka svoji funkci. V budoucnu bude sledována její životnost a případné degradace.



Obrázek 38 Namontovaná páčka vytisknuta technologií FDM

19 Závěr

Tato bakalářská práce se zabývala porovnáváním vlastností moderních materiálů využitelných v technologii FDM (Fused Deposition Modeling). V teoretické části jsem se zabýval historií a vývojem 3D tisku, popisem technologie FDM, postupem výroby, druhy moderních i běžně používaných materiálů, mechanickými vlastnostmi materiálů, chybami při procesu 3D tisku, jejich možné příčiny a eliminace. Dále jsem uvedl popis referenčního artefaktu.

V praktické části jsem se zaměřil na vlastnosti materiálů, u kterých jsem provedl zkoušku tahem a zkoušku rázové houževnatosti pomocí Charpyho kladiva a porovnal jejich výsledky. Vybrané materiály byly Diran, nylon, PET-G, PMMA a PC-ABS. Kvůli závažné poruše tiskárny však nebylo možné dokončit referenční artefakt z materiálu PC-ABS. Dále jsem zhotovil mnou navržený referenční artefakt, na kterém jsem vyhodnotil vlastnosti a přesnost tisku jednotlivých materiálů. Díky technologii CT byla možná analýza přesnosti výroby artefaktu a získání barevného modelu artefaktu, jenž nám ukázal rozměrové odchylky od původního modelu. V neposlední řadě byl díky technologii reverzního inženýrství získán model mechanicky a rozměrově náročné součástky, jímž byla brzdová páčka od závodního kola. Již zhotovenou součástku jsem namontoval a podrobil provoznímu zatížení.

Vlastnosti testovaných materiálů se od sebe velmi lišily. Jednoznačně nejlepší materiál nebylo možné určit, poněvadž záleželo na cílené aplikaci a použití materiálu. Pokud by se od materiálů očekávaly dobré vlastnosti tisku, rozměrová přesnost a dobré mechanické vlastnosti, byl by nejlepší volbou materiál PET-G. Jestliže by výsledný model byl zatěžován ve vysoké míře s dobrou přesností tisku, ale s vyššími pořizovacími náklady tiskárny a samotného materiálu, bude nejlepším testovacím materiálem Diran. Tento materiál prokázal v tahové a rázové zkoušce své výborné mechanické vlastnosti. Navíc disponoval vysokou teplotní a chemickou odolností. Při vyhodnocování rozměrové přesnosti disponoval velmi dobrými výsledky. Zjištěné vlastnosti byly následně ověřeny při montáži a zatížení funkčního dílu. Jedinou nevýhodou u materiálu Diran byly špatné tiskové vlastnosti.

Naplnění cíle této bakalářské práce byla komplexní analýza typových vzorků materiálů používaných v technologii FDM. Vývojem nových materiálů, které disponují vysokoteplotní odolností, výbornými mechanickými vlastnostmi, chemickou odolností a lepšími tiskovými

vlastnostmi, dochází k stále širšímu uplatnění těchto materiálů v průmyslu, ale zřejmě nikdy zcela nenahradí konvenční metody výroby.

20 Zdroje

- [1] The Free Beginner's Guide. 3D Printing Industry [online]. 3D Printing Industry, 2017 [cit. 2022-07-27]. Dostupné z: <https://3dprintingindustry.com/3d-printing-basics-free-beginners-guide/#01-basics>
- [2] History of 3D Printing: When Was 3D Printing Invented. *ALL3DP* [online]. Creative Commons Attribution 4.0 International License., 2022, 29.4.2022 [cit. 2022-03-21]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/history-of-3d-printing-when-was-3d-printing-invented/>
- [3] První zmínky o 3D tisku. *DTiskni* [online]. DTiskni, 2019 [cit. 2022-03-21]. Dostupné z: <https://3d-tiskni.cz/prvni-zminky-o-3d-tisku/>
- [4] Přehled technologií 3D tisku. *Dkmp* [online]. dk metal, 2018, 09.01.2018 [cit. 2022-03-23]. Dostupné z: <http://www.dkmp.cz/o-nas/detail/prehled-technologie-3d-tisku>
- [5] HUŠKOVÁ, Lea. Hodnocení dopadů zvolených technologií 3D tisku na mechanické vlastnosti plastových dílů. Liberec, 2016. Diplomová práce. Technická univerzita v Liberci. Vedoucí práce Ing. Martin Seidl.
- [6] ABOUSHAMA, Mostafa a Sophian BEYERLEIN. Evaluation of Continuous Fiber Reinforcement Desktop 3D Printers: Desktop 3D Printers Overview. Technische Hochschule Ingolstadt, 2020. A Seminar Paper. Technische Hochschule Ingolstadt. Vedoucí práce Prof. Dr. Martin Bednarz. DOI:10.13140/RG.2.2.16640.87040
- [7] Fused Deposition Modeling (FDM). *ALL3DP* [online]. All3dp, 2021, 28.10.2021 [cit. 2022-07-21]. Dostupné z: <https://all3dp.com/1/types-of-3d-printers-3d-printing-technology/>
- [8] CAROLO, Lucas. Fused Deposition Modeling: FDM 3D Printing Simply Explained. *ALL3DP* [online]. All3dp, 2022, 8.6.2022 [cit. 2022-07-21]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/fused-deposition-modeling-fdm-3d-printing-simply-explained/>
- [9] Ing. Jan Šimota. Princip funkce FDM/FFF. Praha, 2021. Dostupné také z: https://moodle-vyuka.cvut.cz/pluginfile.php/488267/mod_resource/content/0/ZAT_2_nekovov%C3%A9%20technologie_2.pdf

- [10] Fotogrammetrie – 3D skenování s použitím fotoaparátu či mobilu. *Josefprusa* [online]. josefprusa, 2018 [cit. 2022-07-27]. Dostupné z: <https://josefprusa.cz/fotogrammetrie-3d-skenovani-s-pouzitim-fotoaparatu-ci-mobilu/>
- [11] What Is an STL File?. *All3dp* [online]. All3dp, 2021, 28.10.2021 [cit. 2022-03-23]. Dostupné z: <https://all3dp.com/1/stl-file-format-3d-printing/>
- [12] Nejlepší slicery 2021. *Sharplayers* [online]. 2021, 09. 07. 2021 [cit. 2022-03-23]. Dostupné z: <https://eshop.sharplayers.cz/a/nejepsi-slicery-2021>
- [13] 3D Printing Support Structures: A Complete Guide. *Amfg* [online]. AMFG, 2018, 17.10.2018 [cit. 2022-07-27]. Dostupné z: <https://amfg.ai/2018/10/17/3d-printing-support-structures-guide/>
- [14] CAROLO, Lucas. Fused Deposition Modeling: FDM 3D Printing Simply Explained. *ALL3DP* [online]. All3dp, 2022, 8.6.2022 [cit. 2022-07-21]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/fused-deposition-modeling-fdm-3d-printing-simply-explained/>
- [15] What's New in Materials for 3D Printing: Tracking Recent Progress. *AMFG* [online]. London: AMFG 2020, 2020 [cit. 2022-07-28]. Dostupné z: <https://amfg.ai/2020/06/04/whats-new-in-materials-for-3d-printing-tracking-recent-progress/>
- [16] Datasheets. *Materialise* [online]. Belgie: Materialise, 2022 [cit. 2022-07-26]. Dostupné z: <https://www.materialise.com/en/academy-manufacturing/resources/datasheets#fdm>
- [17] Toughness Values of Several Plastics. *Omnelux* [online]. SpecialChem [cit. 2022-07-26]. Dostupné z: <https://omnexus.specialchem.com/polymer-properties/properties/toughness>
- [18] Diran. *Stratasys* [online]. [cit. 2022-07-21]. Dostupné z: <https://www.stratasys.com/en/materials/materials-catalog/fdm-materials/diran-410mf07/>
- [19] Technical Data Sheet: PLA. *SD3D* [online]. SD3D, 2017 [cit. 2022-07-28]. Dostupné z: https://www.sd3d.com/wp-content/uploads/2017/06/MaterialTDS-PLA_01.pdf
- [20] Technical Data Sheet: 3DXSTAT™ ESD-PEKK 3D Printing Filament. *3DXTECH* [online]. USA: 3DXTECH, 2022 [cit. 2022-07-28]. Dostupné z: https://www.3dxtech.com/downloads/ESD_PEKK_v3.pdf

- [21] KONSTRUKCE 3D TISKÁRNY PRO MATERIÁLY S VYŠŠÍ PEVNOSTÍ: DESIGN OF 3D PRINTER FOR HIGH STRENGTH MATERIALS. BRNO, 2015. DIPLOMOVÁ PRÁCE. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. Vedoucí práce Ing. DANIEL KOUTNÝ, Ph.D.
- [22] PMMA filament for 3D printing. *MATERIALPRO3D* [online]. Brno: Devil Design Sp. J., 2022 [cit. 2022-07-28]. Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/pmma-filament/pmma-filament-transparentni-1-75mm-devil-design-1-kg/>
- [23] Rozdíl mezi ABS, PLA, PETG. *Materialpro3d* [online]. *materialpro3d.cz*, 2017, 20.7.2017 [cit. 2022-07-21]. Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/blog/rozdily-abs-pla-petg/#:~:text=PETG%20vl%C3%A1kno%20kombinuje%20vlastnosti%20materi%C3%A1l%C5%AF,je%2C%20C5%BEe%20jej%20lze%20recyklovat>
- [24] Prusa Research [online]. Prusa Research, 2022 [cit. 2022-07-27]. Dostupné z: https://help.prusa3d.com/cs/article/pla_2062
- [25] 3D Printing Materials – The Ultimate Guide: Cause We Are Living In A Material World. *ALL3DP* [online]. *All3DP*, 2021, Nov 4, 2021 [cit. 2022-07-27]. Dostupné z: <https://all3dp.com/1/3d-printing-materials-guide-3d-printer-material/>
- [26] V., Carlo. All you need to know about ABS for 3D printing. *3dnatives* [online]. 2019, 6.6.2019 [cit. 2022-07-24]. Dostupné z: <https://www.3dnatives.com/en/abs-3d-printing-060620194/>
- [27]. Prusa Research [online]. Prusa Research, 2021 [cit. 2022-07-28]. Dostupné z: https://help.prusa3d.com/cs/article/abs_2058
- [28] PRUSA, Josef. Polykarbonát (PC). *PRUSA RESEARCH* [online]. [cit. 2022-07-24]. Dostupné z: https://help.prusa3d.com/cs/article/polykarbonat-pc_165812
- [29] MALONEY, Dan. PLASTICS: PETG [online]. *hackaday*, 2019, 29.01.2019 [cit. 2022-07-21]. Dostupné z: <https://hackaday.com/2019/01/29/plastics-petg/>
- [30] PETG. Prusa Research [online]. Prusa Research, 2022 [cit. 2022-07-27]. Dostupné z: https://help.prusa3d.com/cs/article/petg_2059
- [31] Nylon: Základní informace. *Prusa Research* [online]. Prusa Research, 2022 [cit. 2022-07-27]. Dostupné z: https://help.prusa3d.com/cs/article/nylon_167188

- [32] PMMA: Průsvitný a odolný filament pro zkušené tiskaře. *MATERIALPRO3D* [online]. Brno: MATERIALPRO3D, 2020, 22.10.2020 [cit. 2022-07-28]. Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/blog/pmma-filament/>
- [33] 9085. *STRATASYS* [online]. USA: STRATASYS [cit. 2022-07-26]. Dostupné z: https://www.stratasys.com/-/media/files/material-spec-sheets/mss_fdm_ultem9085_1117a.pdf
- [34] ThermaX™ PEI 3D Filament, Made using ULTEM™ 9085 PEI. *ThermaX* [online]. USA: ThermaX™, 2021 [cit. 2022-07-28]. Dostupné z: <https://visionminer.com/products/thermax-pei9085>
- [35] ThermaX™ PEKK-A. *ThermaX* [online]. USA: ThermaX™, 2021 [cit. 2022-07-28]. Dostupné z: <https://visionminer.com/products/thermax%E2%84%A2-pekk-a>
- [36] AHN, S. H., M. MONTERO, D. ODELL, S. ROUNDY a P. K. WRIGHT Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS. *Rapid Prototyping Journal*. 2002, 8(4): 248-257. DOI: 10.1108/13552540210441166. ISSN 13552546. Dostupné také z: Go to ISI://WOS:000178077300006
- [37] Gurcan Atakok, Menderes Kamb a Hanife BukreKoc. Tensile, three-point bending and impact strength of 3D printed parts using PLA and recycled PLA filaments: A statistical investigation. *Journal of Materials Research and Technology* [online]. 2022, **2022**(18), 13 [cit. 2022-07-26]. Dostupné z: doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.03.013>
- [38] MAREK, Bc. JIŘÍ. *PROBLEMATIKA 3D TISKU*. Praha, 2017. Diplomová práce. ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE. Vedoucí práce Ing. ZDEŇKA JENÍKOVÁ, Ph.D.
- [39] FDM 3D Printing: Common problems and how to solve them. *Wikifactory* [online]. +bitfab, 2020 [cit. 2022-07-28]. Dostupné z: <https://wikifactory.com/+bitfab/stories/fdm-3d-printing-common-problems-and-how-to-solve-them>
- [40] Kroucení (warping). *Prusa Research* [online]. Prusa Research, 2022 [cit. 2022-07-28]. Dostupné z: https://help.prusa3d.com/cs/article/krouceni-warping_2011

- [41] Stringování a odkapávání filamentu. *Prusa Research* [online]. Prusa Research, 2022 [cit. 2022-07-28]. Dostupné z: https://help.prusa3d.com/cs/article/stringovani-a-odkapavani-filamentu_1805
- [42] Špatné přemostění (bridging). *Prusa Research* [online]. Prusa Research, 2022 [cit. 2022-07-28]. Dostupné z: https://help.prusa3d.com/cs/article/spatne-premosteni-bridging_1802
- [43] Marc-Antoine de Pastre, Saint-Clair Toguem Tagne a Nabil Anwer. Test artefacts for additive manufacturing: A design methodology review. *Marc-Antoine de PastreNabil Anwer* [online]. ENS Paris-Saclay, Université Paris-Saclay, 91190 Gif-sur-Yvette, France, LURPA, ENS Paris-Saclay, Université Paris-Saclay, 91190 Gif-sur-Yvette, France, LNE-CNAM, 75015 Paris, France, 2020, 11 October 2020, **November 2020** (31), 11 [cit. 2022-04-24]. Dostupné z: doi: <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2020.09.008>
- [44] About 3DBenchy. *3dbenchy* [online]. 3dbenchy, 2020 [cit. 2022-07-24]. Dostupné z: <https://www.3dbenchy.com/features/>
- [45] Stavebnice 3D tiskárny Original Prusa i3 MK3S+. *Prusa Research* [online]. Prusa Research, 2020 [cit. 2022-07-28]. Dostupné z: https://www.prusa3d.com/cs/produkt/stavebnice-3d-tiskarny-original-prusa-i3-mk3s-3/?gclid=Cj0KCQjw54iXBhCXARIsADWpsG9dzJddiOuPg_PmnbHdQBnTC-6INNuRA6PgTqbmdf4EHjj6jkrklUaAojzEALw_wcB
- [46] Stratasys F370: Reliable. Repeatable. Exceptional. In an office-friendly design. *Stratasys 3D Printers* [online]. UK: Stratasys, 2020 [cit. 2022-07-28]. Dostupné z: <https://www.sys-uk.com/3dprinters/stratasys-f370/>
- [47] ČERMÁK, David. Vlastnosti těles připravených 3D tiskem. Praha, 2019. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Ing. Zdeňka Jeníková, Ph.D.
- [48] NEBESKÝ, Roman. *Stanovení vlivu použité metody na výsledek zkoušky rázem v ohybu*. Liberec, 2021. Bakalářská. Technická univerzita v Liberci. Vedoucí práce Ing. Jiří Sobotka, Ph.D.
- [49] PC-ABS: Combining the Best of Polycarbonate and ABS. *STRATASYS* [online]. STRATASYS, 2017 [cit. 2022-07-28]. Dostupné z: <https://www.stratasys.com/en/materials/materials-catalog/fdm-materials/pc-abs/>

[50] Nylon AF80 Aramid. *FILLAMENTUM* [online]. FILLAMENTUM, 2022 [cit. 2022-07-28]. Dostupné z: <https://fillamentum.com/collections/nylon-filament/nylon-af80-aramid-filament/>

[51] Prusament PETG Signal White 1kg. *Prusa Research* [online]. Prusa Research, 2018 [cit. 2022-07-28]. Dostupné z: <https://www.prusa3d.com/product/prusament-petg-signal-white-1kg/>

[52] Zeiss Metrotom 1500. *MCAE* [online]. Kuřim: MCAE, 2016 [cit. 2022-07-28]. Dostupné z: <https://www.mcae.cz/produkty/zeiss-metrotom-1500/>

21 Seznam obrázků

Obrázek 1 Stereolitografní aparát SLA-1 [2]	11
Obrázek 2 Graf nejprodávanějších typů tiskáren za rok 2020 [6]	13
Obrázek 3 Princip SLA tiskárny [5].....	14
Obrázek 4 Princip FDM tiskárny [9].....	15
Obrázek 5 Získaný 3D model motorkové páčky pomocí technologie CT	16
Obrázek 6 Model páčky převedený do formátu STL	17
Obrázek 7 Vytištěná spojková páčka motorky s neodstraněnými podporami tisku.....	19
Obrázek 8 Graf vlivu procentuální výplně na pevnost v tahu [38].....	29
Obrázek 9 Geometrie modelu pro tahovou zkoušku [47].....	36
Obrázek 10 Geometrie modelu pro metodu Charpyho kladiva [48]	36
Obrázek 11 Model zkušebního artefaktu	37
Obrázek 12 Chybný průběh tisku vzorků pro zkoušku rázové houževnatosti z nylonu	38
Obrázek 13 Chybný průběh tisku vzorků pro tahovou zkoušku z PMMA	39
Obrázek 14 Výsledek tisku materiálu Diran 410MF07 na tiskárně F370	40
Obrázek 15 Trhací stroj LabTest 5.100SP1	42
Obrázek 16 Nalepený hliníkový plíšek na vzorek materiálu Diran pro tahovou zkoušku	42
Obrázek 17 Vzorek materiálu Diran po přetržení	46
Obrázek 18 Graf vzorové průběhu tahové zkoušky materiálu Diran vzorku č. 1.....	47
Obrázek 19 Zkušební stroj CEAST pro zkoušku rázové houževnatosti Charpyho kladivem	48
Obrázek 20 Částečně přelomený vzorek materiálu Diran	50
Obrázek 21 Přelomený vzorek materiálu nylon	50
Obrázek 22 Přelomený vzorek materiálu PC-ABS	51
Obrázek 23 Přelomený vzorek materiálu PET-G	52
Obrázek 24 Přelomený vzorek materiálu PMMA.....	52
Obrázek 25 Referenční vzorek umístěný ve stroji ZEIS METROTOM 1500	56
Obrázek 26 Stroj ZEISS METRONOM 1500	57
Obrázek 27 Barevná mapa přesnosti materiálu PMMA.....	59
Obrázek 28 Barevná mapa přesnosti tisku materiálu PET-G	59
Obrázek 29 Barevná mapa přesnosti tisku materiálu Diran	60
Obrázek 30 Barevná mapa přesnosti tisku materiálu nylon	60

Obrázek 31 Vybraný test převisu materiálu Diran	61
Obrázek 32 Vybraný test stringování materiálu nylon.....	62
Obrázek 33 Vybraný test strigování materiálu PMMA.....	62
Obrázek 34 Vybraný test přemostění materiálu Diran	63
Obrázek 35 Vybraný test přemostění materiálu PET-G	64
Obrázek 36 Vizualizace měřených rozměrů na artefaktu materiálu PMMA	67
Obrázek 37 Páčka závodního kola umístěna ve stroji ZEIS METROTOM 1500	68
Obrázek 38 Namontovaná páčka vytisknuta technologií FDM	69

22 Seznam tabulek

Tabulka 1 Vlastnosti vybraných materiálů [17], [18], [19], [20], [21], [22].....	21
Tabulky 2 Parametry tisku vzorků pro tahovou a rázovou zkoušku materiálu nylon	40
Tabulky 3 Parametry tisku vzorků pro tahovou a rázovou zkoušku materiálu PMMA.....	40
Tabulky 4 Parametry tisku vzorků pro tahovou a rázovou zkoušku materiálu PET-G	41
Tabulky 5 Parametry tisku vzorků pro tahovou a rázovou zkoušku materiálu PC-ABS	41
Tabulky 6 Parametry tisku vzorků pro tahovou a rázovou zkoušku materiálu Diran	41
Tabulka 7 Zjištěné hodnoty materiálu Diran pro tahovou zkoušku	44
Tabulka 8 Zjištěné hodnoty materiálu nylon pro tahovou zkoušku.....	44
Tabulka 9 Zjištěné hodnoty materiálu PC-ABS pro tahovou zkoušku	44
Tabulka 10 Zjištěné hodnoty materiálu PET-G pro tahovou zkoušku	45
Tabulka 11 Zjištěné hodnoty materiálu PMMA pro tahovou zkoušku	45
Tabulka 12 Průměrné výsledky vypočtených hodnot	47
Tabulka 13 Data materiálů z technického listu výrobce [18], [22], [49], [50], [51]	47
Tabulka 14 Zjištěné hodnoty materiálu Diran pro rázovou zkoušku	50
Tabulka 15 Zjištěné hodnoty materiálu nylon pro rázovou zkoušku	51
Tabulka 16 Zjištěné hodnoty materiálu PC-ABS pro rázovou zkoušku	51
Tabulka 17 Zjištěné hodnoty materiálu PET-G pro rázovou zkoušku	52
Tabulka 18 Zjištěné hodnoty materiálu PMMA pro rázovou zkoušku	53
Tabulka 19 Průměrné hodnoty rázové houževnatosti vybraných materiálů.....	54
Tabulka 20 Parametry tisku referenčního artefaktu z materiálu nylon.....	57
Tabulka 21 Parametry tisku referenčního artefaktu z materiálu PMMA.....	57
Tabulka 22 Parametry tisku referenčního artefaktu z materiálu PET-G	58
Tabulka 23 Parametry tisku referenčního artefaktu z materiálu PC-ABS	58
Tabulka 24 Parametry tisku referenčního artefaktu z materiálu Diran	58
Tabulka 25 Naměřené hodnoty přesnosti výroby otvorů vybranými materiály.....	64
Tabulka 26 Naměřené hodnoty přesnosti výroby pyramid vybranými materiály	65
Tabulka 27 Parametry tisku páčky závodního kola	68

