

DIPLOMOVÁ

PRÁCE

Výběr materiálu pro 3D tisk součásti

Material selection for 3D printing of a part

STUDIJNÍ PROGRAM

Výrobní inženýrství

VEDOUCÍ PRÁCE

Ing. Zdeňka Jeníková, Ph.D.

KRŮTA

VOJTĚCH

2023

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Krůta** Jméno: **Vojtěch** Osobní číslo: **482417**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav materiálového inženýrství**
Studijní program: **Výrobní inženýrství**
Specializace: **Bez specializace**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Výběr materiálu pro 3D tisk součásti

Název diplomové práce anglicky:

Material selection for 3D printing of a part

Pokyny pro vypracování:

Cíl: Navrhnout materiál a způsob 3D tisku součásti původně vyráběné ze slitiny hliníku

1. Rešerše pravidel použití materiálů v letectví
2. Vytvoření modelu a výběr materiálu strun pro tisk
3. Návrh parametrů pro tisk a ověření tisku
4. Testování vytisknutých součástek
5. Diskuse a závěr

Seznam doporučené literatury:

- [1] GRELLMANN, Wolfgang, ed. a Sabine SEIDLER, ed. Polymer testing. 2nd ed. Munich: Hanser, ©2013. xxxiv, 678 s. ISBN 978-1-56990-548-7.
- [2] CHUA, Chee Kai a Kah Fai LEONG. 3D printing and additive manufacturing: principles and applications. 5th edition of Rapid prototyping. New Jersey: World Scientific, [2017], ©2017. xxx, 426 sstran. ISBN 978-981-3146-76-1.
- [3] KRŮTA, Vojtěch. PŘEHLED A POROVNÁNÍ PLA MATERIÁLŮ PRO PLASTOVÝ 3D TISK. Praha, 2021. Bakalářská práce. ČVUT v Praze. Vedoucí práce Andronov Vladislav.
- [4] MILSIMER, Petr. VLIV PERIMETRŮ NA MECHANICKÉ VLASTNOSTI PLASTOVÝCH 3D TIŠTĚNÝCH DÍLŮ. Praha, 2021. Bakalářská práce. ČVUT v Praze. Vedoucí práce Andronov Vladislav.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Zdeňka Jeníková, Ph.D. ústav materiálového inženýrství FS

Jméno a pracoviště druhého(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Ing. Jakub Antoň ústav materiálového inženýrství FS

Datum zadání diplomové práce: **23.03.2023** Termín odevzdání diplomové práce: **31.07.2023**

Platnost zadání diplomové práce: _____

Ing. Zdeňka Jeníková, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

doc. Ing. Ladislav Cvrček, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

KRŮTA, Vojtěch. *Výběr materiálu pro 3D tisk součástí*. Praha: ČVUT 2023. Diplomová práce.
České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní.



**FAKULTA
STROJNÍ
ČVUT V PRAZE**

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně. Dále prohlašuji, že jsem všechny použité zdroje správně a úplně citoval a uvádím je v příloženém seznamu použité literatury.

Nemám závažný důvod proti zpřístupnění této závěrečné práce v souladu se zákonem č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) v platném znění.

V Praze dne:

Podpis:

Poděkování

Rád bych tímto poděkoval vedoucímu mé diplomové práce Ing. Zdeňce Jeníkové, Ph.D. za trpělivost, užitečné připomínky a rady při tvorbě této diplomové práce. Rovněž bych rád poděkoval druhému vedoucímu této práce Ing. Jakubu Antoňovi za věcné připomínky a pomoc s realizací myšlenky této diplomové práce a také Ing. Vítu Novákovi za pomoc se zpracováním některých úkonů experimentální části. Také bych rád poděkoval své rodině za podporu během studia.

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá problematikou plastového FDM 3D tisku. Cílem práce je výběr vhodného materiálu pro 3D tisk páčky nouzového hydraulického systému v leteckém simulátoru. Teoretická část se zabývá principem a limity technologie FDM. Dále následuje popis základních tiskových parametrů a také nejpoužívanějších materiálů. V poslední kapitole teoretické části jsou zpracovány technické normy týkající se certifikace materiálů v letectví. Experimentální část obsahuje výběr z řady technických materiálů. Jedná se o materiály PETG, CPE HG100, PETG-CF, PA12-CF, HTN-CF25, PC a PA6-CF. Experiment začíná úpravou CAD modelu před tiskem, následuje výběr vhodných tiskových parametrů a provedení normovaných mechanických zkoušek, specificky poté zkoušky ohybem, zkoušky rázové houževnatosti metodou Charpy a také zkoušky tahem. Součástí experimentu je rovněž orientační pevnostní analýza, která má za cíl určit, zdali je materiál vhodný pro danou aplikaci a také ověřit její použitelnost u 3D tisku. Testování mechanické odolnosti páčky se skládá z její instalace přímo do simulátoru a také z domácího testování za pomoci experimentálně zjištěného maximálního zatížení. Výsledky jednotlivých testů jsou poté shrnuty a je provedeno jejich vyhodnocení za pomoci vícekriteriálního rozhodování.

Klíčová slova

Aditivní výroba, 3D tisk, FDM, 3D tisk a letectví, porovnání materiálů, 3D tiskové parametry

Abstract

This thesis deals with the issue of plastic FDM 3D printing. The aim of the thesis is the selection of a suitable material for 3D printing of the lever of the emergency hydraulic system in the flight simulator. The theoretical part deals with the principles and limits of FDM technology. This is followed by a description of the basic printing parameters as well as the most used materials. In the last chapter of the theoretical part, technical standards related to the certification of materials in aviation are elaborated. The experimental part contains a selection of a range of technical materials. These materials are PETG, CPE HG100, PETG-CF, PA12-CF, HTN-CF25, PC and PA6-CF. The experiment starts with the modification of the CAD model before printing, followed by the selection of suitable printing parameters and the execution of standard mechanical tests, specifically bending tests, Charpy impact strength tests and tensile tests. The experiment also includes an indicative strength analysis to determine if the material is suitable for the application and also to verify its applicability to 3D printing. Mechanical durability testing of the lever consists of installing it directly into the simulator and also home testing using the experimentally determined maximum load. The results of each test are then summarized and evaluated using multi-criteria decision making.

Key words

Additive manufacturing, 3D printing, FDM, 3D printing and aviation, materials comparison, 3D printing parameters

Seznam použitých zkratek

STL	Stereolitografický formát
FDM	Fused Deposition Modeling
CAD	Computer Aided Design
PEI	Polyetherimid
PLA	Kyselina polymléčná
PETG	Polyethylentereftalát glykol
ABS	Akrylonitrilbutadienstyren
PC	Polykarbonát
PA	Polyamid
TPU	Termoplastický polyuretan
EASA	Evropská agentura pro letectví
FAA	Federální letecká správa
HTN	Vysokoteplotní nylon
CPE	Chlorovaný polyethylen
CF	Uhlíkové vlákno

Obsah

Úvod	11
1 Aditivní technologie	14
1.1 Historie 3D tisku.....	15
1.2 Postup výroby pomocí 3D tisku, reverzní inženýrství.....	16
1.3 FDM 3D tisk.....	20
1.4 Konstrukce FDM tiskáren.....	23
1.5 Tiskové parametry	24
1.5.1 Výška vrstvy	24
1.5.2 Hustota výplně	25
1.5.3 Počet perimetrů	26
1.5.4 Tisková teplota.....	26
1.5.5 Rychlost tisku	27
1.5.6 Tisková orientace	28
1.5.7 Chlazení.....	29
2 Tiskové materiály	30
2.1 PLA	31
2.2 PETG	31
2.3 ABS	32
2.4 PC	32
2.5 PA.....	32
2.6 TPU.....	33
3 Certifikace a nahrazování dílů	34
4 Analýza problému a cíl práce	39
5 Návrh metodiky testování a provedení experimentu	42
5.1 Tvorba modelu součásti.....	42
5.2 Volba testovacích vzorků	45
5.2.1 Vzorky pro zkoušku ohybem.....	45
5.2.2 Vzorky pro zkoušku rázové houževnatosti metodou Charpy	46
5.2.3 Vzorky pro zkoušku tahem	47

5.3	Tisk vzorků a tiskové parametry	47
5.4	Zkouška ohybem	51
5.5	Zkouška rázové houževnatosti.....	53
5.6	Zkouška tahem.....	55
5.7	Pevnostní analýza dílu	56
5.8	Testování mechanické odolnosti páček.....	59
6	Shrnutí a vyhodnocení výsledků testování	62
6.1	Zkouška ohybem tištěných vzorků.....	62
6.2	Zkouška rázové houževnatosti tištěných vzorků	64
6.3	Zkouška tahem tištěných vzorků	65
6.4	Pevnostní analýza	70
6.5	Testování mechanické odolnosti páček.....	73
6.6	Vícekritériální rozhodování.....	77
7	Diskuze.....	79
8	Závěr	81
	Seznam použité literatury	82
	Seznam obrázků.....	90
	Seznam tabulek	92
	Seznam grafů	93
	Seznam příloh	94

Úvod

Aditivní výroba, známá také jako 3D tisk, představuje revoluční metodu vytváření fyzických objektů z digitálních modelů. Aditivní výroba vychází z principu postupného přidávání materiálu vrstvu po vrstvě, což je v přímém kontrastu s tradičními výrobními technikami, jako je frézování či soustružení, kde je materiál postupně odebírán.

Přestože je aditivní výroba v současné době již do jisté míry industrializovaná, stále probíhá její další vývoj, neboť se v této technologii skrývá značný potenciál. Nejenže může zlepšit efektivitu a udržitelnost výrobních procesů, ale také může umožnit efektivní vytváření zcela nových produktů, které by byly pomocí tradičních výrobních technik obtížně či nákladně realizovatelné. Jedná se o různé prototypy, ukázkové díly či tvarově složité součásti. Aktuálně existuje několik druhů 3D tisku, avšak světově nejrozšířenějším je plastový 3D tisk metodou Fused Deposition Modeling (FDM). Zde se využívá celá řada tiskových materiálů, které nabízejí různé vlastnosti a potenciální aplikace. Na jedné tiskárně je tak možné zpravidla tisknout jak materiály, které jsou primárně určeny k prezentačním účelům, tak také vysoce odolné technické materiály k přímé aplikaci v průmyslu.

Příkladem možné budoucí aplikace 3D tisku je letectví, a to z důvodů možnosti výroby složitých tvarů, flexibility a příznivé ceny při aplikaci u kusové nebo malosériové výroby. Při použití technických materiálů by tak mělo být například v leteckém simulátoru teoreticky možné do určité míry nahradit konvenčně vyrobené díly 3D tiskem při zachování autenticity a funkčnosti. Díl by se vytiskl rychle, byl by snadno upravitelný a nahraditelný, zatímco při použití konvenční výrobní technologie by například při změně tvaru dílu bylo nutné poupravit celý výrobní program.

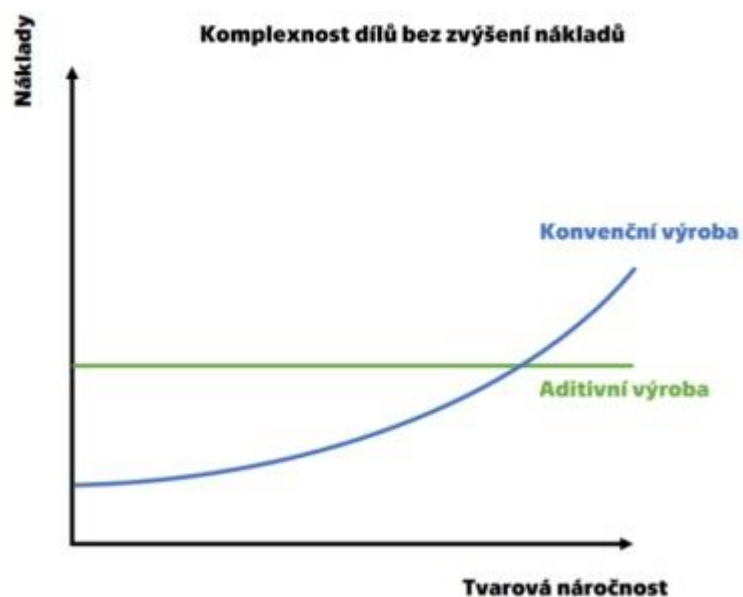
Motivací této práce byla snaha o zjištění limitů této technologie a využívaných materiálů a také její možnou aplikaci v praxi. Některé materiály jsou totiž dle výrobců udávány jako vysoce odolné konstrukční materiály, které jsou určeny k přímé náhradě například hliníkových slitin. Některé materiály jsou poté speciálně v tiskařské komunitě považovány za velmi odolné a vhodné pro nejrůznější aplikace, i když jsou cenově dostupné. Další motivací byl výzkum v dnešní době čím dál populárnějších kompozitních filamentů, kde je běžná matrice doplněna o plniva ve formě uhlíkových vláken.

Cílem této práce je vybrat vhodný materiál a tiskové parametry pro 3D tisk dané součásti. V tomto případě se jedná o páčku nouzového hydraulického systému v leteckém simulátoru. Finální výběr se zakládal na úpravě modelu, volbě vhodných tiskových parametrů pro jednotlivé materiály a na komplexním testování mechanické odolnosti dílu. Toto testování se skládalo jak z normovaných mechanických zkoušek, tak z přímého testování odolnosti dílu. V případě aplikovatelnosti více materiálů byla do výběru zahrnuta rovněž cena a nejvýhodnější materiál byl vybrán na základě vícekritériálního rozhodování. Součástí práce bylo také ověření možnost použití pevnostní analýzy pro predikci chování 3D tištěných dílů.

TEORETICKÁ ČÁST

1 Aditivní technologie

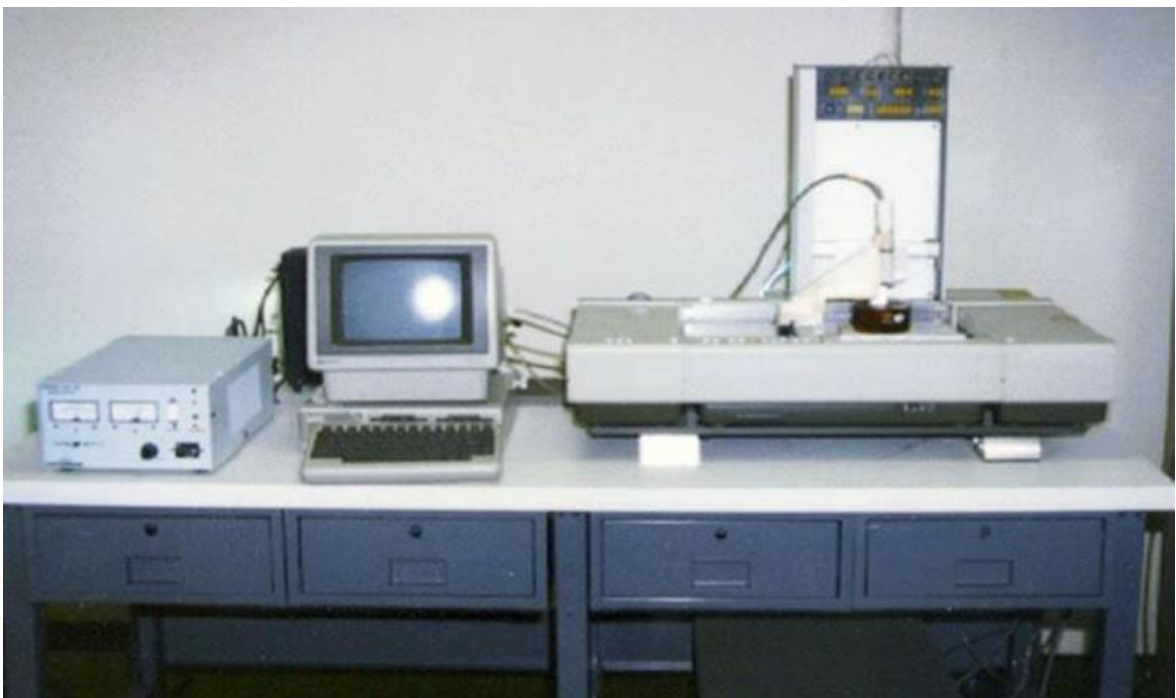
Aditivní technologie nebo také zjednodušeně 3D tisk je revoluční výrobní odvětví, které slouží k výrobě dílů různé složitosti a tvaru z plastů, kovů a dalších materiálů. Jeho podstatou je tvorba finálního modelu nanášením jednotlivých vrstev na sebe, tzv. princip „layer-by-layer“, způsob nanášení závisí na použité technologii. 3D tisk se využívá k takzvanému rapid prototypingu, neboli prototypování. Jeho hlavní výhodou je možnost rychlé výroby téměř jakéhokoliv prototypu za zlomek ceny oproti konvenčním technologiím. Tato časová i finanční úspora přináší značnou konkurenční výhodu při vývoji a uvádění produktů na trh. Prototypy tak slouží k účelům vizualizace, testování funkčnosti, ale i propagačním a reklamním účelům. 3D tisk však neslouží pouze k výrobě prototypů. V dnešní době je jeho použití rozšířené i v dalších sférách. Vzhledem ke své podstatě a u moderních strojů i kvalitě výstupního modelu se taktéž hodí pro kusovou či malosériovou výrobu funkčních dílů, kde je však nutné správně zvolit technologii a taktéž materiál, což je cílem této práce. 3D tisk však není vhodný pro sériovou výrobu, a to především pro časovou náročnost výroby jednoho kusu například při porovnání se vstřikováním. Využití 3D tisku pro běžnou výrobu rovněž závisí na tvarové složitosti, která určuje výhodnost této technologie. Závislost nákladů na tvarové náročnosti je vidět na Obr. 1. Všechny tyto aplikace najdou své primární uplatnění v komerční sféře, avšak v posledních letech nastal taktéž „boom“ v oblasti hobby 3D tisku. [1]



Obr. 1 Porovnání nákladů v závislosti na tvarové náročnosti [2]

1.1 Historie 3D tisku

Koncept výroby pomocí 3D tisku se poprvé objevil již po 2. světové válce, avšak skutečná historie tohoto výrobního odvětví sahá do 80. let 20. století, kdy japonský vědec Hideo Kodama vymyslel systém výroby pomocí vytvrzování tekuté pryskyřice UV světlem, tento vynález si však nemohl nechat patentovat. Za „otce“ 3D tisku je tak považován Charles Hull, který si v roce 1984 zažádal o patent na stereolitografický systém, který mu byl schválen v roce 1986. Ve stejném roce založil společnost 3D Systems a za 2 roky na to vydal první komerčně dostupnou tiskárnu, a to model SLA-1 (viz Obr. 2). S Chuckem Hullem se kromě první 3D tiskárny taktéž pojí vynález formátu STL. [3]



Obr. 2 První komerčně dostupná 3D tiskárna - model SLA-1 [3]

Jako první se tedy na trh dostala tiskárna typu SLA, avšak v krátkém časovém sledu ji následovaly i další metody. Taktéž v roce 1988 získal Carl Deckard patent na technologii Selective Laser Sintering (SLS). Tato technologie se oproti SLA liší užitím práškového materiálu spěkaného laserem. Z hlediska současnosti a také této práce je však nejdůležitější rok 1992, kdy získala společnost Stratasys založená Scottem Crumpem patent na technologii FDM (Fused Deposition Modeling), ze které se stala světově nerozšířenější a nejpoblárnější metoda 3D tisku.

Po přelomu tisíciletí se 3D tisk dostal více do podvědomí veřejnosti. V roce 2000 došlo například k prvnímu využití 3D tisku v medicíně, kdy byl využit pro vytištění ledviny. V roce 2008 byla taktéž vytištěna první protetická končetina. V roce 2004 byl založen projekt RepRap, který má velký vliv na 3D tisk dodnes. Základem tohoto projektu je princip sebereplikace, neboli možnost vytisknout co nejvíce dílů na jedné 3D tiskárně pro další 3D tiskárnu a tím výrazně zvýšit produktivitu a snížit výrobní náklady a náročnost výroby. Tento trend se ještě umocnil v roce 2009, kdy vypršel patent na technologii FDM a mohlo dojít k jejímu masivnímu rozšíření. V roce 2010 byl například představen prototyp prvního plně 3D tištěného auta, a to modelu Urbee (Obr. 3). Dalším důležitým milníkem byl tisk a implementace protetické čelisti v roce 2012. [4]



Obr. 3 Prototyp 3D tištěného vozidla Urbee [5]

V dnešní době je 3D tisk již rozšířenou technologií, která není využívána jen v rámci průmyslu či medicíny, ale i jako kutilský nástroj či jako prostředek pro podnikání různého druhu. Mezi nejběžnější tiskárny patří tiskárny od společností Prusa Research, Creality či Bambu Lab. Taktéž dochází k velkému rozšíření portfolia materiálů, čím dál více jsou například využívány kompozitní materiály.

1.2 Postup výroby pomocí 3D tisku, reverzní inženýrství

Výroba pomocí 3D tisku začíná u modelu. Model lze získat více způsoby, avšak nejběžnější je jeho vytvoření za pomoci 3D Computer-Aided Design (CAD) softwaru. Mezi CAD programy patří například Inventor, Creo, CATIA, Solidworks a další. Pomocí CADu lze snadno modelovat různé geometrické tvary, avšak nejsou vhodné pro různé organické

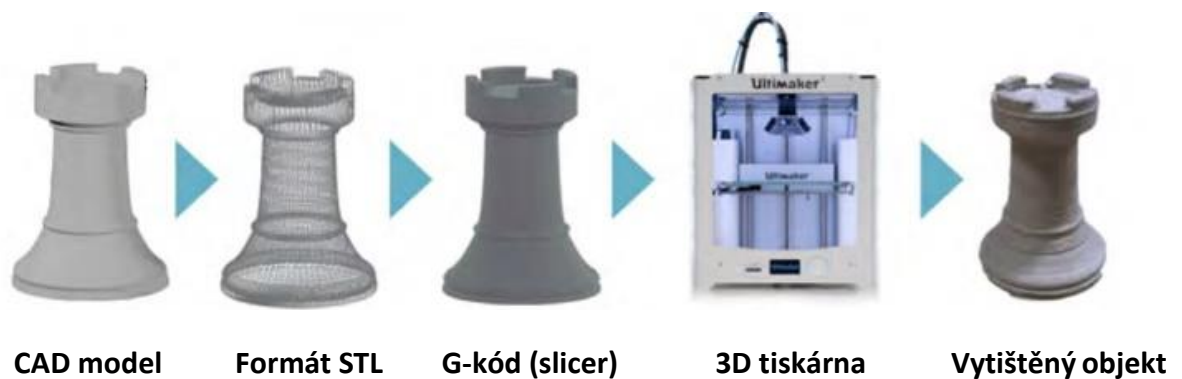
tvary. Jelikož se 3D tisk často využívá i pro výrobu sošek a dalších nepravidelných tvarů, je zde vhodnější tvorba modelu pomocí metody zvané sculpturing a užití programů jako Blender či ZBrush.

Vytvořený model však není možné rovnou vytisknout, je nutné jej pro tiskárnu připravit. Model se tedy následně převádí do formátu STL (stereolitografický formát), který z CAD modelu udělá za pomoci polygonizace geometrickou reprezentaci modelu trojúhelníkovými segmenty. Výsledný detail závisí na velikosti vygenerovaných segmentů. Lze takto docílit přesnější reprezentace, avšak za cenu delšího generování. Takto vytvořený STL model lze následně vložit do speciálního softwaru, určeného pro přípravu 3D tisku, takzvaného sliceru. Je však nutné zmínit, že novější verze slicerů nepodporují jen formát STL, ale i například formáty OBJ či STEP.

Jak již bylo zmíněno v předchozí kapitole, základním principem 3D tisku je tvorba finálního modelu pokládáním jednotlivých vrstev na sebe. Po nahrání modelu ve formátu STL nebo jiném vhodném formátu slicer „rozřeže“ model na jednotlivé vrstvy a ty následně převede do textového formátu, který dokáže samotná 3D tiskárna rozpoznat a přečíst. Tento formát se nazývá g-kód a obsahuje veškeré nutné informace pro správné vytištění modelu, jako například dráhy tiskové hlavy, výšky jednotlivých vrstev, teploty, rychlosti a mnoho dalších. Všechny tyto parametry lze ve sliceru nastavit a jejich nastavení výrazně ovlivňuje výsledný čas a kvalitu tisku. Většina slicerů je tzv. open-source, neboli je lze stáhnout a využívat zdarma. Mezi nejpoužívanější patří programy PrusaSlicer, Ultimaker Cura či Raise3D IdeaMaker. [6]

Následuje samotný tisk, kdy se tiskárna řídí pokyny z g-kódu a tiskne model. Tiskárna je v tomto ohledu samostatná a může provádět proces tisku bez lidské interakce, je však nutné dát pozor na několik možných zdrojů chyb. Zprv je nutné pro bezchybný tisk dobře zkalibrovat tiskovou podložku, aby došlo ke správnému uchycení první vrstvy, jelikož správné uchycení modelu je pro 3D tisk klíčovou záležitostí. Dále je vhodné správně naorientovat model ve sliceru pro minimalizaci využití podpěr a rizika nesprávného uchycení modelu. Pro tiskárny bez senzoru filamentu je také jedním ze zdrojů chyb spotřebování veškerého filamentu a tisk „naprázdno“. Tiskovým parametrům bude věnována samostatná kapitola.

Po dokončení procesu tisku mohou nastat dva případy. První možností je, že výsledný tisk splňuje veškeré požadavky. Proces tvorby modelu je tedy ukončen. Druhou možností je však nutnost postprocessingu, neboli dokončování. Dokončují se modely, kde je zapotřebí provést určité úpravy. Nejčastější dokončovací operací je odstranění podpěr. Toho lze docílit jejich odlomením či rozpuštěním ve vodě (při využití rozpustitelných podpěr jako PVA či BVOH). Dále je například možné, že i přes malé rozlišení jednotlivých vrstev (výška vrstvy se pohybuje maximálně v řádech desetin mm) nemusí kvalita výsledného povrchu vyhovovat. Jednou možností je jeho obroušení, avšak některé materiály, jako například ABS či PVB, lze vyhladit v acetonu. Mezi dokončovací operace patří taktéž například nabarvení či lepení více tištěných dílů k sobě. Postup výroby pomocí 3D tisku je viditelný na Obr. 4.



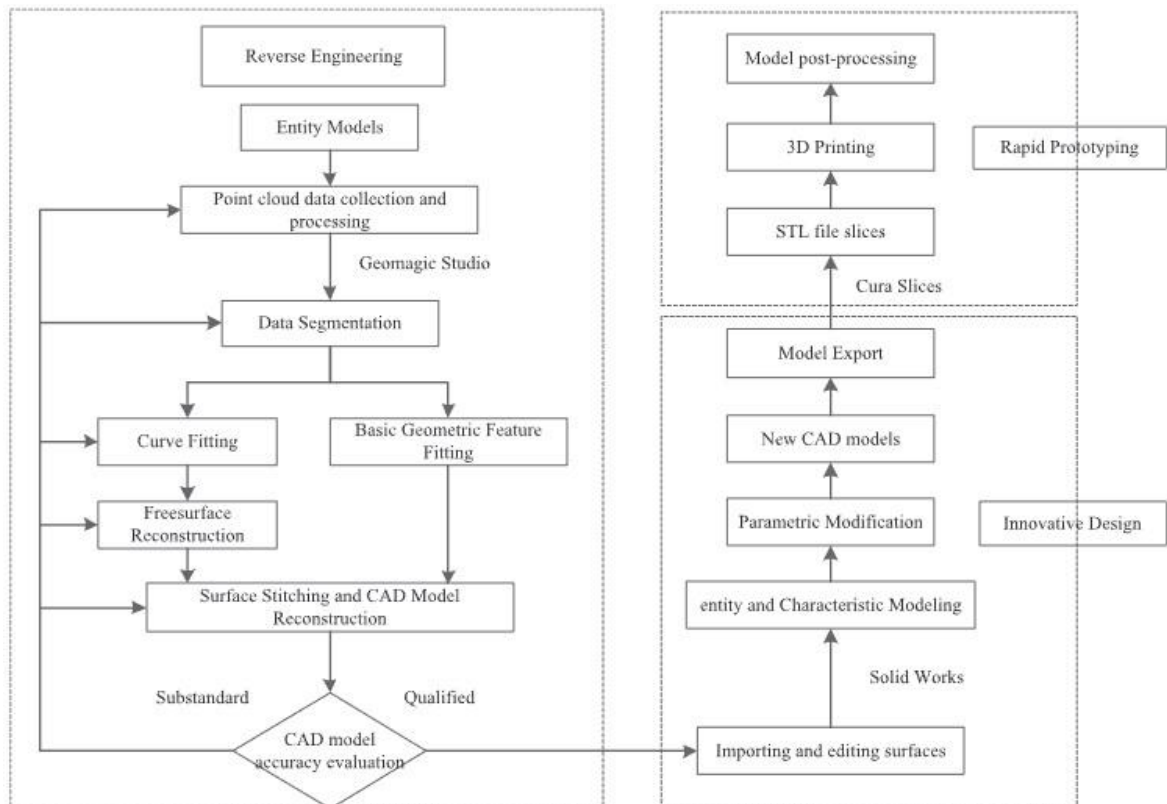
Obr. 4 Postup výroby pomocí 3D tisku [7]

Jakožto reverzní inženýrství je u 3D tisku označován postup výroby dílu, kde však není využit běžný postup a posloupnost výroby. Základem zde není představa či myšlenka, ale již hotový díl, který je potřeba například analyzovat z hlediska funkčnosti, replikovat, opravit či modifikovat. Z tohoto důvodu zde neplatí obecně zavedený postup uvedený v kapitole výše, ale postup téměř opačný, kdy se z fyzického modelu získá za pomoci skenování a následné úpravy dat CAD model, který se po dokončení a případné úpravě vytiskne a tím se získá jeho fyzická replika.

Základem pro reverzní inženýrství je fyzický model libovolné velikosti a tvaru. Tento model se následně naskenuje pomocí 3D skeneru. Takto vznikne velký datový model, který je nutné dále zpracovat. K tomuto účelu slouží specializované softwary, například program Geomagic Studio.

V prvním kroku odstraní program neúčinné body (šum), které se v určité míře vyskytují u každého skenování. Jejich množství se liší v závislosti na podmínkách a parametrech skenování. Dále dochází k úpravě mraku bodů. Podle původních rysů fyzického objektu jsou data rozdělena do různých oblastí a každá z nich může být přizpůsobena různým křivkám a povrchu. Poté jsou použity metody přechodu a průniku mezi plochami k jejich rekonstrukci, což znamená, že mohou být později propojeny v rámci celkového tvaru povrchu. V obecném případě se v polygonových datech, která jsou zapsána z bodových dat, nacházejí obvykle některé trojúhelníky složené z nadbytečných a chybných bodových dat. Z tohoto důvodu je nutné tyto trojúhelníky segmentovat, odstranit nebo upravit nadbytečné plochy a dokončit optimalizační proces a vyhlazení povrchu, například se zde využívá metoda NURBS.

Výstupem tohoto rekonstrukčního softwaru je CAD model. Ten se poté případně dle požadavků dále upravuje, například se zde doplňují některé elementy nebo se upravuje geometrie. Tento CAD model se dále zpracovává standardním způsobem neboli dojde k jeho převodu do vhodného formátu (např. STL), vylisování a tisku. Kompletní schéma reverzního inženýrství je viditelné na Obr. 5. [8]



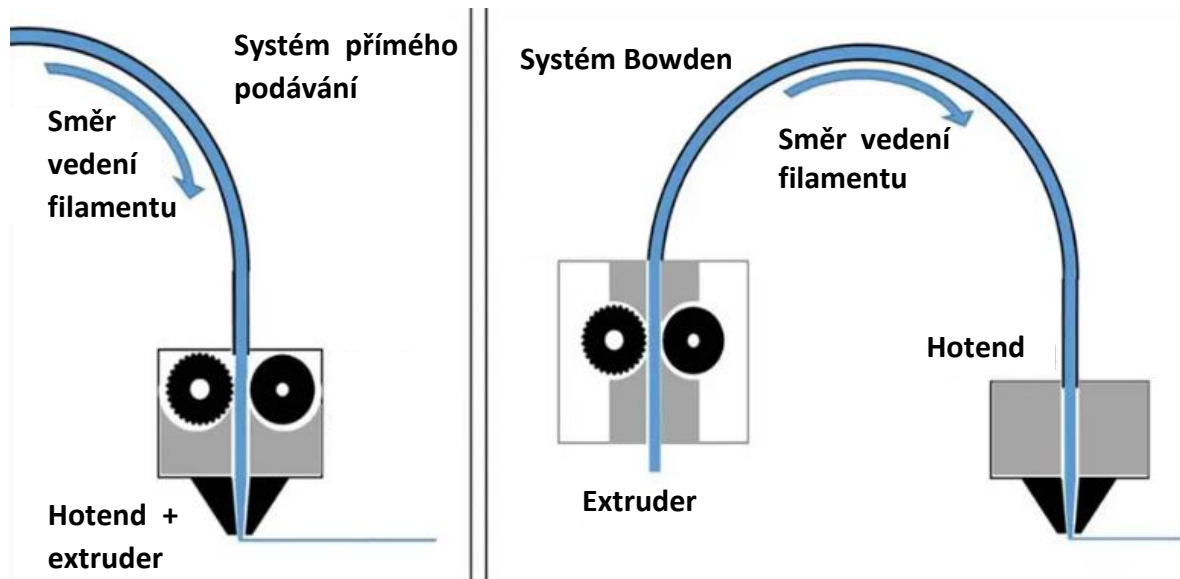
Obr. 5 Schéma reverzního inženýrství [8]

1.3 FDM 3D tisk

Jak již bylo zmíněno v předcházející kapitole, FDM (Fused Deposition Modeling) je v dnešní době světově nejpoužívanější a nejrozšířenější metodou 3D tisku. Jejím základním principem je nanášení nataveného materiálu tiskovou hlavou pomocí speciální konstrukce na tiskovou podložku vrstvu po vrstvě neboli „layer-by-layer“. Materiál je nejčastěji dodáván ve formě navinuté tiskové struny (tzv. filamentu) s určitým průměrem. V současnosti je standardem průměr filamentu 1,75 mm, avšak u některých tiskáren se stále využívá i dříve běžněji používaný průměr 2,85 mm. Filament nemusí být pouze ve formě struny, u průmyslových velkoformátových tiskáren s velkým objemem vytlačovaného materiálu se v některých případech využívají speciální hlavy pro granulát. [1]

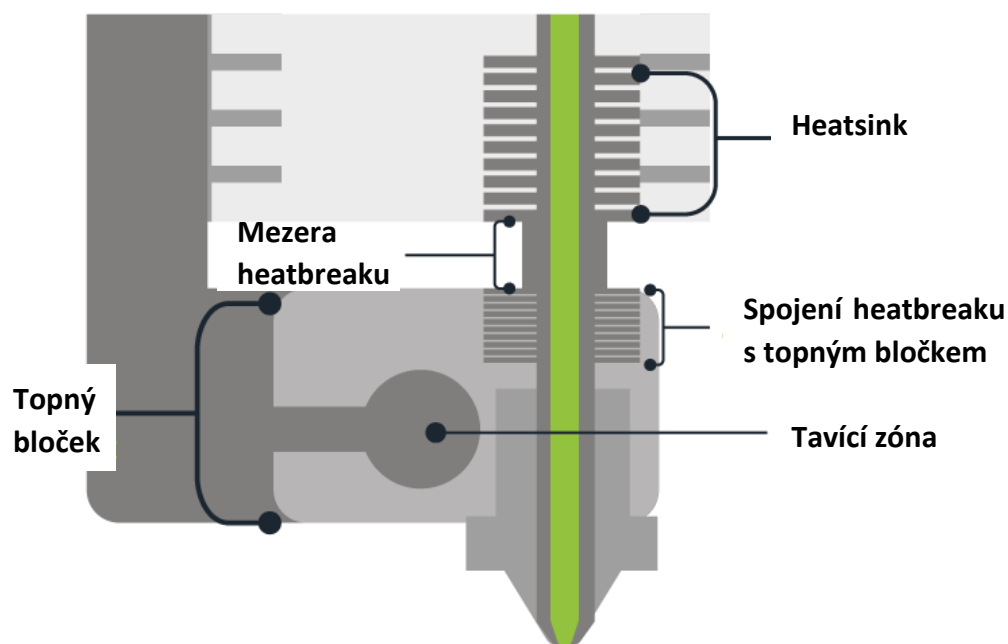
Tiskový materiál je následně zaváděn pomocí extruderu do tiskové hlavy. Extruder je sestava ozubených kol s podávacím mechanismem (tzv. idlerem), která je poháněna samostatným motorem. Existují 2 základní druhy extruderu, a to systém přímého podávání (Direct Drive) a systém Bowden (viz Obr. 6). Každý z těchto druhů má své výhody a nevýhody. Direct Drive extruder se nachází přímo na tiskové hlavě a těsně navazuje na sestavu hotendu. Toto řešení má bezpochyby výhodu v lepší kontrole procesu extruze materiálu, což umožňuje relativně bezproblémové použití i velmi specifických materiálů, jakými jsou například termoplastické polyuretany (TPU). Nevýhodou je však vyšší hmotnost tiskové hlavy.

Naopak systém Bowden má podávací mechanismus s motorem umístěn mimo tiskovou hlavu, nejčastěji na konstrukci tiskárny. Velká vzdálenost mezi hotendem a extruderem je „překlenuta“ teflonovou (PTFE) trubičkou, kterou je materiál veden. Výhodou je tedy beze sporu fakt, že tiskárna s tímto systémem má výrazně lehčí tiskovou hlavu, která umožní v základním stavu rychlejší a tišší tisk z důvodu menších vibrací. Nevýhodou je však nutnost větších retrakcí, delší čas odezvy materiálu z důvodu tření v PTFE trubičce a také problematictější tisk některých materiálů. [9,10]



Obr. 6 Porovnání přímého podávání (vlevo) a systému Bowden [10]

Podávací mechanismus dávkuje materiál do nejdůležitější části celé tiskárny, a to hotendu. Tato část slouží k natavení materiálu a jeho následnému nanesení na tiskovou podložku skrze trysku o určitém průměru. Hotend má 2 oddělené části, a to část studenou a horkou. Materiál nejdříve prochází studenou částí (heatsinkem), což je žebrovaný chladič, který má za úkol udržovat materiál v této části studený, aby nedocházelo k zacpání hotendu vlivem teplotní expanze nataveného materiálu z horké části. Heatsink je ve většině případů rovněž dochlazován externím ventilátorem. Přejechod mezi studenou a horkou částí tvoří díl zvaný heatbreak. Pod ním se nachází horká část s topným bločkem, poháněným topnou patronou a kontrolovanou termistorem. Zde dochází k natavení materiálu. Do topného bločku je zašroubována tryska, skrze kterou je materiál nanášen na tiskovou podložku. Schéma hotendu je viditelné na Obr. 7. [11]



Obr. 7 Průřez konstrukce hotendu s viditelným oddělením studené a horké části[11]

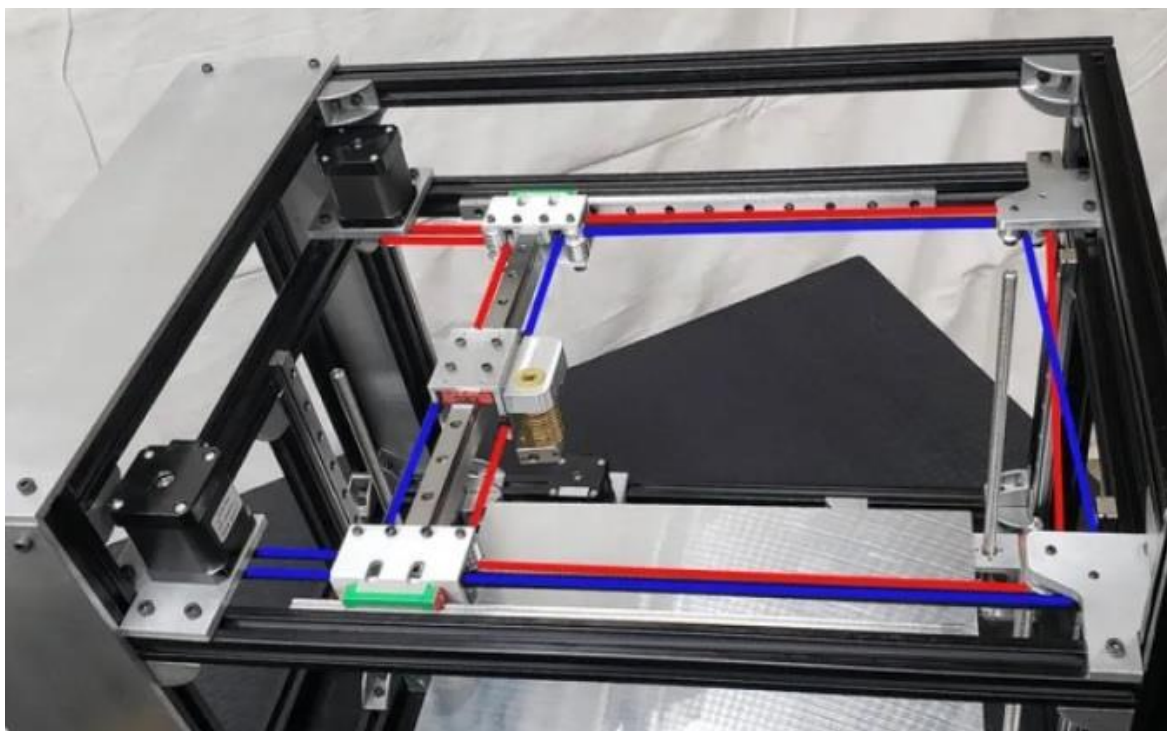
Po extruzi je materiál nanášen na tiskovou podložku. Tato podložka musí splnit některé podmínky pro bezproblémový tisk. Musí mít dobrou adhezi, aby došlo ke správnému uchycení materiálu. Dříve se hojně využívalo sklo, avšak momentálně jsou běžné ohybatelné polyetherimidové (PEI) pláty, které mají vynikající adhezi spojenou s bezproblémovým odstraněním výtisku z podložky po konci tisku. Taktéž standardem je v dnešní době zlepšení adheze vyhříváním tiskové podložky. Teplota vyhřevu se liší v závislosti na použitém materiálu, nejčastěji se pohybuje v rozmezí 60-100 °C. Pro některé materiály je vhodné použití vyhřívané uzavřené tepelné komory, která zlepší adhezi vlivem omezení smrštění materiálu, zlepší rovněž mechanické vlastnosti tištěného dílu a u některých materiálů je vhodná pro odstínění nepříjemného zápachu při tavení. Na tiskové hlavě je kromě chladiče heatsinku umístěn rovněž chladič výtisku, tzv. blower. Tento ventilátor má za úkol zchladit roztavený materiál ihned po vyextrudování z trysky, čímž umožní speciálně u větších převisů zachování správné geometrie a přesnosti výtisku bez propadlých vrstev a podobných chyb.

1.4 Konstrukce FDM tiskáren

3D tiskárna typu FDM může mít různé typy konstrukce. Tisková hlava si u všech typů konstrukce zachovává svou funkci. Primární rozdíl mezi jednotlivými typy tiskáren činí způsob pohybu tiskové hlavy. První a nejpoužívanější konstrukcí je tzv. kartézská tiskárna. Ta má tvar rámu se separátně pohyblivými osami X, Y a Z. Tisková hlava je umístěna na rameni, tzv. gantry, kde se pohybuje v ose X za pomoci řemenu a přidruženého motoru. Tato gantry se poté pohybuje v ose Z pomocí jedné nebo dvou závitových tyčí a motoru. Pohyb v ose Y je prováděn pohybem celé tiskové podložky taktéž za pomoci řemenu a krokového motoru. Výhodou tohoto typu řešení je jeho jednoduchost.

V současnosti je čím dál oblíbenější konstrukcí je CoreXY, která se řadí jako speciální druh kartézského typu. Pohyb v ose X a Y je zde vyřešen vzájemnou „kooperací“ dvou motorů, které pracují synchronně. Pohyb je převáděn za pomoci řemenů. Pohyb osy Z je oddělen, nejčastěji je realizován za pomoci 3 nebo 4 závitových tyčí. Výhodou této konstrukce je vzhledem ke své tuhosti schopnost dosahovat extrémních rychlostí a přesnosti. Příklad tohoto řešení je viditelný na Obr. 8.

Dalšími, avšak relativně málo používanými typy konstrukce jsou Delta, Scara a Polar. Delta tiskárny rovněž využívají kartézské souřadnice, avšak s tím rozdílem, že pohyb ve všech třech osách (X,Y i Z) je vždy výsledkem pohybu 3 pohyblivých ramen. Podložka je zde nepohyblivá a má tvar kruhu. SCARA tiskárny využívají pohyb robotického ramene. Tento typ tiskárny je vzhledem ke své konstrukci značně složitý a téměř se nepoužívá. Tiskárna typu Polar má tiskovou hlavu posazenou na rameni, které zajišťuje pohyb v ose X, kdy toto rameno je usazené na ose Z a tisková podložka se otáčí. Tato konstrukce je poměrně jednoduchá, avšak příprava tisku je zde velmi složitá, a proto se tento typ konstrukce taktéž téměř nepoužívá. [12,13]



Obr. 8 Příklad podomácku vyrobené CoreXY konstrukce [14]

1.5 Tiskové parametry

3D tisk je komplexní technologií výroby, kde je možné nastavit celou řadu tiskových parametrů, které ve výsledku výrazně ovlivňují výsledek tisku z hlediska času, mechanických vlastností i kvality.

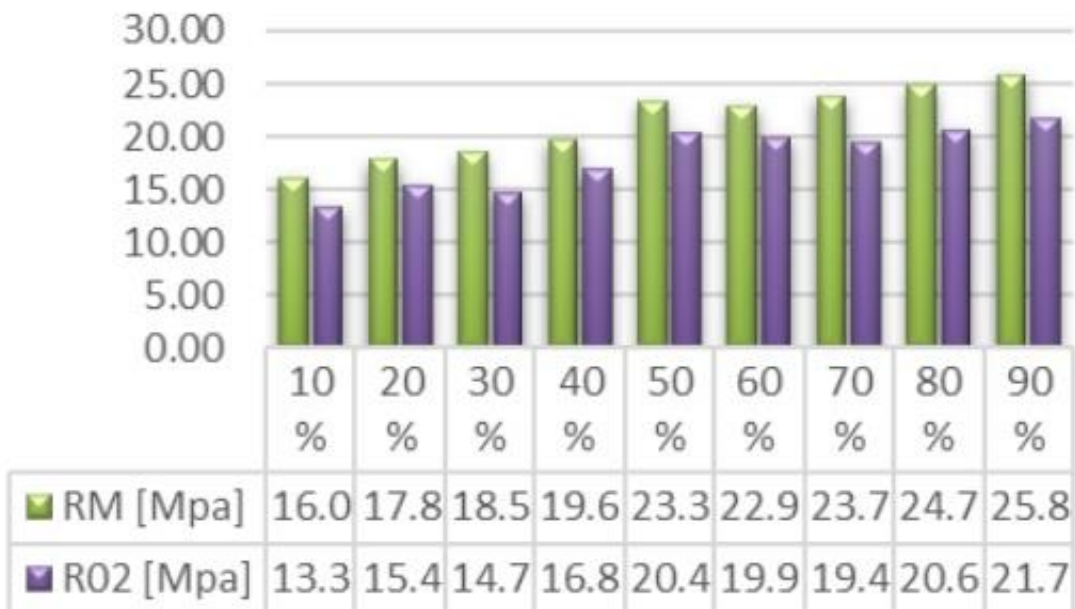
1.5.1 Výška vrstvy

Mezi nejdůležitější parametry patří výška vrstvy. Výška vrstvy (layer height nebo také layer thickness) má rozhodující vliv na všechny 3 výše zmíněné parametry. Výška vrstvy se volí dle průměru trysky s tím, že rozsah leží mezi 25-75 % jejího průměru. Výška vrstvy určuje rozlišení výtisku v ose Z a jelikož základním principem 3D tisku je nanášení vrstvy po vrstvě, tak výška vrstvy zásadně určuje rovněž čas tisku. Z hlediska mechanických vlastností však dle výsledků některých zkoumání platí, že s rostoucí výškou vrstvy klesá pevnost v tahu i pevnost v ohybu. Lužanin et al [15] zjistili, že v závislosti na výšce vrstvy (rozmezí 0,1-0,3 mm) klesla u materiálu PLA pevnost v ohybu více než třikrát. Torres et al [16] zjistili, že různé výšky vrstev mají různý vliv na smykové vlastnosti PLA materiálu. Konkrétně bylo zjištěno, že menší výška vrstvy vede k vyšší smykové pevnosti. To je způsobeno tím, že menší výška vrstvy umožňuje větší množství vazeb mezi jednotlivými vrstvami a tím zvyšuje pevnost materiálu. Výzkum tedy naznačuje, že při optimalizaci mechanických vlastností PLA

pomocí FDM 3D tisku v různých směrech, by mohlo být užitečné zvážit použití menší výšky vrstvy pro dosažení lepší smykové pevnosti. Naopak Tura et al [17] ve svém zkoumání zjistili, že u materiálu ABS se při použití větší výšky vrstvy pevnost v tahu zvyšuje. [15,16,17]

1.5.2 Hustota výplně

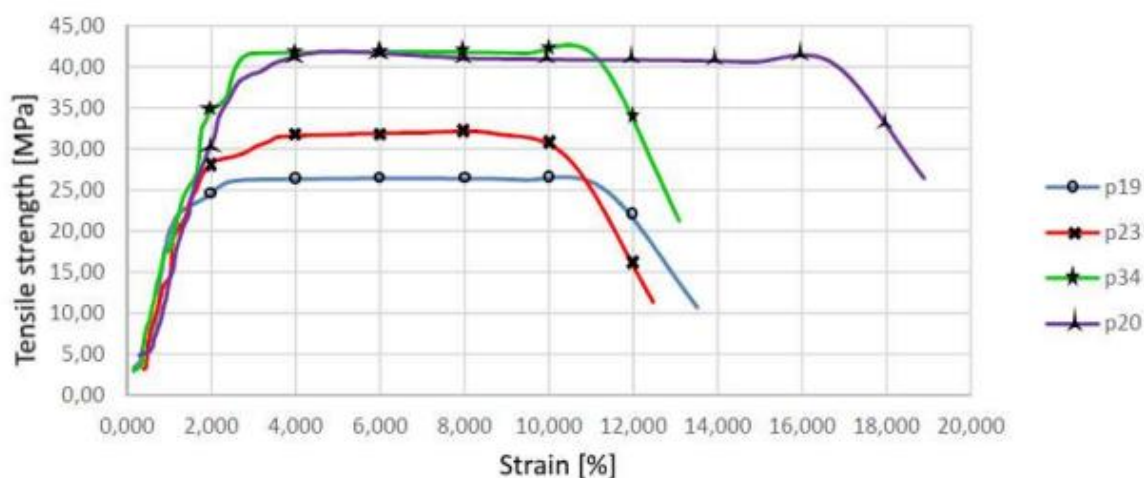
Hustota výplně je procentuální hodnota značící množství vyplnění vnitřní struktury výtisku. Touto hodnotou lze snadno upravovat čas tisku i množství použitého materiálu bez významného vlivu na kvalitu a vzhled výtisku, avšak je nutné počítat s výraznou změnou mechanických vlastností. Pandzic et al [18] zjistili, že druh výplně má výrazný vliv na mez pevnosti v tahu. Rovněž zjistili téměř lineární nárůst pevnosti v tahu u hustoty výplní mezi 10-90 % u většiny druhů výplně s tím, že například u kubické výplně narostla mez pevnosti v tahu o 63 %. Rovněž zjistili, že rozdíl v pevnosti v tahu mezi 90% a 100% výplní činí přibližně 40 % (viz Obr. 9). Abeykoon et al [19] zjistili, že u materiálu PLA dosahují nejvyššího modulu pružnosti v tahu vzorky se 100% výplní s tím, že dochází k neustálému nárůstu mezi 25-100 %. Procentuální nárůst modulu pružnosti mezi nejřidší a nejhustší výplní činil přes 78 %. [18,19]



Obr. 9 Vliv hustoty výplně na mez pevnosti v tahu materiálu PLA (Pandzic et al) [18]

1.5.3 Počet perimetrů

Perimetry jsou obvodové linie výtisku, které kopírují vnější povrch a vytvářejí tak vnější siluetu. Vyšší počet perimetrů sice prodlužuje dobu tisku, avšak má výrazný vliv na mechanické vlastnosti dílu. Milsimer [12] ve své práci zkoumal, zdali má na mechanické vlastnosti větší vliv vyšší počet perimetrů anebo vyšší procento výplně. Zjistil, že s konstantním procentem výplně 15 % a 100 % a rostoucím počtem perimetrů roste pevnost v tahu téměř lineárně, procentuální nárůst mezi 2 a 12 perimetry činil u 15% výplně přes 100 % a u 100% výplně 12 %. Došel tedy k závěru, že perimetry mají z hlediska výsledné pevnosti výrazný vliv. Ćwikła et al [20] ve svém zkoumání zjišťovali vliv počtu perimetrů, ale také procenta výplně či multiplikátoru extruze na mez pevnosti materiálu PLA. Z výsledků viditelných na Obr. 10 je patrné, a autor to mimo jiné doporučuje, že při požadavku na maximalizaci meze pevnosti v tahu je vhodné použít větší počet perimetrů. Z článku taktéž vyplývá zajímavý fakt, a to ten, že opět z hlediska mechanických vlastností je optimální udržovat hodnotu multiplikátoru extruze (podílu průtoku materiálu) v rozmezí 0,9-1,1. [12,20]



Obr. 10 Vliv počtu perimetrů (dle pořadí 1,2,4,7) na mez pevnosti v tahu materiálu PLA [20]

1.5.4 Tisková teplota

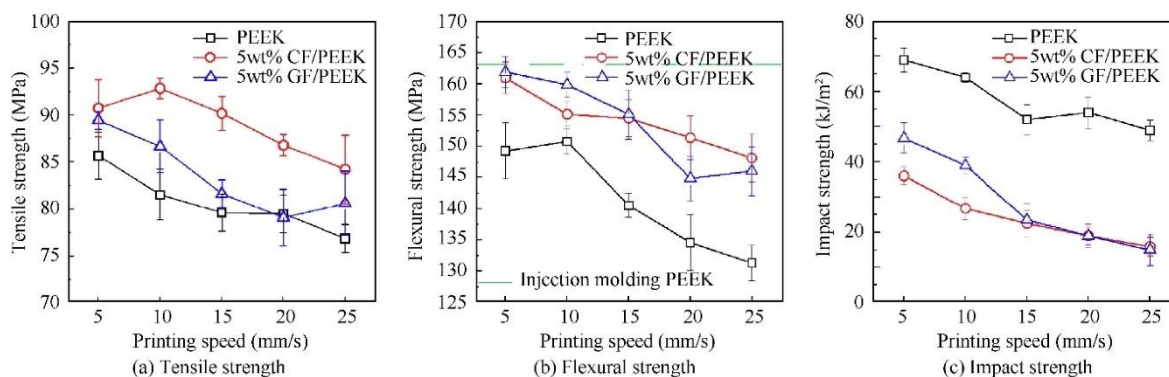
Teplota hotendu (někdy také uvedeno jako teplota trysky) je teplota, při které je materiál během tisku taven. Tento parametr je zásadní pro kvalitu extruze a tím i kvalitu samotného výtisku. Pokud je teplota příliš nízká, nedojde k natavení materiálu, což je problematické pro jeho průchod tryskou a dojde tak k ucpání celé hlavy. Pokud je naopak teplota příliš vysoká, materiál se bude v hotendu připékat a lepit, rovněž je náchylnější

k zacpání hotendu vlivem teplotní expanze. Proto je vhodné nastavit teplotu tisku dle rozmezí uváděného výrobcem filamentu. Tato teplota se samozřejmě liší dle užitého materiálu. Yu et al [21] zkoumali vliv teploty tisku na kompozitní filament PLA/ROA. Zjistili, že s rostoucí teplotou tisku roste pevnost v tahu i ohybu. Procentuální nárůst u pevnosti v tahu činil mezi teplotami 200 °C a 220 °C 35,3 %, u pevnosti v ohybu pak činil 23,7 %. Guessasma et al [22] zkoumali vliv teploty tisku na chemickou strukturu a mechanické vlastnosti nylonu. Zjistili, že s vyšší teplotou (vlivem použitého stroje bylo možné otestovat pouze 2 teploty, jelikož vyšší teploty nebyly momentálně možné a u nižších docházelo k chybám při tisku) roste pevnost v tahu. [21,22]

1.5.5 Rychlost tisku

Rychlost tisku značí rychlost pohybu tiskové hlavy během tisku. Tato rychlost není ve většině případů konstantní, liší se dle typu linie (výplň, perimetr, most apod.). Miazio [23] zkoumal vliv rychlosti tisku na maximální zatěžující sílu u materiálu PLA. Rozmezí rychlostí činilo 20-100 mm/s. Ve výsledcích uvedl vliv úspory času při užití vyšší rychlosti tisku. Zjistil, že s rostoucí rychlostí tisku klesá maximální zatěžující síla při zkoušce tahem, a tedy i pevnost v tahu při užití stejného průměru vzorku. Klesající charakter však není lineární, největší pokles byl zaznamenán mezi 20-50 mm/s, poté byl pokles pozvolnější, mezi 50-60 mm/s byl dokonce zaznamenán drobný nárůst. Celkový pokles mezi 20 mm/s a 100 mm/s činil pak 54,17 %. Rozdíl v čase tisku pěti vzorků však činil 114,29 %. Autor tedy doporučuje, že z hlediska maximalizace mechanických vlastností by se měla rychlost tisku pohybovat v rozmezí 20-60 mm/s.

Wang et al [24] naproti tomu zkoumali vliv rychlosti tisku na pevnost v tahu a ohybu v opačném spektru materiálů, a to u extrémně odolného polyetheretherketonu (PEEK) a kompozitů PEEK-CF a PEEK-GF. Zjistili, že u všech materiálů klesla pevnost v tahu v rozmezí rychlostí tisku 5-25 mm/s, a to o 10, 8 a 10 % a pevnost v ohybu o 11, 8 a 9 %. Křivky, viditelné na Obr. 11, však nemají pouze klesající charakter, u materiálu PEEK-GF došlo mezi 20-25 mm/s k nárůstu meze pevnost v tahu i ohybu. Taktéž byl zaznamenán nárůst meze pevnosti v tahu u materiálu PEEK-CF v rozmezí 5-10 mm/s. [23,24]

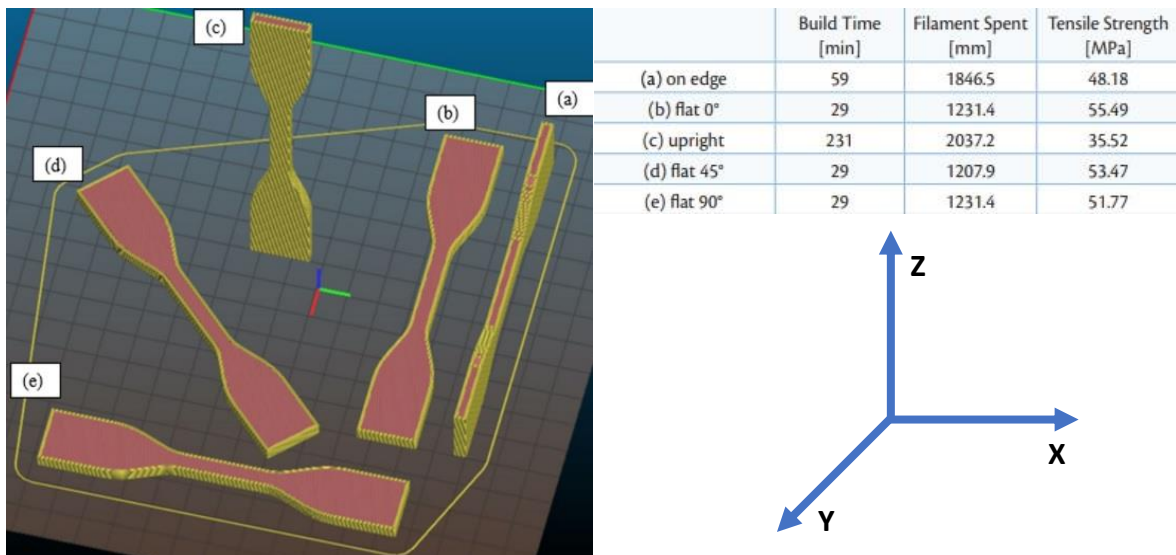


Obr. 11 Vliv tiskové rychlosti na mez pevnosti v tahu, ohybu a rázovou houževnatosti u materiálu PEEK [24]

1.5.6 Tisková orientace

Pro spoustu uživatelů je tento fakt málo známý, jelikož si jej během užívání 3D tiskárny neuvědomují, ale i orientace výtisku na podložce má zásadní vliv na mechanické vlastnosti dílu. Nejedná se pouze o to, aby výtisk nebyl z hlediska zatížení orientován kolmo na pokládané vrstvy, ale také o různé natočení tiskové podložky a různé naklápění. Eryildiz [25] se ve své práci na tuto problematiku zaměřil. Zjistil, že u materiálu PLA je bezesporu nejhorší orientací z hlediska pevnosti v tahu orientace na výšku, která disponuje o více než 57 % nižší pevností. U ostatních orientací (3 různé orientace „na ležato“ XY a orientace „na bok“ YZ) zjistil, že rozdíly mezi nimi již nejsou tak výrazné, avšak lze konstatovat, že nejvýhodnější orientace je orientace „na ležato“ (XY) s tím, že zde je poté nejvýhodnější orientace ve směru osy Y (0°). Rozdíl mezi orientací XY 0° a orientací YZ činí z hlediska pevnosti v tahu necelých 15 %. Schéma orientací a výsledky měření jsou viditelné na Obr. 12.

Narasamman et al [26] naopak zkoumali vliv naklopení vzorku na mechanické vlastnosti rovněž u materiálu PLA. Jejich zkoumání spočívalo v porovnání 5 různých naklopení (0, 30, 45, 60, 90 °) z hlediska meze pevnosti v tahu. Zjistili, že nejvyšších hodnot pevnosti v tahu dosáhly vzorky tištěné „na ležato“ (0 °), následované orientacemi 30 ° a 60 °. Z výsledků vyplývá, že orientace v úhlu 45 °, což je u většiny tiskáren limitním úhlem pro použití podpěr, je z hlediska pevnosti nejméně vhodná, jelikož dosahuje nejnižší pevnosti, dokonce nižší než orientace „na výšku“ (90 °). Rozdíl mezi nejvyšší a nejnižší pevností v tahu činil celých 103,5 %. [25,26]



Obr. 12 Vliv orientace 3D tisku na mez pevnosti v tahu materiálu PLA [25]

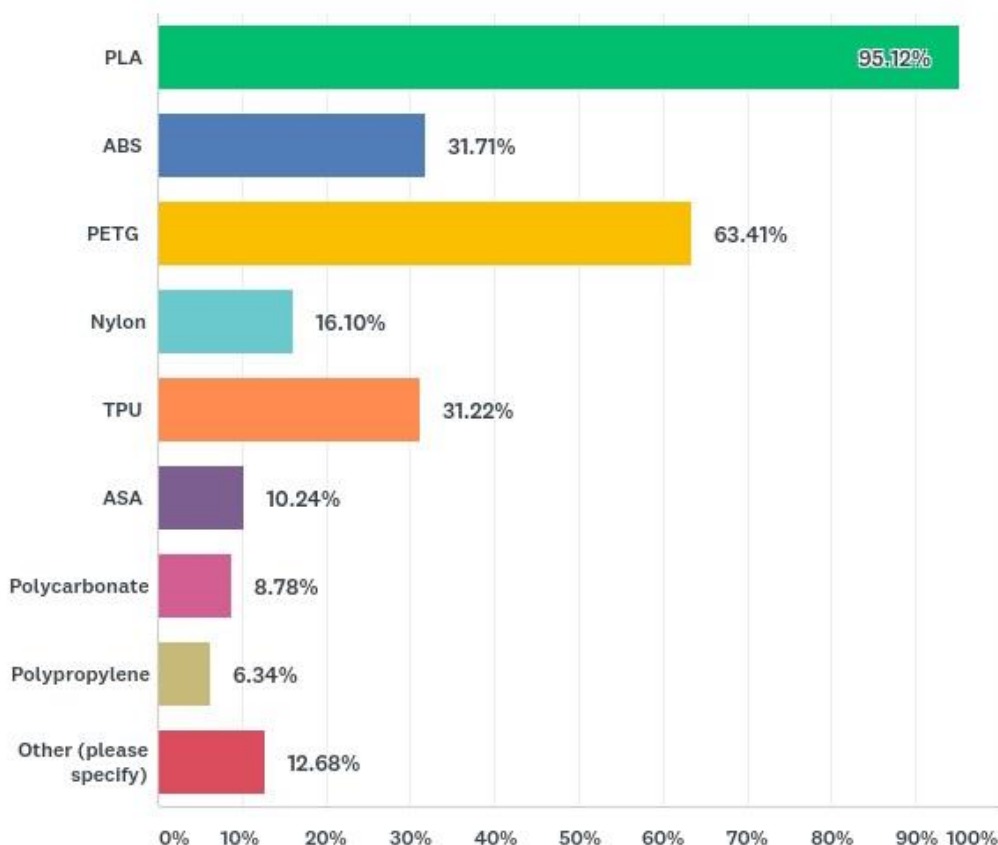
1.5.7 Chlazení

Kvalitní chlazení je základem spolehlivého 3D tisku, avšak tento parametr má kromě kvality výsledného tisku vliv taktéž na rozměrové a mechanické vlastnosti dílu. Lee a Liu [27] zkoumali vliv různých rychlostí proudu vzduchu (0-5 mm/s) na rozměrové a mechanické vlastnosti vzorků z materiálu PLA tištěných ve 2 různých tiskových orientacích. Jednalo se o orientace YZ („na bok“) a XZ („na výšku“). Zjistili, že z hlediska rozměrové přesnosti má intenzita chlazení minimální vliv na vzorky tištěné v orientaci YZ, avšak výrazný vliv na vzorky tištěné v orientaci XZ. V této orientaci rostla s intenzitou chlazení taktéž rozměrová přesnost. Z hlediska mechanických vlastností, v případě tohoto zkoumání konkrétně meze pevnosti v tahu, je výsledek opačný. S narůstající intenzitou chlazení mez pevnosti v tahu klesala. U vzorků v orientaci XZ však s narůstající intenzitou chlazení klesala mez pevnosti rychleji než u orientace YZ a u nejvyšší rychlosti došlo dokonce k mírnému nárůstu. Z následného zkoumání rentgenem autoři zjistili, že u nejvyšší intenzity chlazení došlo k částečnému zvýšení krystalinity, tento efekt však bude potřeba podrobit hlubšímu výzkumu. Autoři taktéž zjistili, že pevnost v tahu u zvyšující se intenzity chlazení klesala z důvodu vzniku malých pórů, jelikož se materiál nestihl správně spojit. [27]

2 Tiskové materiály

V odvětví FDM 3D tisku existuje celá škála použitelných materiálů. Jak již bylo zmíněno, tiskový materiál je nejčastěji ve formě filamentu neboli struny o určitém průměru, která je navinutá na cívku. Pro výběr vhodného filamentu existuje řada kritérií, mezi něž patří například požadavky na mechanickou, teplotní či chemickou odolnost, kvalitu výsledného tisku, schopnost dané 3D tiskárny daný materiál vytisknout a v neposlední řadě také na ceně.

Studie společnosti Fillamentive z roku 2021 [28] uvádí, že nejrozšířenějším materiálem pro FDM 3D tisk je kyselina polymléčná (PLA), který využívá přes 95 % uživatelů. Z Obr. 13 je taktéž patrné, že mezi nejpoužívanější materiály patří taktéž polyethyltereftalát glykol (PETG), akrylonitrilbutadienstyren (ABS), termoplastický polyuretan (TPU) a polyamid (PA). Tato kapitola některé z těchto materiálů detailněji popíše a představí jejich vlastnosti. [28]



Obr. 13 Studie Fillamentive ohledně zjištění nejpoužívanějších materiálů pro FDM 3D tisk [28]

2.1 PLA

PLA neboli kyselina polyléčná je biopolymerní materiál, který je v dnešní době světově nejrozšířenějším materiálem svého druhu. Jeho základem je kyselina mléčná. Tato kyselina je produkována v lidském těle, je ji možné taktéž získat chemickou cestou například z ethanolu nebo acetyleny, avšak v dnešní době se nejčastěji získává bakteriální fermentací jednoduchých cukrů za pomoci bakterií rodu *Lactobacillus*. Po fermentaci se kyselina mléčná izoluje a očistí se od nečistot a dalších vedlejších produktů. Následně je kyselina mléčná podrobena polymeraci za vysoké teploty, kde dochází ke spojení jednotlivých řetězců a tvorbě dlouhých molekul PLA. Výstupním produktem je nejčastěji granulát, ze kterého se následně za pomoci speciální linky vyrobí filament. [29]

Vlastnosti materiálu PLA závisí na molekulární hmotnosti a stereoizometrii. V závislosti na takticitě (uspořádání) a podmínkách zpracování či tisku může být PLA amorfni i semikrystalickým polymerem. PLA se v praxi využívá primárně z důvodů jednoduchosti a kvality tisku, příznivé ceny a dobré tvrdosti a pevnosti. Pro konstrukční a průmyslové využití je však v některých případech tento materiál nevhodný z důvodu horší teplotní odolnosti a také nízké houževnatosti. [30]

2.2 PETG

PETG, neboli polyethyltereftalát glykol, je termoplastický polymer běžně využívaný ve 3D tisku. Jak již název napovídá, vznikl modifikací známého a rozšířeného materiálu PET (polyethyltereftalát), který se získává za pomoci ethylenglykolu a kyseliny tereftalové. Tento materiál má totiž přes své masové rozšíření nevýhodu v krystalizaci za vyšších teplot, což způsobí ztrátu průhlednosti a zkřehnutí. U PETG je ethylenglykol nahrazen větším monomerem, který omezil krystalizaci a zvýšil tedy teplotní odolnost a zároveň snížil teplotu tání. [31,32]

PETG je oblíbeným materiálem, především z důvodu jeho vlastností, kdy kombinuje vysokou pevnost, houževnatost, vrubovou houževnatost a chemickou odolnost s příznivými pořizovacími náklady a relativní jednoduchostí tisku.

2.3 ABS

Akrylonitrilbutadienstyren neboli zkráceně ABS, je jeden ze světově nejrozšířenějších polymerních materiálů. Je vyráběn polymerací styrenu a akrylonitrilu za přítomnosti butadienu. Tímto procesem vzniká dlouhý řetězec butadienu, který se kříží s kratšími řetězci styren-akrylonitrilu, čímž vznikají pevné vazby. [33]

Materiál ABS je stále relativně běžně používaným materiálem v FDM 3D tisku, i když v posledních letech jeho obliba spíše slábne. Je totiž toxický, při tisku zapáchá, je velmi smrštelnivý a nemá příliš vysokou pevnost. Na druhou stranu však nabízí dobrou teplotní odolnost, rázovou houževnatost (i za nízkých teplot) a dobrou odolnost proti otěru. [34]

2.4 PC

Polykarbonát (PC) je technický odolný amorfni polymer. Vyrábí se za pomoci polymerace monomerů bisfenolu A, kde dochází ke spojování monomerů do dlouhých řetězců polymeru, který se následně rozemele na granulát, který je vstupní surovinou pro výrobu filamentu. Ten však může obsahovat různá další aditiva či plniva, například barviva. [35]

Polykarbonát je již poměrně náročný materiál na tisk, je nutné jej tisknout v alespoň pasivně vyhřívané komoře za vysokých teplot trysky i tiskové podložky, jelikož má značnou tendenci se smršťovat. Při dodržení podmínek tisku je to však materiál, který nabídne vysokou pevnost, vrubovou houževnatost, rozměrovou přesnost a teplotní odolnost. Jedná se o materiál, který by měl být určen pro náročnější aplikace než materiály PETG nebo ABS. [36]

2.5 PA

Polyamidy (PA, taktéž někdy hovorově uváděno jako nylon) je skupina syntetických polymerů, objevených ve 30. letech 20. století. Jedná se o běžně využívaný průmyslový materiál. Existuje několik typů polyamidů, v oblasti FDM 3D tisku se však nejčastěji využívají druhy PA6 a PA12. PA 6 se vyrábí pouze z jednoho typu monomeru známého jako kaprolaktam. Je syntetizován při vysoké teplotě polymerizací kaprolaktamu. PA 12 se

rovněž vyrábí polymerací, avšak použitým monomerem je v tomto případě laurilaktam. [37]

Polyamid jako materiál vyniká svou pevností, vysokou teplotní odolností (v některých případech i přes 150 °C) a otěruvzdorností. Taktéž se jedná o vhodný materiál pro použití plniv, jakými mohou mít například uhlíková nebo skleněná vlákna. Největší nevýhodou nylonu je však jeho vysoká navlhavost. Míra navlhavosti se u jednotlivých typů nylonu liší, například PA6 je výrazně navlhavější než PA12, a to z důvodu vyšší koncentrace amidových skupin, které vytvářejí vazby s molekulami vody. [38,39]

2.6 TPU

TPU neboli termoplastický polyuretan je elastický materiál, který je čím dál oblíbenější rovněž v oblasti 3D tisku. Výroba TPU začíná reakcí diisokyanátu s polyolem, což vede k vytvoření prepolymerního TPU. Prepolymer pak reaguje s řetězovým prodlužovačem, jako je například diol nebo diamin, což má za následek vytvoření finálního TPU polymeru. Ve výsledku se jedná o blokový kopolymer složený z měkkých a tvrdých segmentů, kdy měkký segment dodává materiálu pružnost a tvrdý segment houževnatost. [40]

V praxi se TPU filamenty dělí primárně podle tvrdosti, kterou je možné ovlivnit rozdílnou kopolymerací, a tedy úpravou poměru tvrdých a měkkých segmentů. Materiál TPU je odolný proti otěru, nárazům a mnoha chemikáliím. Je univerzální a pro svou flexibilitu se využívá v mnoha různých odvětvích. Není však vzhledem ke své povaze vhodný pro aplikace, kde je nutná vysoká pevnost. [41]

3 Certifikace a nahrazování dílů

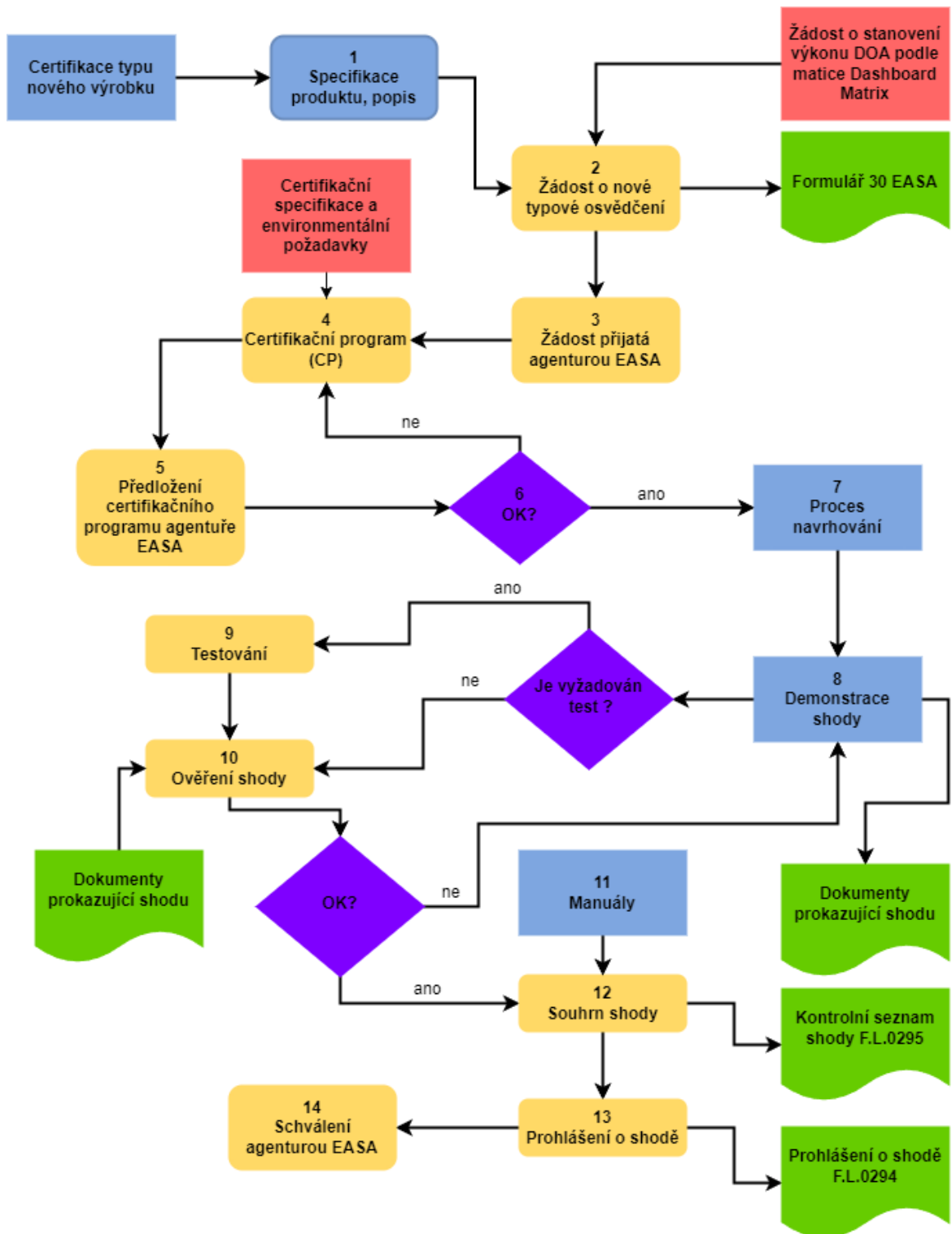
Proces certifikace nového materiálu pro použití v letectví je složitý a může v některých případech trvat i několik let. V Evropě se o certifikace a obecně bezpečnost v civilním letectví stará Evropská agentura pro letectví (EASA), a proto má pevně stanovené požadavky a normy, které musí materiál splňovat.

Certifikační proces začíná přípravou návrhu a aplikace, která popisuje materiál a jeho použití. Tato aplikace by měla obsahovat detailní technické informace, včetně výrobních procesů, specifikací materiálu, plánovaných testů a dalších relevantních informací. EASA jako autorita pak provede pečlivou revizi aplikace a výrobního procesu. To může zahrnovat návštěvy výrobních zařízení, audit dokumentace a další inspekce.

EASA je rovněž součástí dohody o bezpečnosti civilního letectví (nazývané také „BASA“) společně s obdobnými agenturami z Brazílie, Kanady, Číny, Japonska a Spojených států. Obecným cílem této dohody je formalizovat spolupráci v určitých oblastech bezpečnosti letectví. Dohoda BASA stanoví povinnosti a metody spolupráce mezi úřady, aby se zabránilo zbytečnému dvojímu vývoji a aby se usnadnila certifikace leteckých výrobků úřady pro civilní letectví. Dohoda BASA tedy podporuje obchod s letadly a souvisejícími výrobky a zároveň zajišťuje nejvyšší úroveň letecké bezpečnosti. Pokud tedy dojde k certifikaci nového materiálu v jedné z uvedených zemí, například dle autority Federální letecké správy (FAA) v USA, může tato certifikace automaticky přejít do platnosti i v dalších oblastech pod dohodou BASA. V případě výhrad může autorita doplnit další požadavky a testy pro její zahrnutí ve své oblasti.

Pokud je aplikace schválena, materiál musí projít řadou testů. Tyto testy jsou navrženy tak, aby ověřily, že materiál splňuje všechny požadavky EASA na bezpečnost a „výkonnost“, ale také na konzistentnost při výrobě i aplikaci a environmentální šetrnost. Tyto požadavky mohou zahrnovat mechanické testy, testy odolnosti vůči ohni, testy únavy a další. [42]

Pokud materiál úspěšně projde všemi testy a inspekcemi, EASA vydá certifikát, který potvrzuje, že materiál je schválen pro použití v letectví. Tento certifikát je obvykle platný po určitou dobu a může být podmíněn pravidelnými revizemi a inspekcemi. Schéma certifikačního postupu je viditelné na Obr. 14.



Obr. 14 Schéma certifikačního postupu EASA [42]

V případě certifikace nového materiálu pro letecký simulátor je situace odlišná. Podobně jako u certifikace nového materiálu v letadle, proces začíná přípravou návrhu. Tento návrh by měl obsahovat technické informace o simulátoru, včetně použitých materiálů, hardwaru a softwaru, a také o konkrétním modelu letadla, který simulátor reprezentuje. EASA pak provede revizi aplikace a inspekci simulátoru. To může zahrnovat testování softwaru a hardwaru, ověření, že simulátor přesně reprezentuje daný typ letadla, a kontrolu, zda simulátor splňuje všechny požadavky na bezpečnost. Pokud je aplikace schválena a simulátor úspěšně prošel všemi testy a inspekce, EASA vydá certifikát, který potvrzuje, že simulátor je schválen pro použití v pilotním výcviku.

Hlavním rozdílem mezi certifikací materiálu pro letadla a certifikací leteckého simulátoru je, že v případě simulátoru je důraz kladen na přesnou reprezentaci konkrétního modelu letadla a na schopnost simulátoru replikovat různé letové podmínky a situace. Materiály použité v simulátoru také musí splňovat určité normy, ale nejsou vystaveny stejným nárokům jako materiály použité v letadlech. Uživatel tak může akceptovat určité riziko, že pro ušetření zvolí méně odolný materiál, který sice splňuje požadavky z hlediska přesnosti reprezentace, avšak může dojít k jeho porušení a bude jej tedy potřeba pravidelněji obměňovat.

3D tisk je stále poměrně novou technologií, a tak i jeho použití v letectví je dosud „v plenkách“. Někteří výrobci už však 3D tisk pro přímou aplikaci v letectví využívají. Například Boeing využívá ve svém letounu 787 Dreamliner konstrukční titanové díly vyráběné společností Norsk Titanium pomocí patentované technologie Rapid Plasma Deposition (RPD) (viz Obr. 15). Tyto díly jsou certifikované agenturou FAA. Airbus poté ve svém modelu A350 XWB využívá hned několik 3D tištěných dílů. Některé nestrukturální komponenty jsou dodávány společností Stratasys z materiálu ULTEM 9085. Na letadle se rovněž vyskytuje tištěný díl samotné konstrukce, a to část pylonu mezi křídlem a motorem. Tento díl je tištěný z titanu. [43,44,45]



Obr. 15 Titanový díl letounu Boeing 787 vyráběný pomocí technologie RPD [46]

EASA je v tomto směru poněkud konzervativnější a k certifikaci 3D tištěných dílů přistupuje jen zřídka. Bylo vydáno memorandum CMS-S-008 o větším zahrnutí dílů vyhotovených pomocí aditivní výroby. Je zde specifikováno, že u takto vyrobených dílů by měl probíhat přísný dohled nejen nad vlastnostmi samotných vyrobených dílů, ale také nad jejich opakovatelností nebo postupem a konzistencí výroby samotného filamentu. Certifikuje se rovněž samotné pracoviště, tudíž může být daný díl vyráběn pouze na certifikované tiskárně. Také by se měly brát v potaz důsledky například využití podpěr anebo důsledky volby určité tiskové orientace. Jedním z příkladů certifikace jsou malé tištěné krytky u sedaček pro cestující, jejichž aplikaci umožnila EASA společnosti Etihad v roce 2019 (viz Obr. 16). [47,48]



Obr. 16 3D tištěné krytky v letadle společnosti Etihad [48]

Problémem pro certifikaci je také fakt, že pro 3D tištěné díly stále neexistují specializované certifikační základny a normy, tudíž je jejich zahrnutí problematické. EASA například v memorandu CMS-S-008 vychází z nápadu asociace Aerospace Industries Association (AIA), která vydala návrh doporučení pro certifikaci aditivně vyrobených komponent. Certifikace dílů pro účely použití v letectví rovněž probíhá pomocí normy AS/EN 9100. Tato norma se zabývá řízením kvality v letectví. [49,50]

3D tištěné díly se v letadlech příliš nevyskytují rovněž z důvodu, že pro nahrazení materiálu novým typem či novou technologií musí být nový materiál svými vlastnostmi minimálně stejně dobrý, ne-li lepší než stávající materiál. Civilní letectví tak maximálně upřednostňuje bezpečnost na úkor nákladů, a to i přes to, že 3D tištěný díl například s rezervou splňuje bezpečnostní požadavky na danou aplikaci.

V leteckém simulátoru je aplikace plastového 3D tisku již běžnou praxí. Umožní totiž snadno zahrnout různé úpravy či doplnění. Jedná se také o značnou úsporu nákladů na provoz a konstrukci simulátoru. Nahrazují se tak často díly, které nejsou tak často využívané anebo u nich není potřeba dodržet určité specifické podmínky, které ovlivní věrnost reprezentace. Příkladem ovlivnění věrnosti reprezentace by byl například tisk řídicí páky, která by se tak pocitově výrazně lišila od té originální. Typickou aplikací FDM 3D tisku v simulátoru jsou tak různé krytky, páčky či celé kusy modelu kabiny.

4 Analýza problému a cíl práce

V teoretické části bylo konstatováno, že 3D tisk metodou FDM je progresivní a z důvodu nenáročnosti a cenové dostupnosti stále oblíbenější výrobní metodou, která se však neomezuje jen na výrobu prototypů a koncepčních dílů, ale stále hojněji nachází uplatnění taktéž v průmyslu. Za pomoci 3D tisku se tak tisknou různé náhradní díly, kusové nebo malosériové výrobky či díly, které mají za úkol přímo nahradit konvenční výrobní technologie. U FDM 3D tisku existuje celá řada parametrů, kterými je možné ovlivnit kvalitu i mechanickou odolnost vytištěných dílů. Rešerše některé tyto důležité parametry popsala a taktéž ukázala, jakým způsobem tisk ovlivňují.

Teoretická část rovněž ukázala, že na trhu existuje celá řada materiálů, které disponují různými vlastnostmi. Některé tyto materiály jsou dle specifikace údajně určeny pro konstrukční operace. Tato práce se tedy zaměří na jejich limity využití a porovnání mezi sebou. Experiment bude vypracován dle zadání, které bylo specifikováno společností VR Group, a.s., která je předním českým dodavatelem komplexních výcvikových řešení pro ozbrojené a bezpečnostní složky. Jejich zadání spočívalo v náhradě páčky pro ovládání nouzového hydraulického systému v cvičném leteckém simulátoru. Celá sestava nouzového systému obsahuje 3 totožné páčky, každá však plní jinou funkci. První ovládá nouzové vysunutí podvozku, druhá nouzové vysunutí klapek do přistávací polohy a třetí ovládá propojení nouzového a hlavního okruhu. Tyto páčky byly do současnosti vyráběny z hliníkové slitiny EN AW 7075 za pomoci technologie CNC obrábění, avšak nově by vzhledem k jednoduchosti náhrady a úspoře nákladů byly vyráběny za pomoci 3D tisku.

Tento proces certifikace a nahrazování dílů byl v teoretické části rovněž popsán. Pro přímou aplikaci v letectví musí materiál splňovat velmi přísné požadavky v celé řadě faktorů, pro užití v simulátoru jsou požadavky mírnější, avšak stále musí splňovat některé podmínky.

Vzhledem k aplikaci páčky musí vybraný materiál splňovat požadavky na statickou a dynamickou pevnost, vrubovou houževnatost a ideálně i únavovou životnost. Jelikož se jedná o simulátor, nikoliv o letadlo, tak v experimentu není třeba brát v potaz teplotní odolnost a obecně chování za zvýšené nebo naopak při snížené teplotě, což by mohlo hrát v případné přímé náhrady značnou roli. Materiál musí být rovněž odolný proti běžně

dostupným mazivům, která se v sestavě mohou vyskytovat. Dle teoretické části i předchozích zkušeností byly nakonec vybrány materiály viditelné v následující tabulce:

Tab. 1 Vybrané materiály pro testování, jejich výrobci, barva a cena

Označení materiálu	Výrobce	Barva	Cena za kilogram k 30.6.2023
PETG	Fillamentum	černá	706 Kč
CPE HG100	Fillamentum	černá	1236 Kč
PETG-CF	Plasty Mladeč	černá	1718 Kč
PA12-CF	Fiberlogy	černá	2530 Kč
HTN-CF25	Essentium	černá	5025 Kč
PC	Polymaker	černá	1465 Kč
PA6-CF	Polymaker	černá	2678 Kč

Vybrané materiály by měly pokrývat celou škálu možných požadavků jak z hlediska jejich mechanické odolnosti, tak také ceny. V kapitole zabývající se tiskovými materiály nebyly dva z těchto materiálů zmíněny, avšak pro své vlastnosti byly do tohoto testování vybrány. Prvním materiálem je chlorovaný polyethylen (CPE HG100), který je vlastnostmi velice podobný materiálu PETG, je teplotně i chemicky odolný a má dobrou adhezi vrstev. Druhým materiálem je HTN-CF25, což je speciální vysokoteplotní polyamid obohacený o 25 % uhlíkových vláken. Jedná se o speciální druh polyamidu s nejvyšší teplotní odolností, vynikající pevností, tuhostí a odolností proti otěru. Měl by se tedy jednat o vynikající materiál pro přímou náhradu konvenčně vyráběných dílů.

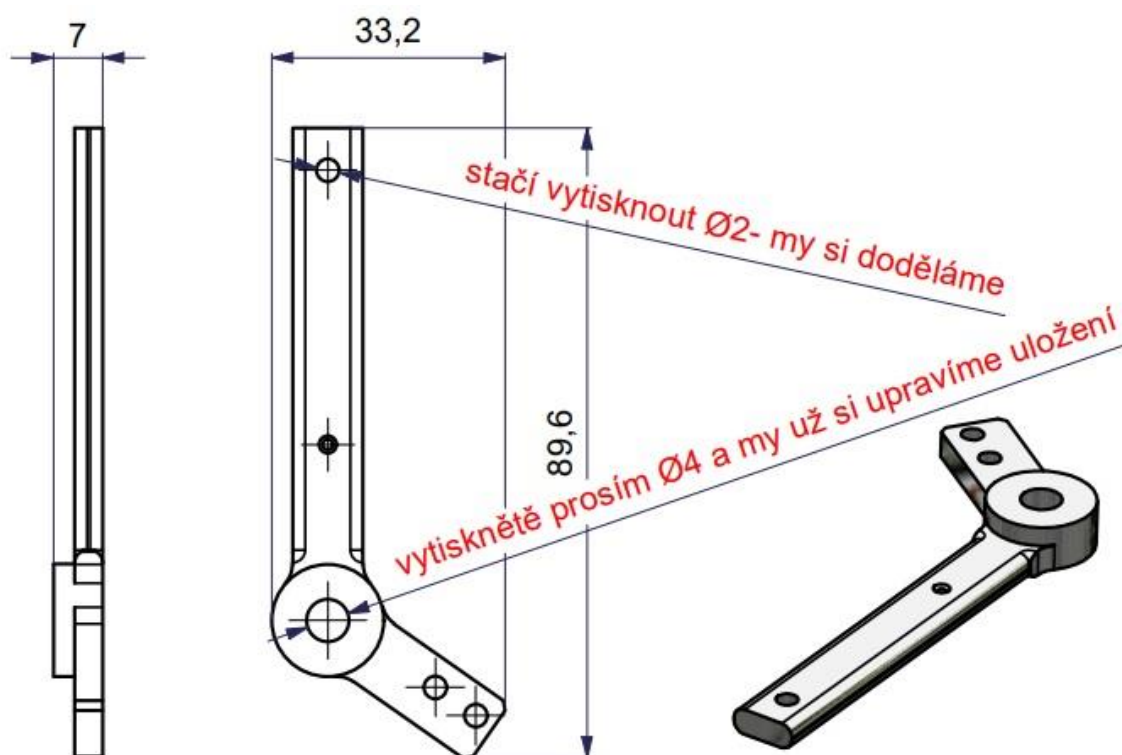
Pro ilustraci byly v předchozí tabulce doplněny u jednotlivých materiálů i informace o výrobcích filamentu, ceně a rovněž barvě, jelikož dle výzkumu, který provedli Pandzic et al [53], má barva značný vliv na vlastnosti materiálu. Z tohoto důvodu byl výběr barvy omezen na jeden odstín. Cena filamentů je uvedena s platností k červenci 2023. Výrobci jednotlivých materiálů byli vybráni dle momentální dostupnosti na trhu. Toto zkoumání ukáže, zdali je některý z těchto používaných technických materiálů vhodný pro náhradu specifikovaného dílu. [51,52,53]

PRAKTICKÁ ČÁST

5 Návrh metodiky testování a provedení experimentu

5.1 Tvorba modelu součásti

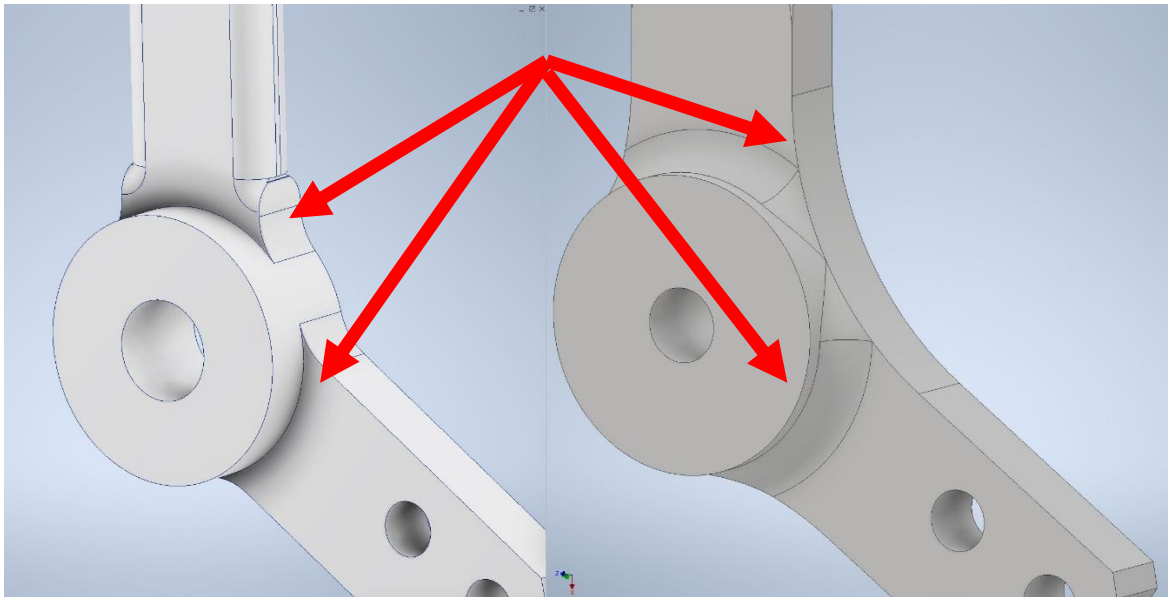
Prvním krokem pro provedení experimentu výběru vhodného materiálu pro tisk páčky leteckého simulátoru bylo vyhotovení 3D modelu. Dle původního plánu mělo dojít k využití reverzního inženýrství, oskenování reálné hliníkové páčky za pomoci laser scanneru a jejímu převodu do 3D modelu. Tento proces byl nakonec usnadněn dodáním 3D modelu ve formátu STEP objednatelem společně s výkresovou dokumentací, jelikož bylo potřeba učinit určité změny (viz Obr. 17).



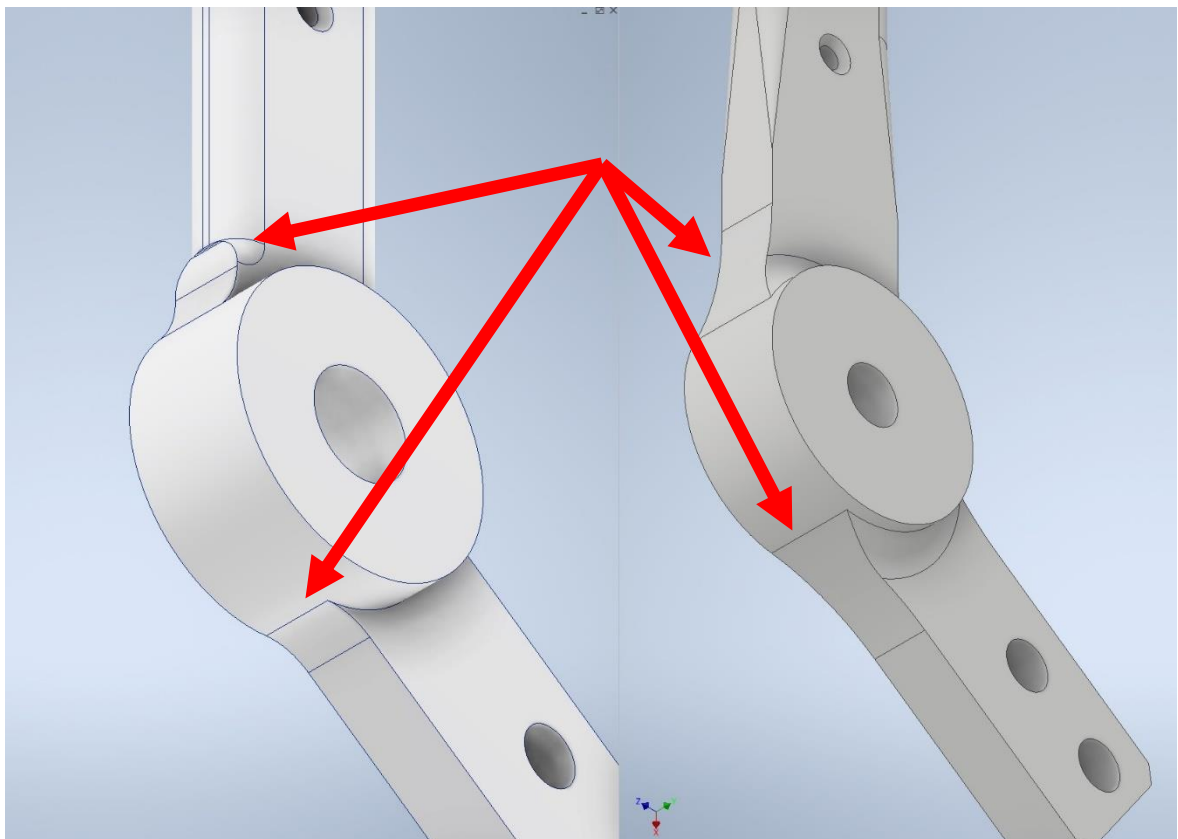
Obr. 17 Dodaný výkres s doplněnými požadavky objednatelem

Záhy se však ukázalo, že pouhá úprava průměrů děr nestačila. Model páčky pochází z původního návrhu z 80. let 20. století a nebyl zamýšlen pro vyhotovení za pomoci 3D tisku. Po dojednání „limitů“ úprav z hlediska uložení a dodržení vzdáleností děr a celkových vnějších rozměrů tedy došlo k tvorbě nového modelu za pomoci CAD softwaru Autodesk Inventor 2024, který má ovšem základy v původním modelu. Ten totiž obsahoval některé

details, které by však ve výsledku mohly způsobit problémy. Jednalo se o různé drobné hrany, malá zaoblení a podobné artefakty, které můžete vidět na Obr. 18 a Obr. 19. Tyto drobnosti by však měly výrazný vliv na výsledky testování z důvodů vícera faktorů.

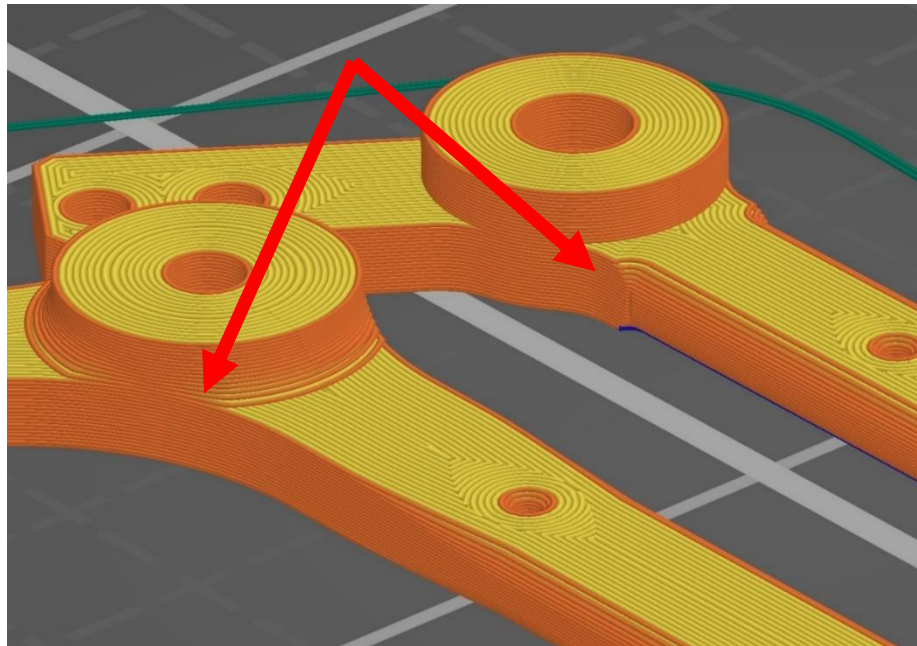


Obr. 18 Porovnání modelu před a po úpravě – pohled zepředu

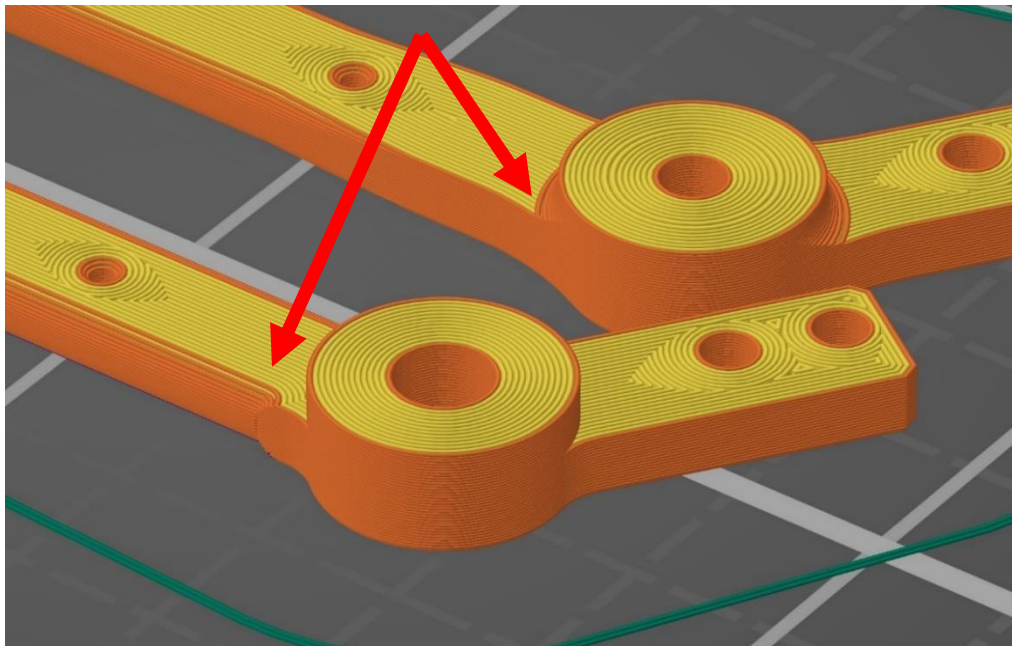


Obr. 19 Porovnání modelu před a po úpravě – pohled z boku

Prvním faktorem je tisknutelnost. Jak můžete vidět na Obr. 20, tak nový model (vlevo) disponuje lepší geometrií s plynulými přechody, které jsou vhodnější pro tisk než drobné rohy s malým zaoblením původního modelu (vpravo), které by během tisku mohly být zdrojem potíží a slabým místem i z hlediska mechanické odolnosti. Podobný trend je možné vidět i na druhé straně na Obr. 21, kdy novější model (vpravo) disponuje výrazně vhodnější a plynulejší geometrií.

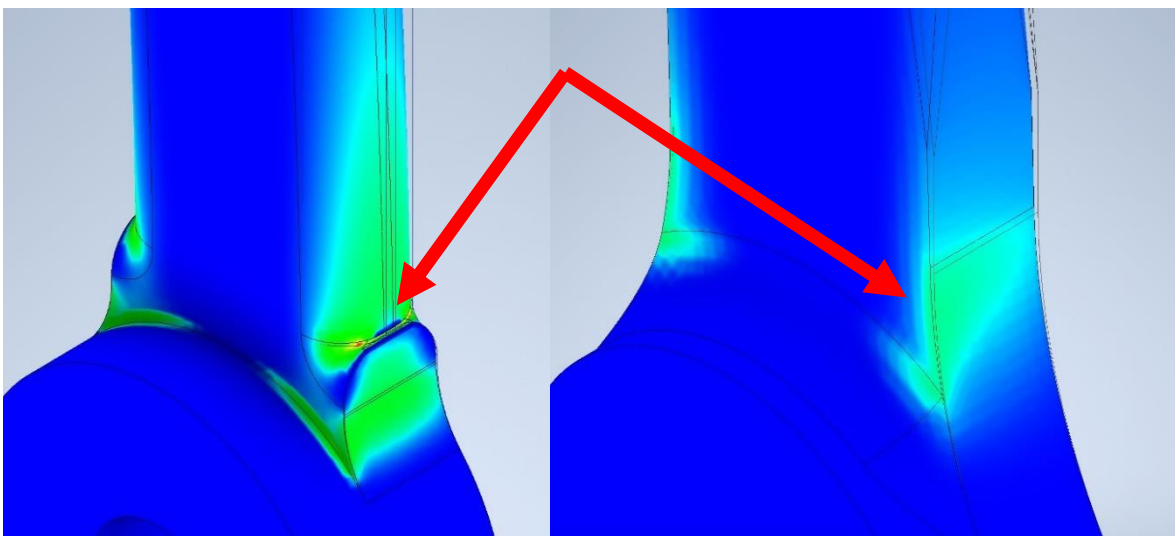


Obr. 20 Porovnání modelu před a po úpravě v prostředí sliceru – pohled z vnitřní strany



Obr. 21 Porovnání modelu před a po úpravě v prostředí sliceru – pohled z vnější strany

Druhým faktorem je využití pevnostní analýzy pro zhodnocení dílu. Tyto rohy a zaoblení jsou totiž zdrojem výrazných koncentrátů napětí, které kromě zhoršení výsledků v analýze způsobí zkreslení reálných požadavků z hlediska mechanické odolnosti, jelikož 3D tisk má pouze omezenou rozlišovací schopnost, která je dána průměrem trysky a pevnostní analýza tento detail nezohlední. Výsledkem je tedy malý koncentrátor s vysokou hodnotou napětí, naproti tomu upravený model disponuje obrazem s výraznými koncentraty napětí s nižší maximální hodnotou (viz Obr. 22). Jedná se o porovnání výsledků analýzy pro materiál PETG při použití stejných podmínek jako v experimentální části.



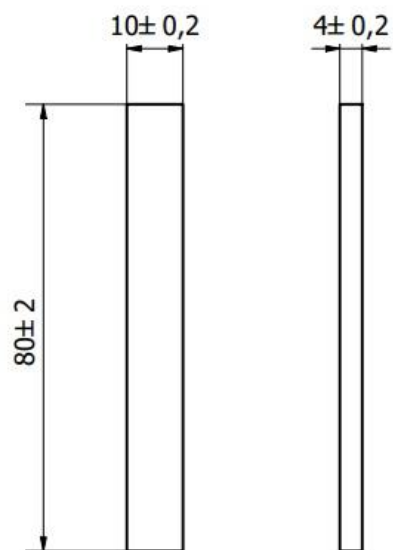
Obr. 22 Porovnání koncentrátů napětí před (vlevo) a po úpravě modelu (materiál PETG)

5.2 Volba testovacích vzorků

Pro testování mechanických vlastností byly použity normované postupy. Měřily se vlastnosti materiálů z hlediska pevnosti v ohybu, rázové houževnatosti a pevnosti v tahu. U všech těchto zkoušek byly využity speciální normy pro plasty, avšak z důvodu absence norem specializovaných na 3D tištěné vzorky jsou všechny postupy primárně určeny pro vstříkované díly.

5.2.1 Vzorky pro zkoušku ohybem

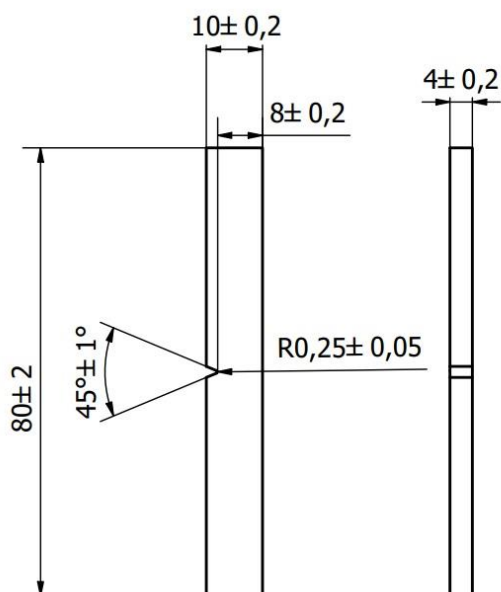
Pro zkoušku ohybem byly vybrány vzorky dle normy ČSN EN ISO 178 o stanovení ohybových vlastností plastů. Tato norma obsahuje i doporučení pro jiné varianty z hlediska poměru šířky a tloušťky zkušebního tělesa. Při tomto měření byl nicméně využit přednostní typ zkušebního tělesa o rozměrech 80x10x4 mm (viz Obr. 23). [54]



Obr. 23 Přednostní zkušební těleso pro zkoušku ohybem

5.2.2 Vzorky pro zkoušku rázové houževnatosti metodou Charpy

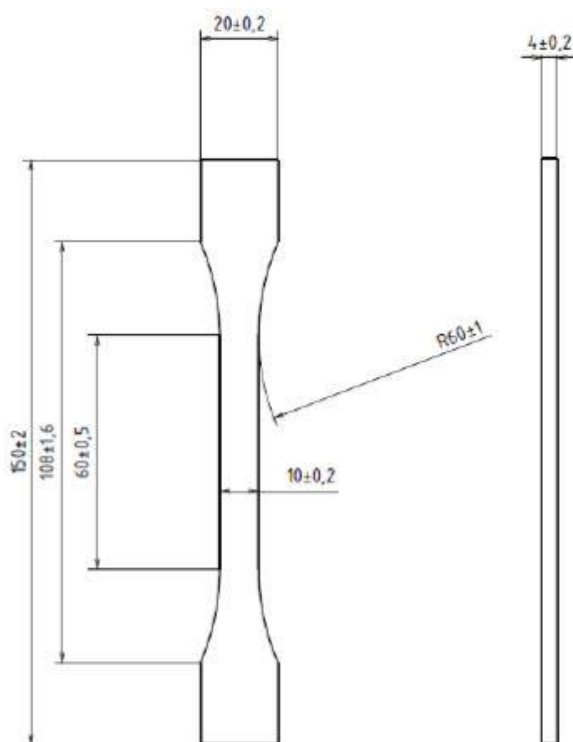
Pro zkoušku rázové houževnatosti metodou Charpy byly vybrány vzorky inspirované normou ČSN EN ISO 179-1. Jednalo se o vzorek typu 1 o rozměrech 80x10x4 mm, jelikož nebyly testovány žádné materiály vyztužené dlouhými vlákny. Směr rázu byl vzhledem k reálnému namáhání páčky veden na užší stranu vzorku a zkušební tělesa byla vybavena přednostním vrubem typu A s poloměrem kořene $0,25\text{ mm}$ a šířkou pod vrubem 8 mm (viz Obr. 24). [55]



Obr. 24 Vzorek s vrubem pro zkoušku rázové houževnatosti metodou Charpy

5.2.3 Vzorky pro zkoušku tahem

Vzorky pro zkoušku tahem byly vybrány dle normy ČSN EN ISO 527-2 o stanovení tahových vlastností plastů. Pro testování byl zvolen vzorek s označením 1B o rozměrech 150x20x4 mm (viz Obr. 25). [56]

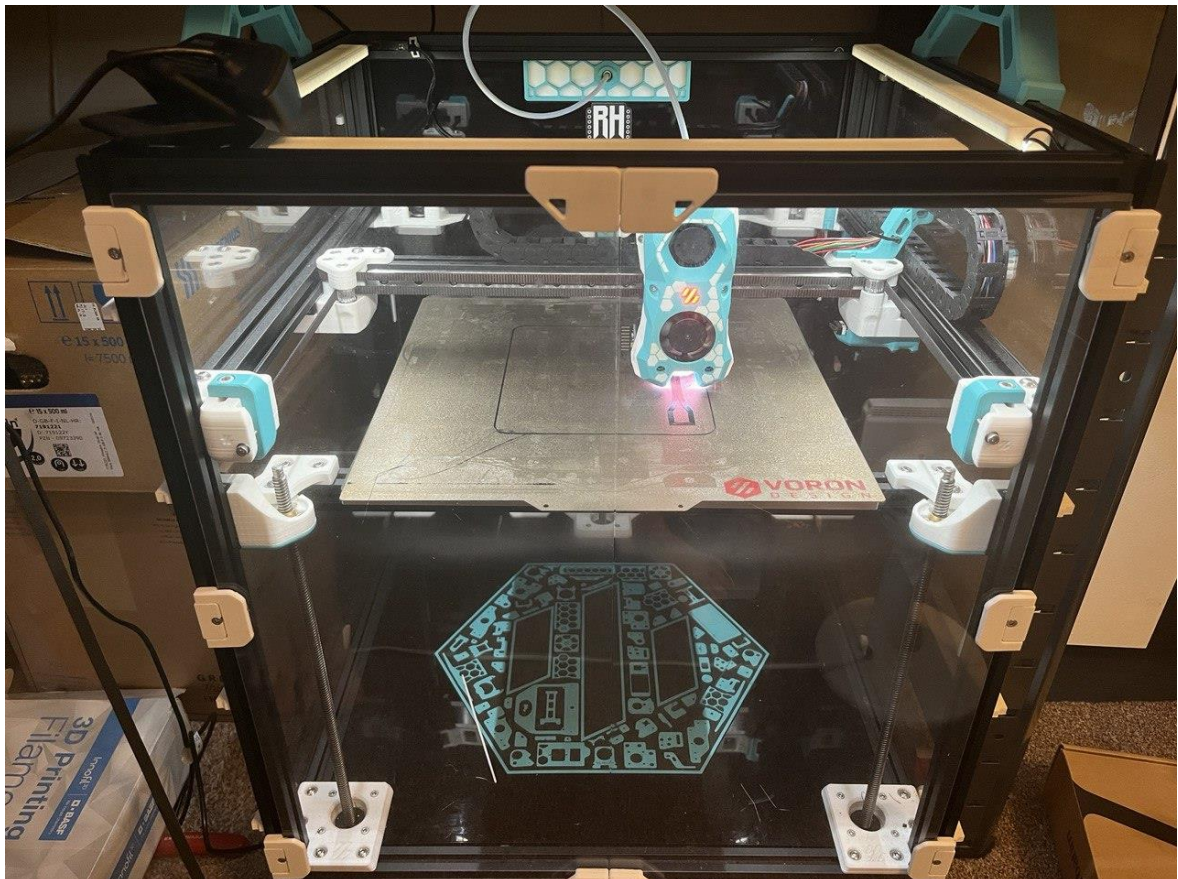


Obr. 25 Zkušební vzorek 1B pro zkoušku tahem

5.3 Tisk vzorků a tiskové parametry

Vzorky byly tištěny pomocí tiskárny Voron Trident 300 (viz Obr. 26). Tato tiskárna byla vybrána z důvodů cenové dostupnosti, kvality a spolehlivosti tisku a také z důvodu možnosti tisknout širokou škálu materiálů. Tisk probíhal v ustálených domácích podmínkách při rozmezí teplot 24-25 °C a vlhkosti vzduchu 50-55 %. Od každého vzorku bylo ze statistických důvodů vytištěno 5 kusů. U každého materiálu tak bylo z důvodu využití dvou parametrových šarží vytištěno 10 vzorků pro zkoušku ohybem, 10 vzorků pro zkoušku rázové houževnatosti, 10 vzorků pro zkoušku ohybem a 10 páček s tím, že u materiálů PA6-CF, HTN-CF25 a PC bylo vytištěno navíc 5 páček pro účely dlouhodobého testování. Celkem tedy bylo vytištěno 295 testovacích vzorků. Všechny tyto vzorky byly tištěny separátně po 5 kusech od stejného vzorku a materiálu.

Pro všechny vzorky byl využit texturovaný tiskový plát a rubínová tryska Olsson Ruby s průměrem 0,4 mm. Jako slicer byl využit program PrusaSlicer 2.6.0 a tiskárna byla řízena za pomoci rozhraní firmwaru Klipper. Pro zlepšení adheze k tiskové podložce byl aplikován sprej Dimafix, navíc byla před každým tiskem provedena automatická kalibrace tiskové podložky za pomoci Tap systému s optickým snímačem, kterým tato tiskárna disponuje. Všechny materiály byly před použitím vysušeny za pomoci trouby nastavené na vhodnou teplotu.

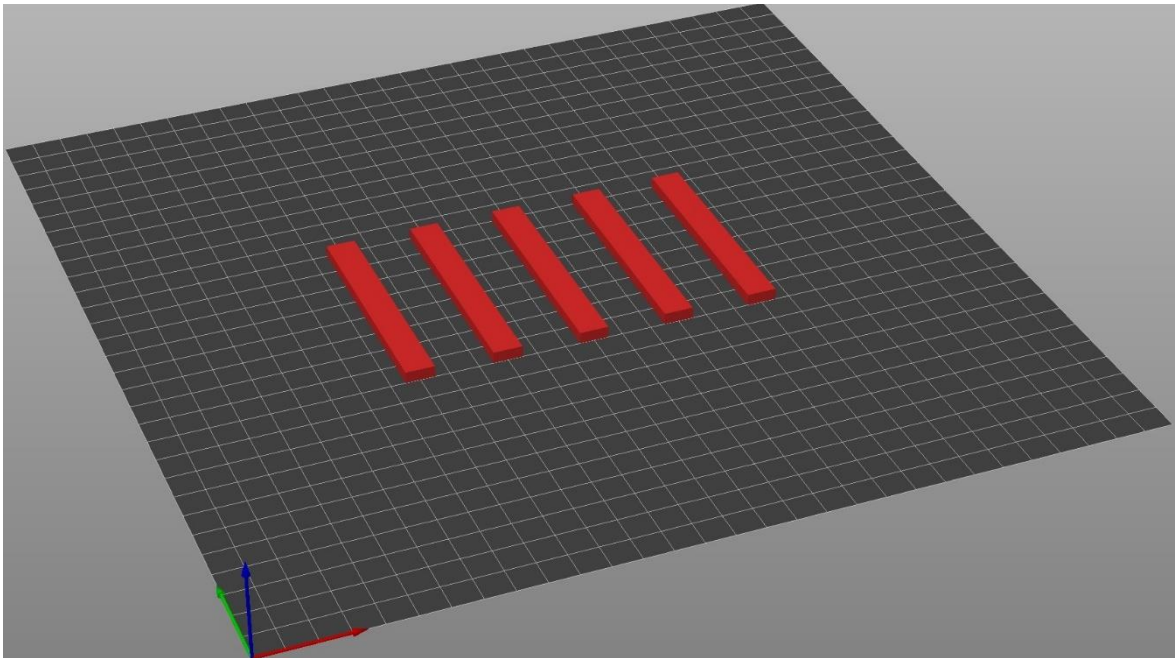


Obr. 26 3D tiskárna Voron Trident 300

Tiskové parametry se až na nutné změny, jakými jsou například teplota tiskové hlavy nebo teplota podložky, neměnily. Zvolená výška vrstvy činila 0,2 mm. Bylo tak učiněno i přes to, že dle rešerše je z hlediska pevnosti nejvýhodnější hodnota 0,1 mm. Důvody jsou výrazné zkrácení doby tisku a také zkušenosti s materiály s plnivem ve formě uhlíkových vláken, které mají tendenci se při užití malé výšky vrstvy chovat vlivem přítomnosti vláken nespolehlivě, což by mohlo mít za následek chybovost tisku.

Jako hodnota výplně byla zvolena hodnota 100 %, jelikož při požadavcích maximální pevnosti a malé hmotnosti dílu nemá smysl užívat nižší procento. Z hlediska počtu perimetrů byly vybrány a vyhotoveny dvě sady vzorků. První typ disponoval 4 perimetry a 100% výplní, druhý typ byl tvořen pouze perimetry (ve sliceru byla nastavena hodnota 15 perimetrů), které tak vyplnily nejen páčky, ale i funkční části testovacích normovaných vzorků. Toto měření také ověřuje výsledek experimentu provedeného Milsimerem [12], podle kterého je použití perimetrů výhodnější z hlediska pevnosti, a také doporučení a tvrzení výrobců filamentů na bázi polyamidu, kteří uvádí, že tyto filamenty disponují výrazně vyšší pevností při namáhání ve směru rovnoběžném s perimetry. Jako rychlost tisku byla zvolena hodnota 60 mm/s, která splňuje doporučení u všech testovaných materiálů. Tato rychlost rovněž reflektuje výsledky testování, které ve svém experimentu provedl Miazio [23] a splňuje i podmínky z hlediska nároků na dobu tisku a tím i jeho produktivitu. [12,23]

Všechny vzorky byly tištěny v orientaci XY (na ležato) rovnoběžně s osou Y (úhel 0°). Tato orientace vychází ze zkušeností autora, doporučení získaných v teoretické části a také geometrie a tvaru páčky. Vybranou orientaci je možné vidět na Obr. 27.



Obr. 27 Ukázka tiskové orientace vzorků pro zkoušku ohybem se zobrazením ve sliceru

S volbou tiskové orientace souvisí taktéž zvolená intenzita chlazení výtisku. Ve všech případech se jednalo o nízké výtisky orientovány v ose XY bez převisů a mostů (páčka byla upravována již s touto myšlenkou). Bylo tedy možné zcela vypnout chlazení výtisků. Tento parametr má dle experimentu, který provedli Lee a Liu [27], zlepšit mechanickou odolnost všech vzorků, neboť dojde k lepšímu propojení vrstev. [27]

Šířka extruze činila ve všech případech 0,4 mm. Ze zkušenosti autora ohledně kvality a přesnosti tisku byla využita hodnota multiplikátoru extruze 0,95. Retrakce byla ve všech případech nastavena na hodnotu 2 mm s rychlostí 40 mm/s.

Některé parametry (viz Tab. 2) však bylo nutné v závislosti na použitém materiálu změnit. Jednalo se o teplotu trysky, teplotu tiskové podložky a nutnost použití límce (brimu). Teplota trysky byla ve všech případech rovna maximální doporučené hodnotě, uvedené výrobcem. Tato volba tedy koresponduje se zjištěním z teoretické části. Stejná strategie byla použita i u volby teploty tiskové podložky, pro maximální adhezi k tiskové podložce byly zvoleny opět nejvyšší výrobcem doporučené hodnoty. Brim byl použit u materiálů, které nemají dostatečnou adhezi k tiskové podložce. Velikost brimu činila při jeho použití 10 mm. Pro materiál PC byla navíc použita pasivně vyhřívaná tisková komora předehřátá na teplotu přibližně 45 °C, a to z důvodů doporučení výrobce, jelikož vlivem velkých zbytkových napětí má materiál PC bez tiskové komory tendenci praskat ve vrstvách a také se smršťovat, což má za následek odlepení od tiskové podložky (tzv. warping). Výsledné časy jednotlivých šarží tisku jsou viditelné v Tab. 3.

Tab. 2 Tiskové teploty a použití límce pro jednotlivé materiály

Materiál	Teplota trysky	Teplota tiskové podložky [°C]	Použití límce
PETG	255	75	Ne
CPE HG100	275	85	Ne
PETG-CF	250	80	Ne
PA12-CF	270	100	Ano
HTN-CF25	290	80	Ano
PC	270	100	Ano
PA6-CF	300	50	Ano

Výtisky byly vlivem důsledné volby parametrů téměř bezchybné, jedinými problematickými filamenti byly materiály PA6-CF a HTN-CF25. Jedná se o polyamidy, které jsou náchylné k velmi rychlému navlhnutí, bylo je tedy nutné vysušet častěji než ostatní materiály.

Tab. 3 Časy tisku jednotlivých šarží

Šarže	Doba tisku 5 kusů	Doba tisku 5 kusů při použití límce
Zkouška ohybem 4 perimetry	1 h 14 min	1 h 26 min
Zkouška ohybem plné perimetry	1 h 8 min	1 h 19 min
Zkouška vrubové houževnatosti 4 perimetry	1 h 15 min	1h 32 min
Zkouška vrubové houževnatosti plné perimetry	1 h 11 min	1 h 27 min
Zkouška tahem 4 perimetry	3 h 6 min	3 h 37 min
Zkouška tahem plné perimetry	3 h 2 min	3 h 33 min
Páčka 4 perimetry	1 h 53 min	2 h 17 min
Páčka plné perimetry	1 h 48 min	2 h 16 min

5.4 Zkouška ohybem

Zkouška ohybem probíhala dle podmínek normy ČSN EN ISO 178, která popisuje stanovení ohybových vlastností plastů. Testovány byly přednostní zkušební tělesa určená normou, která jsou popsána v kapitole 5.2.2. Jakožto testovací zařízení byl použit víceúčelový zkušební stroj MTS Exceed E42, který kromě ohybových vlastností umožňuje studovat chování materiálu v tahu, tlaku a stříhu (viz Obr. 28).



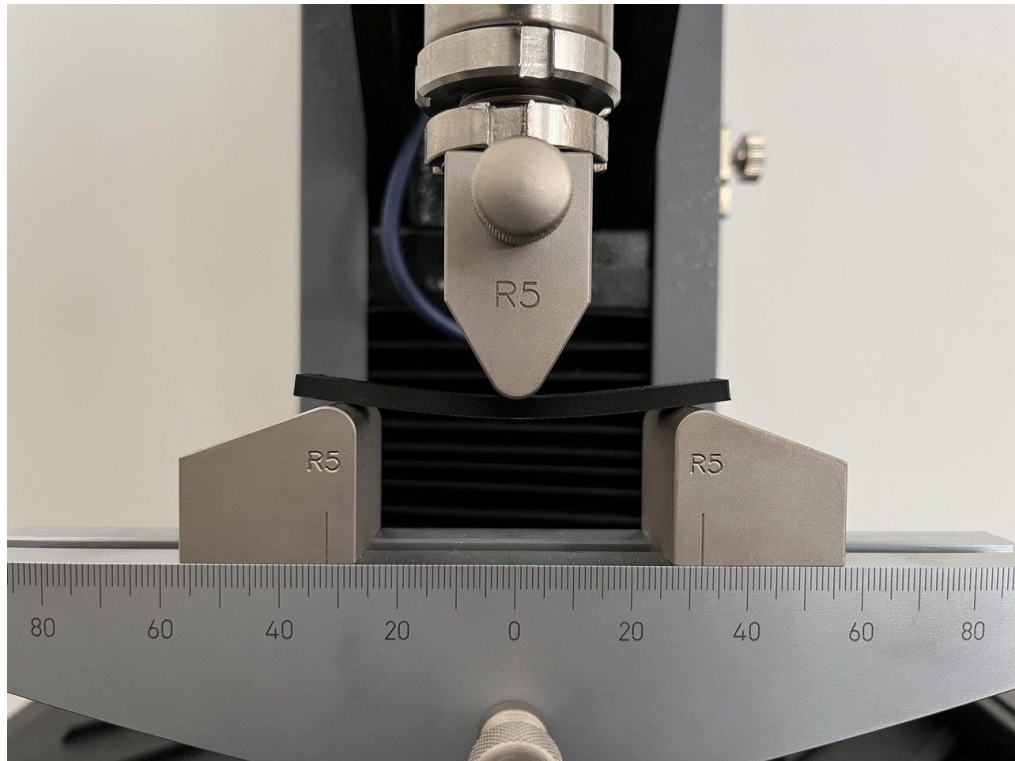
Obr. 28 Zkušební stroj MTS Exceed E42 pro zkoušku ohybem

Od každého materiálu a šarže dle počtu perimetrů bylo vytištěno a otestováno 5 vzorků. Tento počet je vyhovujícím minimem z hlediska preciznosti měření. Celkem tedy bylo pro zkoušku ohybem vyhotoveno 70 vzorků. Všechny vzorky byly před testováním kondicionovány po dobu 72 hodin při teplotě 25 °C a relativní vlhkosti 55 %. Před provedením zkoušky došlo k proměření všech testovacích vzorků za pomoci digitálního posuvného měřítka, měřila se tloušťka tělesa h a šířka tělesa b , zdali odpovídá hodnotám a tolerancím uvedeným v normě. Tyto hodnoty byly taktéž následně využity ke stanovení počátečního průřezu tělesa, který je důležitý pro určení pevnosti v ohybu. Těleso bylo následně umístěno na testovací podpěry o poloměru 5 mm. Jejich vzdálenost je v případě přednostního tělesa rovna 64 mm, pokud by se však jednalo o těleso běžných rozměrů jiných než přednostní těleso, tak jejich vzdálenost by se zjistila ve vztahu:

$$L = (16 \pm 1) \cdot h \quad (1)$$

kde h je tloušťka zkušební tělesa.

Zde bylo nutné vzorek správně vycentrovat, jelikož mezi podpěrami se nachází zatěžovací trn o poloměru rovněž 5 mm. Vycentrování zajistí správný a rovnoměrný průhyb tělesa během zkoušky. Dále již mohlo dojít k ohýbání zkušebních vzorků, viditelné na Obr. 29 na příkladě materiálu PETG-CF. Zkušební rychlost zatěžování činila 5 mm/min. Měření probíhalo v běžných laboratorních podmínkách. Zkouška probíhala do porušení zkušební tělesa nebo do dosažení předepsané hodnoty deformace rovné 0,1 (10 %). Výstupem této zkoušky byl záznam velikosti zatěžující síly a průhybu tělesa. Zařízení zaznamenávalo závislost zatížení na průhybu taktéž v grafické podobě (viz Příloha 1).



Obr. 29 Zatěžování vzorku při zkoušce ohybem (PETG-CF)

Pro potřeby tohoto experimentu bylo nutné zjistit pevnost v ohybu σ_{fM} , která je rovna nejvyššímu napětí v ohybu, které zkušební těleso snese během zkoušky. Napětí v ohybu se pak spočítá pomocí následujícího vztahu:

$$\sigma_{fM} = \frac{3 \cdot F_{fM} \cdot L}{2 \cdot b \cdot h^2} \quad (2)$$

kde F_{fM} je maximální použitá síla, L je rozpětí zkušebních podpěr, b je šířka zkušebního tělesa a h je tloušťka zkušebního tělesa. [54]

5.5 Zkouška rázové houževnatosti

Stanovení rázové houževnatosti metodou Charpy proběhlo dle normy ČSN EN ISO 179-1. K testování bylo využito Charpyho kladivo Instron CEAST (viz Obr. 30). Rázové kyvadlo disponovalo maximální energií 7,5 J. Testování probíhalo ve stabilních laboratorních podmínkách. Celkem bylo otestováno 70 vzorků, od každého materiálu bylo otestováno 5+5 kusů.



Obr. 30 Charpyho kladivo Instron CEAST

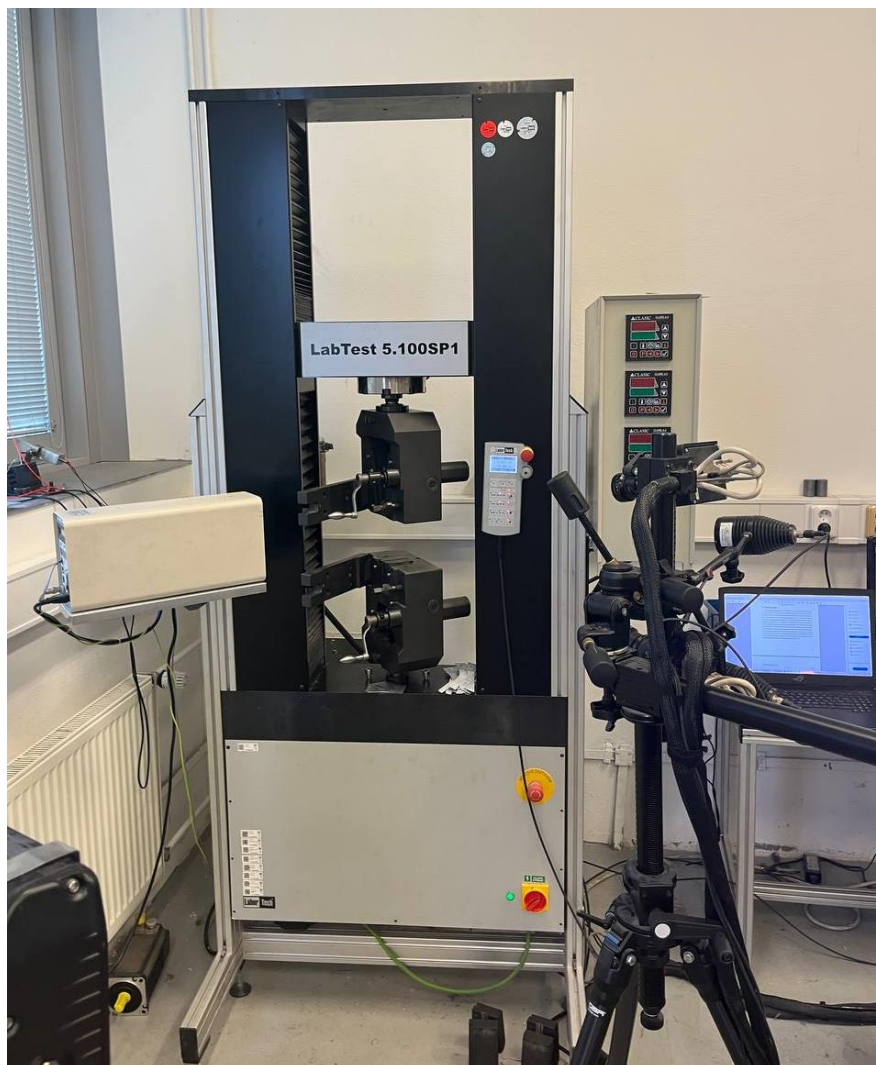
Před samotným testováním byly všechny vzorky proměřeny, změřena byla jejich tloušťka h a s určitou tolerancí také šířka pod vrubem b_N . Vzorky byly umístěny doprostřed podpěr se vzdáleností 40 mm určenou pomocí rysek vrubem směrem od místa dopadu kladiva a v orientaci se směrem rázu na užší stranu vzorku. Po přeražení tělesa kladivem byla na displeji odečtena hodnota rázové energie absorbovaná zkušebním tělesem. Pro výpočet rázové (při použití vrubu pak vrubové) houževnatosti bylo nutné u všech takto naměřených hodnot energie odečíst energii tělesa „na prázdko“, která činila 0,15 J. Výstupem této zkoušky byla vrubová houževnatost Charpy vyjádřená v kilojoulech na metr čtvereční dle vztahu:

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

kde E_c je korigovaná energie v joulech spotřebovaná při přeražení zkušebního tělesa, h tloušťka zkušebního tělesa v milimetrech a b_N šířka zkušebního tělesa pod vrubem v milimetrech. [55]

5.6 Zkouška tahem

Zkouška tahem probíhala dle normy ČSN EN ISO 527-1, jenž určuje obecné principy stanovení tahových vlastností plastů. Jako zkušební zařízení byl využit stroj LabTest 5.100SP1 od společnosti LaborTech (viz Obr. 31). Jako zkušební rychlost byla zvolena rychlost 50 mm/min. Po celou dobu zkoušky byla v místnosti udržována teplota 20 °C. Z důvodu dodržení podmínek normy bylo od každé sady vzorků z hlediska šarže parametrů a materiálu vytištěno 5 kusů. Celkový počet vytištěných vzorků tak činil 70 kusů. Všechny zkušební vzorky byly po vytištění uloženy v uzavíratelných plastových sáčkách a následně před testováním kondicionovány po dobu 72 hodin při teplotě 25 °C a relativní vlhkosti 55 %. K měření modulu pružnosti byl u tohoto měření využit kalibrovaný průtahoměr.



Obr. 31 Zkušební stroj LabTest 5.100SP1

U každého vzorku proběhlo před zkouškou měření tloušťky h a šířky zúžené části b pomocí digitálního posuvného měřítka z důvodu následného zjištění počátečního průřezu. Důležitým aspektem tahových zkoušek plastů bylo správné upnutí vzorků, jelikož tyto vzorky jsou velmi náchylné na prokluzování v čelistech. Během upínání bylo rovněž nutné dodržet normou stanovenou upínací vzdálenost mezi čelistmi, pro vzorky 1B tato vzdálenost činí 115 mm a také dodržet počáteční měřenou délku průtahoměru, která dle doporučení normy činí $75 \text{ mm} \pm 1,5 \text{ } \mu\text{m}$. Tato hodnota je zároveň výhodná z hlediska opakovatelnosti měření, jelikož velmi omezuje možnost porušení vzorku mimo zkoumanou oblast. Výstupem zkoušky byl pracovní tahový diagram, který v každém okamžiku zkoušky zaznamenával závislost zatěžující síly F na prodloužení ΔL . Z těchto hodnot bylo následně možné získat následující materiálové charakteristiky:

Mez pevnosti v tahu

$$\sigma_m = \frac{F_{max}}{A} \quad (4)$$

kde F_{max} je maximální zatěžující síla.

Modul pružnosti v tahu

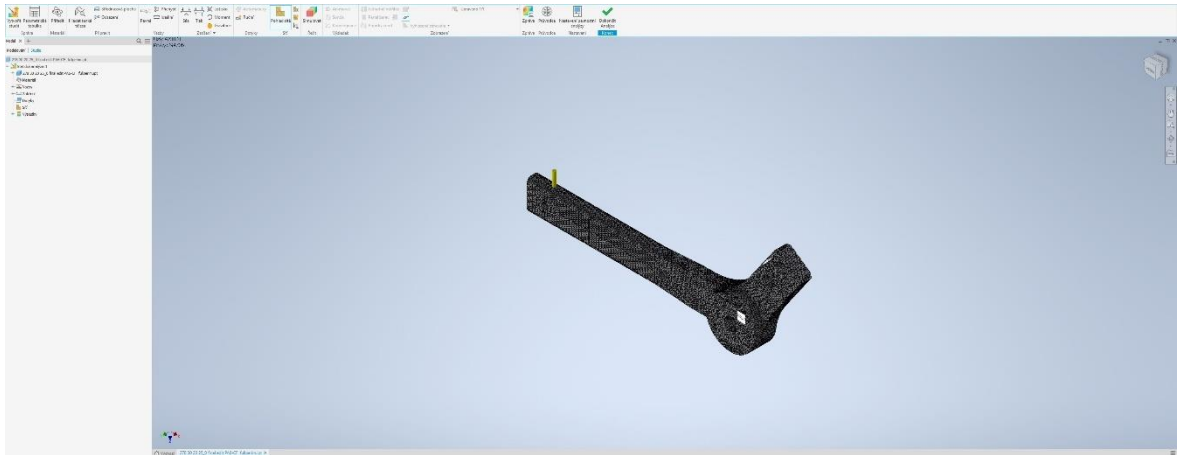
$$E_t = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} \quad (5)$$

kde σ_1 je napětí naměřené při hodnotě poměrného prodloužení $\varepsilon_1=0,0005$ a σ_2 je napětí naměřené při hodnotě poměrného prodloužení $\varepsilon_2=0,0025$. [57]

5.7 Pevnostní analýza dílu

Předmětem zkoumání bylo větší množství materiálů a kapacita pro testování v praxi byla omezená, bylo tak nutné určit nejvhodnější kandidáty pro testovací proces. Mechanické zkoušky poskytnou informaci o limitech daného materiálu, avšak neposkytnou dostatek informací o podmínkách reálného použití. Proto tedy bylo vhodné určit podmínky, za kterých bude díl pracovat a zjistit skutečné požadavky z hlediska mechanické odolnosti. Maximální namáhání je možné spočítat dle známých pravidel, avšak u složitějších dílů je potřeba brát v potaz velké množství okrajových podmínek. Z tohoto důvodu byla kromě orientačního výpočtu maximálního napětí v ohybu vybrána pevnostní analýza v programu

Autodesk Inventor (viz Obr. 32). Tato analýza se běžně využívá u homogenních těles, tento experiment se však zaměří na její možnost aplikace rovněž u 3D tištěných těles.



Obr. 32 Prostředí pevnostní analýzy v programu Autodesk Inventor 2024

Po vložení páčky do prostředí analýzy bylo nutné zvolit směr a intenzitu zatěžování. Směr byl určen podle pozice páčky v simulátoru vzhledem k pozici pilota. K orientaci a metodice zjišťování intenzity zatěžování pomohl výzkum výkonnostních limitů lidského těla, který vypracoval americký Národní úřad pro letectví a vesmír (NASA) [58]. Ten se v jedné kapitole věnoval síle, kterou je lidské tělo schopno vyvinout při pohybu ruky k sobě s určitým úhlem natočení paže v lokti. V případě tohoto experimentu se jedná o úhel natočení $2/3 \pi$, neboli 120° . Tomuto úhlu přiřadil výzkum maximální sílu 137 N. Tato síla samozřejmě není maximální vyvinutelná, ale je uvedena jako reprezentativní hodnota. Jedná se však o sílu vyvinutou při sevření předmětu celou dlaní, navíc ve vhodné vertikální orientaci. Testovaná páčka bude vždy namáhána dlaní v horizontální pozici, navíc díky uložení a separačním deskám je nemožné páčku chytit celou rukou. Proto bylo provedeno vlastní měření síly přitahu digitálním siloměrem (viz Obr. 33).

Bylo provedeno celkem 5 orientačních měření. Z výsledků vyplynulo, že maximální síla přitahu činila pouze 6 kg, neboli 59 N, což je hodnota značně se lišící od výzkumu NASA. Tento rozdíl je způsoben výše uvedenými podmínkami, například uchopením páčky pouze dvěma prsty. Uložení páčky navíc obsahovalo distanční podložky, kterými lze po dotažení korigovat odpor páčky proti samovolnému pohybu.

Pevnostní analýza kromě určení zatěžující síly a pevných vazeb vyžaduje rovněž zadání materiálových charakteristik a nastavení sítě pro simulaci. Pro zajištění vyšší přesnosti simulace byla nastavena minimální velikost prvku sítě na hodnotu 0,01 mm, což mělo za následek tvorbu výrazně vyššího počtu prvků. Z materiálových charakteristik bylo

třeba zadat Youngův modul pružnosti, Poissonovo číslo, modul pružnosti ve smyku, hustotu a mez pevnosti v tahu. Youngův modul a mez pevnosti v tahu byly získány z mechanických zkoušek, hustoty byly získány z materiálových listů výrobců, avšak z důvodu momentálně nedostatečně vybavené laboratoře nebylo možné experimentálně ověřit hodnotu Poissonova čísla. Tato hodnota tak byla pro všechny testované materiály získána z internetových zdrojů. Zde by však bylo vhodné provést dodatečné měření. Hodnota modulu pružnosti ve smyku G v MPa pak bylo možné spočítat z Youngova modulu pružnosti a Poissonova čísla dle vztahu:

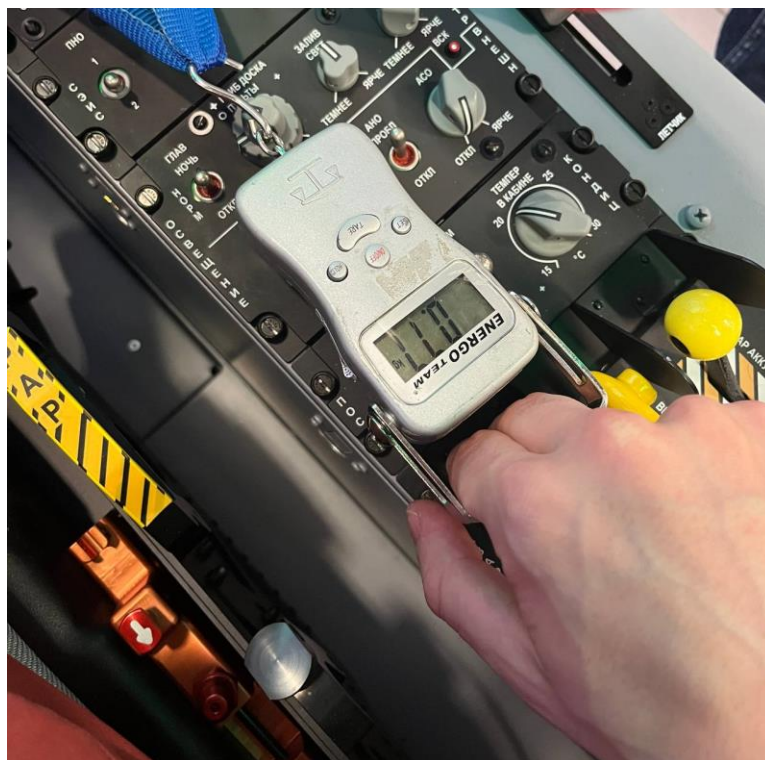
$$G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \mu)} \quad (6)$$

kde E je Youngův modul pružnosti (modul pružnosti v tahu) v MPa a μ je Poissonovo číslo.

Po zadání všech vstupních parametrů (viz Tab. 4) a podmínek do programu a provedení simulace bylo následně provedeno vyhodnocení. To spočívalo v zaznamenání hodnoty posunu (prohnutí vzorku) a hlavně koeficientu bezpečnosti, který je vztažen k mezi pevnosti v tahu. Tato analýza by tak teoreticky měla učit, jaké vzorky odolají reálnému zatížení páčky a rovněž určit místo porušení vzorku, pokud by k němu mělo dojít. Pro zaručení odolnosti vzorku je vhodné uvažovat součinitel bezpečnosti větší než 1,2. Pro přímé použití v letectví pak norma určuje součinitel bezpečnosti alespoň 1,5. [58]

Tab. 4 Tabulka se vstupními parametry pro pevnostní analýzu

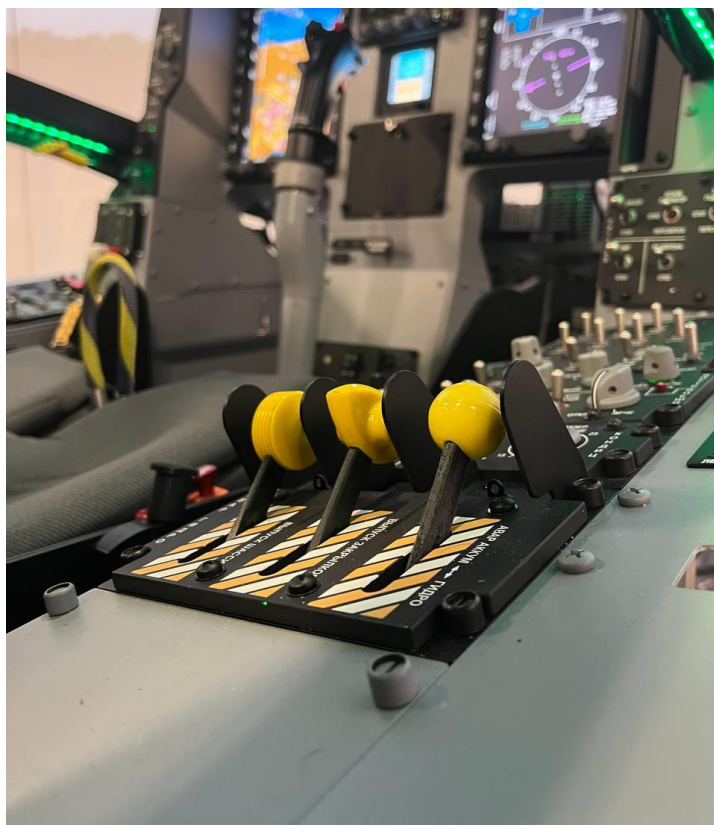
Materiál	Šarže	E [MPa]	μ [-]	G [MPa]	ρ [g·cm ⁻³]	σ_m [MPa]	F [N]	n [mm]
PETG	4 perimetry	1563	0,38	566	1,27	51,5	59	0,01
PETG	Plné perimetry	1656	0,38	600	1,27	54,5	59	0,01
CPE HG100	4 perimetry	1525	0,39	549	1,25	49,6	59	0,01
CPE HG100	Plné perimetry	1586	0,39	570	1,25	52,1	59	0,01
PETG-CF	4 perimetry	1854	0,27	730	1,27	48,6	59	0,01
PETG-CF	Plné perimetry	2350	0,27	925	1,27	50,9	59	0,01
PA12-CF	4 perimetry	1571	0,3	604	1,07	43,8	59	0,01
PA12-CF	Plné perimetry	3702	0,3	1424	1,07	57,9	59	0,01
HTN-CF25	4 perimetry	6716	0,3	2583	1,32	63,2	59	0,01
HTN-CF25	Plné perimetry	13301	0,3	5116	1,32	84,1	59	0,01
PC	4 perimetry	2733	0,36	1005	1,19	61,5	59	0,01
PC	Plné perimetry	2457	0,36	907	1,19	66,8	59	0,01
PA6-CF	4 perimetry	3577	0,3	1376	1,17	83,9	59	0,01
PA6-CF	Plné perimetry	3251	0,3	1250	1,17	85	59	0,01



Obr. 33 Měření síly přítahu digitálním siloměrem

5.8 Testování mechanické odolnosti páček

Kromě mechanických zkoušek normovaných vzorků bylo také potřeba otestovat vytištěné páčky v prostředí jejich použití. Z tohoto důvodu byla vybrána dvě různá měření. Prvním zkoumáním bylo dlouhodobé testování páček na samotném simulátoru. Vzhledem ke kapacitním limitům (k dispozici byl pouze jeden simulátor se třemi páčkami) bylo nutné vybrat pouze určitý počet vzorků. Pro maximální efektivnost byly nakonec vybrány tři materiály, kdy z každého materiálu byl vybrán náhodně jeden kus, který byl podroben testování. Vzhledem k výsledkům mechanických zkoušek byly nakonec vybrány tři materiály s nejvyšší naměřenou pevností, a to PA6-CF, HTN-CF25 a PC. Uložení páček v simulátoru je viditelné na Obr. 34.



Obr. 34 Umístění tištěných páček v simulátoru

Druhé měření spočívalo v aplikaci reálného maximálního zatížení na páčku. K tomuto měření bylo využito závaží o hmotnosti 6 kg, což odpovídá naměřené síle 59 N. Toto závaží bylo následně zavěšeno na páčku, která byla za pomoci rovněž tištěného přípravku s přesně definovanými otvory upevněna ke svěráku (viz Obr. 35). Pro realizovatelnost měření byla však páčka umístěna do horizontální polohy. Cílem této zkoušky bylo zjistit, zdali páčka tomuto zatížení odolá bez poškození či větší deformace. Zatížení na páčku působilo po dobu 10 minut ve třicetivteřinových cyklech. Výsledek tohoto zkoumání se po vyhodnocení a určení odolnosti jednotlivých materiálů a šarží porovnal s pevnostní analýzou. Ke zkoumání trvalé deformace bylo na přípravku vyhotoveno rameno, které je rovnoběžné s páčkou a umožňuje tak tuto deformaci na první pohled pozorovat. Pro záznam byl použit stativ, který zajistil stabilitu a definoval polohu kamery a umožnil tak porovnání vzorků mezi sebou. Deformace jednotlivých vzorků byla následně obodována dle stupnice od jedné do deseti (1-nejmenší, téměř bez deformace, 10-nejvyšší, porušení vzorku) a bylo stanoveno pořadí, které materiály nejlépe odolaly zatížení.



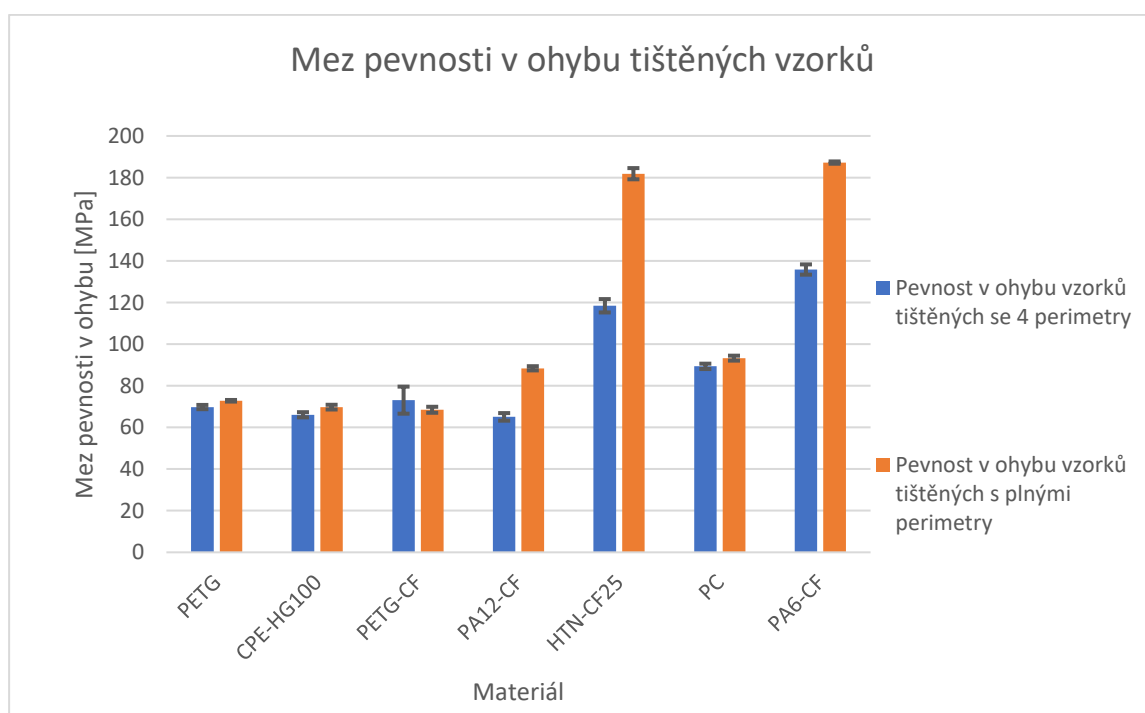
Obr. 35 Domáci testování odolnosti páčky (materiál PETG)

6 Shrnutí a vyhodnocení výsledků testování

6.1 Zkouška ohybem tištěných vzorků

Zkouška ohybem ukázala některé zajímavé a také značně rozdílné výsledky. U vzorků tištěných se 4 perimetry a 100% výplní dosáhl nejvyšší pevnosti v ohybu materiál PA6-CF s pevností téměř 136 MPa. Velmi vysoké pevnosti taktéž dosáhl materiál HTN-CF25 se 118,4 MPa. Již s větším odstupem za první dvojici se nacházel materiál PC s pevností v ohybu rovnou 89,3 MPa. Naopak nejnižší pevnosti dosáhl překvapivě materiál PA12-CF s pevností v ohybu pouhých 65 MPa. Rozdíl mezi nejvyšší a nejnižší pevností tak činil 109,2 %. Naměřené hodnoty jsou viditelné v Graf 1 a v Tab. 5.

U vzorků tištěných pouze z perimetrů dosáhl nejvyšší pevnosti opět materiál PA6-CF s hodnotou 187,2 MPa. Nárůst pevnosti v závislosti na počtu perimetrů zde tedy činil téměř 38 %. Naopak nejnižší pevnost v ohybu ze všech takto tištěných vzorků dosáhl materiál PETG-CF s hodnotou pevnosti v ohybu 68,5 MPa. Procentuální rozdíl pevností v ohybu zde tedy činí výrazných 173,3 %. Materiál HTN-CF25 dosáhl při použití pouze perimetrů téměř stejné pevnosti jako materiál PA6-CF, jeho pevnost činila 181,9 MPa. S velkým odstupem se dále nacházejí materiály PC a PA12-CF, které dosáhly pevností v ohybu 93,3, respektive 88,4 MPa.



Graf 1 Hodnoty meze pevnosti v ohybu tištěných vzorků

Tab. 5 Výsledky zkoušky ohybem tištěných vzorků

Materiál	4 perimetry+100% výplň		Plné perimetry	
	Pevnost v ohybu [MPa]	Směrodatná odchylka [MPa]	Pevnost v ohybu [MPa]	Směrodatná odchylka [MPa]
PETG	69,8	1,0	72,8	0,4
CPE-HG100	66,1	1,3	69,7	1,1
PETG-CF	73,1	6,5	68,5	1,4
PA12-CF	65,1	1,8	88,4	1,0
HTN-CF25	118,4	3,2	181,9	2,7
PC	89,3	1,3	93,3	1,2
PA6-CF	135,8	2,5	187,2	0,6

Z výsledků je patrné, že až na jednu výjimku došlo u všech materiálů k nárůstu pevnosti v ohybu při použití většího množství perimetrů. Jediným materiálem, kde se pevnost snížila, byl materiál PETG-CF. Tento výsledek však není vzhledem k výrazné směrodatné odchylce při měření vzorků se 4 perimetry stoprocentní a vyžadoval by další zkoumání. Taktéž se potvrdila hypotéza, kterou ve svém materiálovém listu uváděl výrobce Essentium [52], že materiály na bázi polyamidu dosahují při namáhání „v perimetrech“ výrazně vyšší pevnosti v ohybu než při kombinaci perimetrů a výplně. Materiál HTN-CF25, který právě firma Essentium produkuje, dosáhl v tomto směru největšího nárůstu pevnosti. Při použití pouze perimetrů (15 perimetrů) zde vzrostla pevnost o 53,6 % oproti použití 4 perimetrů a 100% výplně (viz Tab. 6). Příčinu tohoto zjištění by bylo vhodné nadále zkoumat. [52]

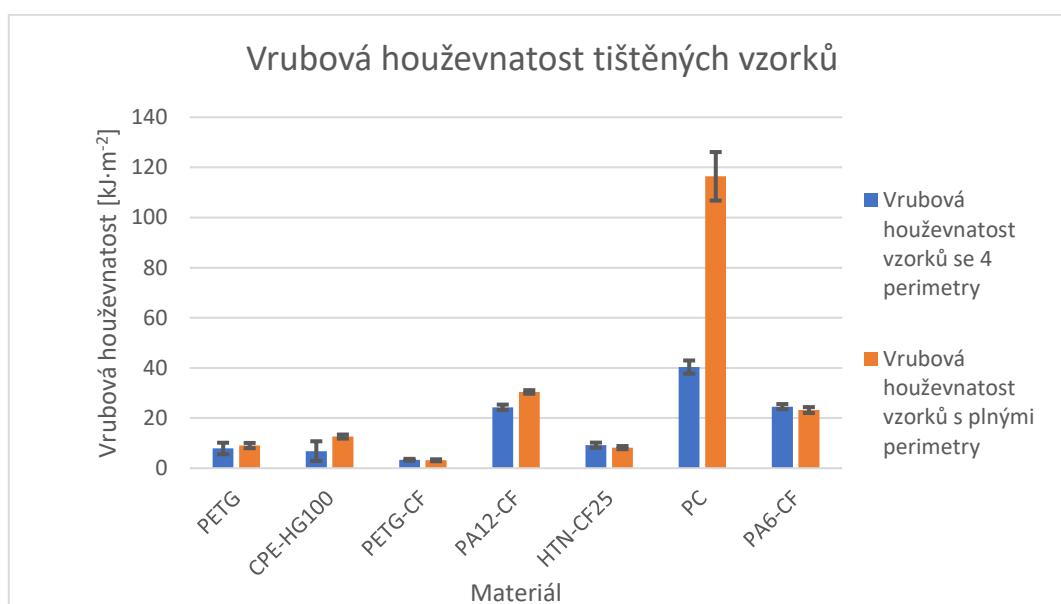
Tab. 6 Rozdíly pevností v ohybu dle užitých parametrových šarží

Materiál	4 perimetry	Plné perimetry	Rozdíl pevností v ohybu [%]
	Pevnost v ohybu [MPa]	Pevnost v ohybu [MPa]	
PETG	69,8	72,8	4,3
CPE-HG100	66,1	69,7	5,6
PETG-CF	73,1	68,5	-6,3
PA12-CF	65,1	88,4	35,9
HTN-CF25	118,4	181,9	53,6
PC	89,3	93,3	4,4
PA6-CF	135,8	187,2	37,8

6.2 Zkouška rázové houževnatosti tištěných vzorků

Výsledky zkoumání vrubové houževnatosti ukázaly rozdílné výsledky a pořadí materiálů oproti zkoušce ohybem. U vzorků se 4 perimetry dosáhl nejvyšší vrubové houževnatosti materiál PC s hodnotou $40,4 \text{ kJ}\cdot\text{m}^{-2}$, následovaný s téměř identickými hodnotami okolo $24,5 \text{ kJ}\cdot\text{m}^{-2}$ materiály PA6-CF a PA12-CF. Rozdíl mezi materiálem PC a oběma polyamidami tak činil 65 %. Naopak nejnižší hodnoty vrubové houževnatosti u této šarže dosáhl s necelými $3,4 \text{ kJ}\cdot\text{m}^{-2}$ materiál PETG-CF, rozdíl oproti materiálu PC byl více než desetinásobný.

U vzorků s plnými perimetry exceloval opět materiál PC, dosáhl zde absolutně nejvyšší průměrné vrubové houževnatosti, průměrná hodnota činila téměř $116,5 \text{ kJ}\cdot\text{m}^{-2}$. Následoval materiál PA12-CF s hodnotou $30,43 \text{ kJ}\cdot\text{m}^{-2}$ a materiál PA6-CF s hodnotou $23,2 \text{ kJ}\cdot\text{m}^{-2}$. Nejnižší vrubové houževnatosti dosáhl opět materiál PETG-CF, s průměrnou hodnotou $3,17 \text{ kJ}\cdot\text{m}^{-2}$ tak činil rozdíl mezi nejvyšší a nejnižší hodnotou 3573 %. Naměřené hodnoty jsou viditelné v Graf 2 a v Tab. 7. Výsledky tedy ukazují, že materiál PETG-CF je značně křehký a tudíž nevhodný pro dynamické namáhání.



Graf 2 Hodnoty vrubové houževnatosti tištěných vzorků

Tab. 7 Výsledky zkoušky rázové houževnatosti tištěných vzorků

Materiál	4 perimetry+100% výplň		Plné perimetry	
	Vrubová houževnatost [kJ·m ⁻²]	Směrodatná odchylka [kJ·m ⁻²]	Vrubová houževnatost [kJ·m ⁻²]	Směrodatná odchylka [kJ·m ⁻²]
PETG	7,9	2,3	9,1	1,1
CPE-HG100	6,8	3,9	12,6	0,8
PETG-CF	3,4	0,4	3,2	0,4
PA12-CF	24,3	1,1	30,4	0,7
HTN-CF25	9,2	1,0	8,2	0,6
PC	40,4	2,6	116,5	9,7
PA6-CF	24,6	1,0	23,2	1,2

Z Tab. 8 je patrné, že počet perimetrů nemá jednoznačný vliv na hodnotu vrubové houževnatosti, jelikož při porovnání šarží tiskových parametrů se rozdíly u jednotlivých materiálů značně lišily. Například u materiálů PC nebo CPE HG100 vrubová houževnatost při použití více perimetrů značně vzrostla, naopak u materiálů PETG-CF, HTN-CF25 a PA6-CF tato houževnatost klesla. U těchto výsledků je však nutné brát v potaz směrodatnou odchylku měření.

Tab. 8 Rozdíly vrubových houževnatostí dle užitých parametrových šarží

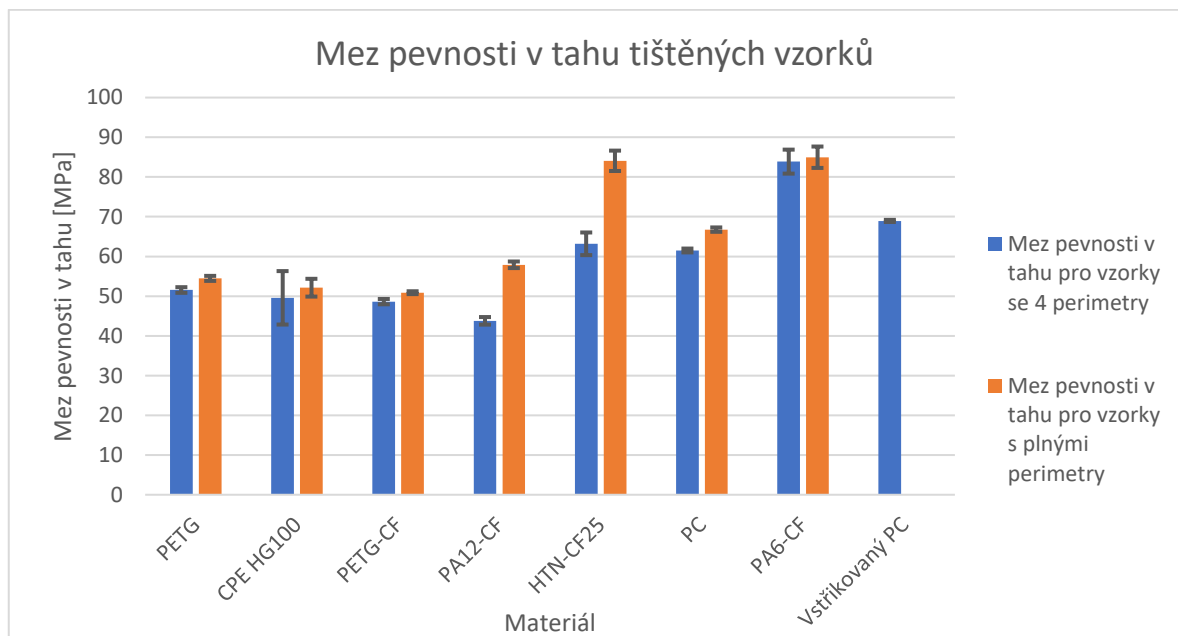
Materiál	4 perimetry+100% výplň	Plné perimetry	Rozdíl vrubových houževnatostí [%]
	Vrubová houževnatost [kJ·m ⁻²]	Vrubová houževnatost [kJ·m ⁻²]	
PETG	7,9	9,1	14,9
CPE-HG100	6,8	12,6	84,9
PETG-CF	3,4	3,2	-5,7
PA12-CF	24,3	30,4	25,2
HTN-CF25	9,2	8,2	-10,6
PC	40,4	116,5	188,6
PA6-CF	24,6	23,2	-5,6

6.3 Zkouška tahem tištěných vzorků

Výsledky zkoušky tahem ukazují na značné rozdíly mezi materiály i tiskovými parametry. U vzorků tištěných se 4 perimetry a 100% výplní dosáhl nejvyšší pevnosti v tahu materiál PA6-CF s průměrnou pevností 83,9 MPa, naopak na druhém konci ležel materiál PA12-CF, který stejně jako u zkoušky ohybem dosáhl při tomto nastavení tiskových parametrů nejnižší pevnosti v tahu, která v průměru činila 43,8 MPa. Rozdíl mezi nejvyšší

a nejnižší pevností tak činil 93 %. Druhé nejvyšší pevnosti v tahu dosáhl u této varianty materiál HTN-CF25 s pevností 63,2 MPa a na třetím místě skončil materiál PC s pevností 61,5 MPa. Rozdíly mezi těmito materiály a nejpevnějším materiálem PA6-CF tak činily 31,8 %, respektive 36,1 %.

U vzorků tištěných pouze z perimetrů zůstalo pořadí na prvních třech místech totožné. Nejvyšší pevnosti v tahu dosáhl s 85 MPa materiál PA6-CF, následovaný se zanedbatelným rozdílem jednoho procenta a pevností 84 MPa materiálem HTN-CF25 a materiálem PC s již výraznějším rozdílem 27,3 % a pevností v tahu v průměru 66,8 MPa. Nejnižší pevnosti v tahu dosáhl u této varianty materiál PETG-CF, což koresponduje s výsledky zkoušky ohybem. Výsledná pevnost 50,9 MPa je tedy oproti materiálu PA6-CF o 67 % nižší. Naměřené hodnoty jsou viditelné v Graf 3 a v Tab. 9.



Graf 3 Hodnoty meze pevnosti v tahu tištěných vzorků

Tab. 9 Výsledky zkoušky tahem tištěných vzorků

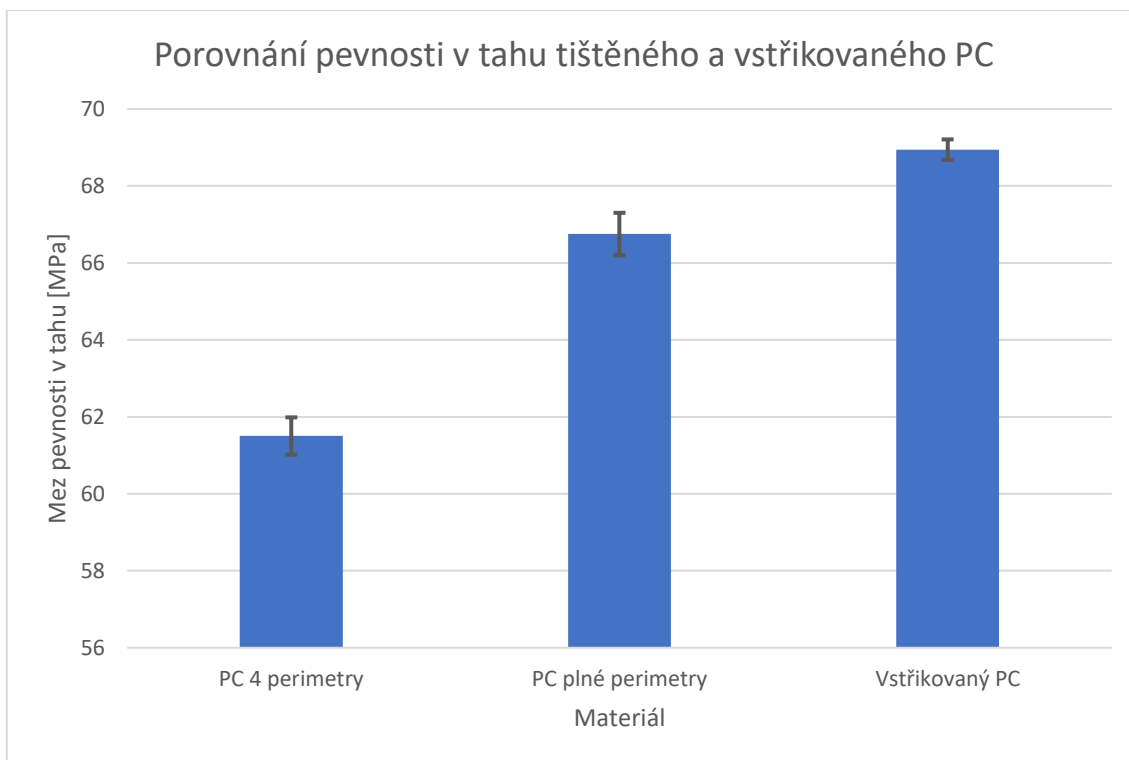
Materiál	4 perimetry+100% výplň		Plné perimetry	
	Pevnost v tahu [MPa]	Směrodatná odchylka [MPa]	Pevnost v tahu [MPa]	Směrodatná odchylka [MPa]
PETG	51,6	0,7	54,5	0,6
CPE-HG100	49,6	6,7	52,1	2,2
PETG-CF	48,6	0,7	50,9	0,4
PA12-CF	43,8	1,0	57,9	0,8
HTN-CF25	63,2	2,9	84,1	2,6
PC	61,5	0,5	66,8	0,6
PA6-CF	83,9	3,0	85,0	2,7

Z výsledků je tedy patrné, že hypotéza, kterou přednesl ve své práci Milsimer [12], je správná. U všech materiálů došlo ke zvýšení meze pevnosti v tahu při užití většího počtu perimetrů, rozdíly však nebyly velké (viz Tab. 10). U materiálů CPE HG100 a PA6-CF je však nutné brát v potaz taktéž směrodatné odchylky, které by mohly výsledky ovlivnit, jelikož ukazují určitý rozptyl naměřených hodnot. [12]

Tab. 10 Rozdíly pevností v tahu dle užitých parametrových šarží

	4 perimetry	Plné perimetry	
Materiál	Pevnost v tahu [MPa]	Pevnost v tahu [MPa]	Rozdíl pevností v tahu [%]
PETG	51,6	54,5	5,7
CPE-HG100	49,6	52,1	5,1
PETG-CF	48,6	50,9	4,6
PA12-CF	43,8	57,9	32,2
HTN-CF25	63,2	84,1	33,1
PC	61,5	66,8	8,5
PA6-CF	83,9	85,0	1,3

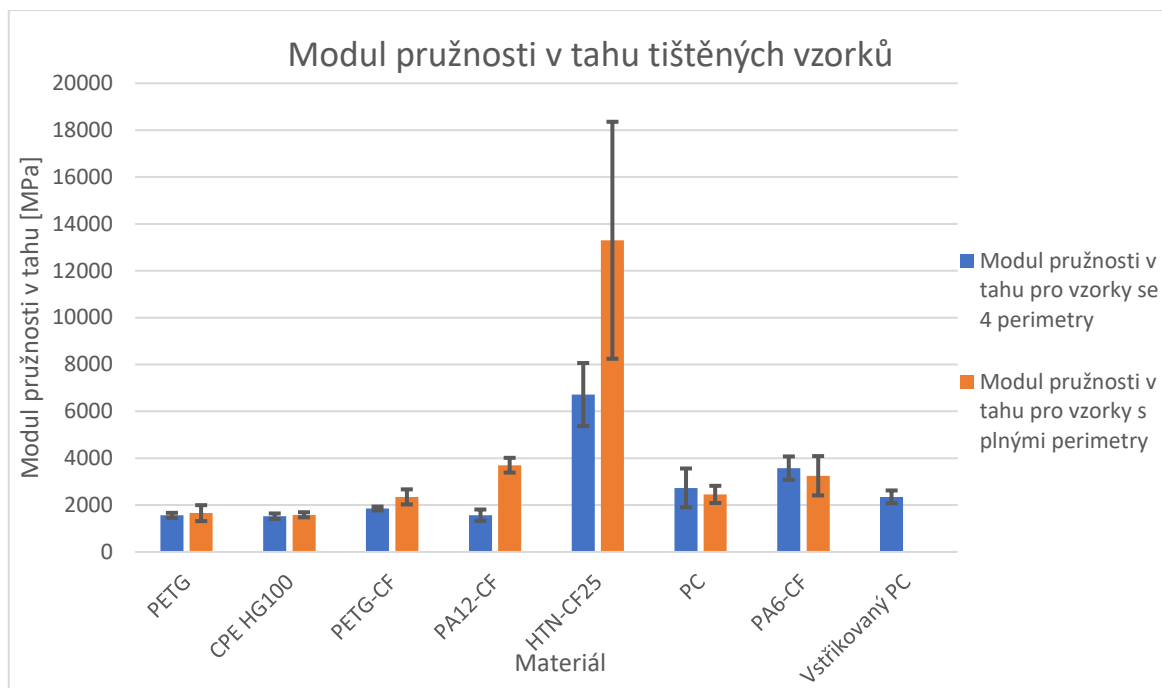
Pro účely informativního porovnání byly otestovány rovněž vzorky ze vstřikovaného polykarbonátu. Při sumarizaci výsledků dosáhl tento materiál čtvrté nejvyšší pevnosti v tahu, s průměrnou hodnotou 69 MPa se zařadil za materiál HTN-CF25 s plnými perimetry a za obě parametrové varianty materiálu PA6-CF, kdy rozdíl oproti nejvyšší naměřené pevnosti činil 23,3 %. Při přímém srovnání s tištěným polykarbonátem dosáhl vyšší pevnosti v tahu. Při použití 4 perimetrů byla pevnost v tahu tištěného polykarbonátu o 12,1 % nižší, při použití pouze perimetrů byla však nižší pouze o 3,3 % (viz Graf 4), což minimálně u tohoto materiálu indikuje možnost plnohodnotného nahrazení vstřikovaných dílů tištěnými při namáhání dílu ve směru perimetrů.



Graf 4 Porovnání pevnosti v tahu tištěného a vstříkovaného materiálu PC

Pro účely pevnostní analýzy a také obecných požadavků na materiál z hlediska deformace byl u všech materiálů vyhodnocen taktéž modul pružnosti v tahu (viz Graf 5 a Tab. 11). U vzorků se 4 perimetry dosáhl nejvyššího modulu pružnosti materiál HTN-CF25 s více než 6700 MPa, naopak nejnižšího modulu dosáhl materiál CPE HG100 s přibližně 1500 MPa, rozdíl mezi těmito materiály tedy činil 347 %. Nadprůměrných hodnot modulu pružnosti v tahu u této šarže vzorků dosáhly ještě materiály PA6-CF s necelými 3600 MPa a PC s necelými 2750 MPa. Tyto moduly však byly stále výrazně nižší oproti materiálu HTN-CF25, procentuální rozdíly činily 86 %, respektive 144 %.

Ještě vyšší pak byly rozdíly modulů pružnosti v tahu u vzorků tištěných s plnými perimetry. Nejvyššího modulu dosáhl opět materiál HTN-CF s hodnotou 13300 MPa. Tuto neobvykle vysokou hodnotu je však nutné brát s nutnou rezervou vzhledem k výrazné směrodatné odchylce měření, která mohla být způsobena drobnými tiskovými vadami. S výrazným rozdílem 260 % a hodnotou modulu pružnosti v tahu 3700 MPa se vyskytoval materiál PA12-CF a dále s rozdílem dalších 14 % a hodnotou modulu pružnosti 3250 MPa materiál PA6-CF. Nejnižšího modulu pružnosti v tahu ze všech materiálů pak dosáhl u této šarže materiál CPE HG100 s hodnotou rovnou necelých 1600 MPa. Procentuální rozdíl mezi nejvyšší a nejnižším modulem pružnosti je tak astronomických 731 %.



Graf 5 Hodnoty modulu pružnosti v tahu tištěných vzorků

Tab. 11 Výsledky měření modulu pružnosti v tahu tištěných vzorků

Materiál	4 perimetry+100% výplň		Plné perimetry	
	Modul pružnosti v tahu [MPa]	Směrodatná odchylka [MPa]	Modul pružnosti v tahu [MPa]	Směrodatná odchylka [MPa]
PETG	1563	106	1656	340
CPE-HG100	1525	118	1586	109
PETG-CF	1854	82	2350	322
PA12-CF	1571	241	3702	315
HTN-CF25	6716	1346	13301	5058
PC	2733	828	2457	365
PA6-CF	3577	499	3251	839

Mechanické zkoušky tedy ukázaly některé zajímavé výsledky. Ukázaly, že u materiálu PA12-CF velmi záleží na užitém počtu perimetrů. Při použití pouze 4 perimetrů dosahuje tento materiál nejhorších výsledků jak při zkoušce ohybem, tak při zkoušce tahem. Naopak při použití pouze perimetrů pevnost v ohybu i tahu výrazně vzrostla. Obecně platilo, že při srovnání s tabulkovými hodnotami (viz Tab. 12) dosáhly větší shody vzorky testované na ohyb, naopak u většiny materiálů byly výsledky zkoušky tahem výrazně horší než tabulkové. Tento fakt může být způsoben tím, že zkouška ohybem přišla na řadu jako první a konala se jen 72 hodin po dotištění posledních vzorků. Naopak zkouška tahem přišla z důvodu vytížení zkušebního stroje na řadu až po měsíci. Všechny vzorky byly po tu

dobu uchovány v uzavíratelných sáčcích, avšak i přes tuto ochranu mohlo dojít k navlhnutí vzorků a tím pádem i snížení pevnosti v tahu. Tento fakt však paradoxně vyhovuje výsledkům tohoto zkoumání, jelikož samotný nahrazovaný díl bude delší dobu pracovat v běžných podmínkách. U zkoušky vrubové houževnatosti se porovnání s tabulkovými hodnotami v některých případech značně lišilo, například naměřená vrubová houževnatost materiálu PETG-CF byla více než trojnásobně nižší, než udává materiálový list, naopak u materiálu PC a při použití plných perimetrů byla naměřená vrubová houževnatost více než čtyřnásobná oproti tabulkové. Tyto rozdíly mohly být způsobeny rozdílnými parametry, které uvedení výrobci použili pro vyhotovení testovacích vzorků.

Tab. 12 Porovnání výsledků mechanických zkoušek s tabulkovými hodnotami uváděnými výrobcí

Materiál	Pevnost v ohybu [MPa]	Datasheet [MPa]	Rozdíl [%]	Vrubová houževnatost [kJ·m ⁻²]	Datasheet [kJ·m ⁻²]	Rozdíl [%]	Pevnost v tahu [MPa]	Datasheet [MPa]	Rozdíl [%]
PETG	72,8	71	2,5	9,0	Neuvádí	-	54,5	50	9,0
CPE-HG100	69,7	71	-1,8	12,6	Neuvádí	-	52,1	48	8,6
PETG-CF	73,1	Neuvádí	-	3,4	11	-69,5	50,9	Neuvádí	-
PA12-CF	88,4	Neuvádí	-	30,4	15	102,9	57,9	120	-51,8
HTN-CF25	181,9	184	-1,2	9,2	9,2	-0,1	84,1	148	-43,2
PC	93,3	94,1	-0,9	116,5	25,1	364,0	66,8	59,7	11,8
PA6-CF	187,2	169	10,8	24,6	13,4	83,4	85,0	105	-19,1

6.4 Pevnostní analýza

Jako první byl proveden výpočet maximálního ohybového napětí ve zjednodušené formě, který předurčí limity a požadavky pro další měření. Páčka tedy byla v tomto výpočtu převedena na jednoduchý nosník o obdelníkovém průřezu, který je namáhán v ohybu osamocenou silou F , která leží na rameni ve vzdálenosti L a tvoří tak ohybový moment M . Z hodnoty ohybového momentu a také průřezového modulu v ohybu pak bylo možné vypočítat maximální napětí v ohybu σ_o .

Vstupními daty pro výpočet byly následující hodnoty:

- Síla zatěžování $F = 59 \text{ N}$
- Rameno působení síly $L = 64 \text{ mm}$
- Šířka nosníku ve směru působení síly $h = 10 \text{ mm}$
- Tloušťka nosníku $b = 4 \text{ mm}$

Maximální ohybový moment je tedy dle vztahu roven:

$$M_o = F \cdot L = 59 \cdot 64 = 3776 \text{ N} \cdot \text{mm} \quad (7)$$

Průřezová charakteristika vzorku zjednodušeného na obdélník je rovna:

$$W_o = \frac{b \cdot h^2}{6} = \frac{400}{6} = 66,7 \text{ mm}^3 \quad (8)$$

Maximální napětí v ohybu je tak rovno:

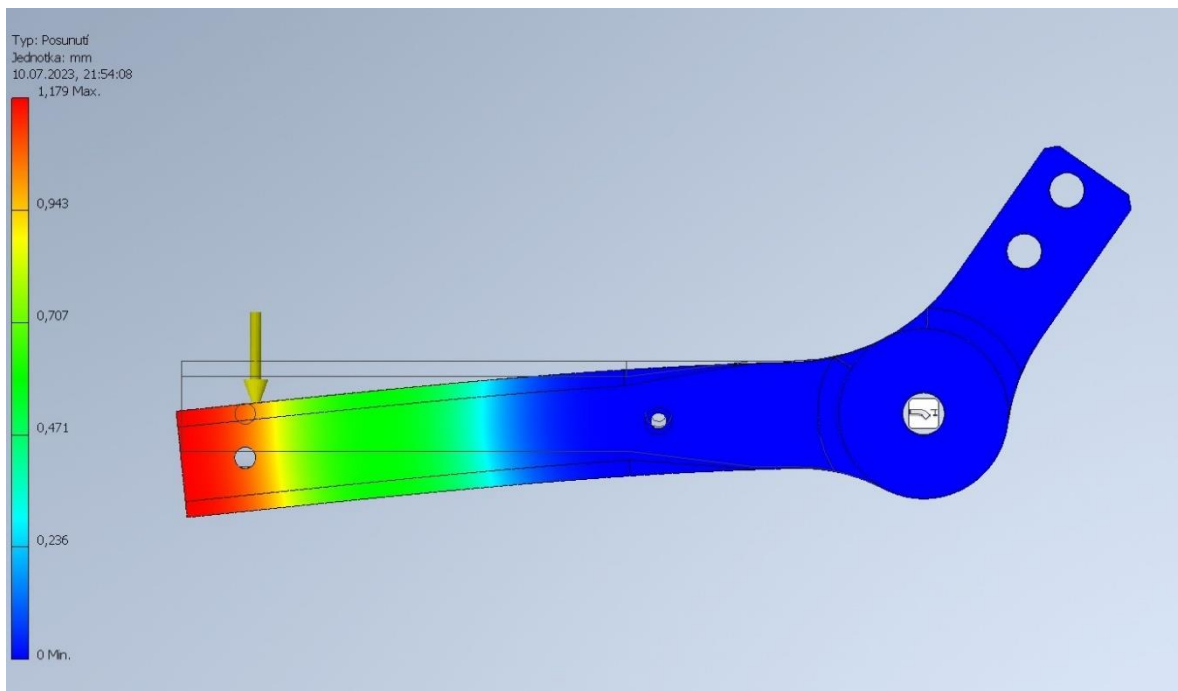
$$\sigma_o = \frac{M_o}{W_o} = \frac{3648}{66,67} = 56,6 \text{ MPa} \quad (9)$$

Při porovnání této hodnoty s naměřenými pevnostmi v ohybu je patrné, že pokud by se jednalo pouze o takto obecný odhad a jednoduchou reprezentaci tohoto případu, tak by všechny materiály i parametrové šarže tuto podmínku splňovaly.

Větším problémem z hlediska dimenzování páčky je ovšem porovnání s mezí pevnosti v tahu. Jelikož ohyb je kombinací tahového a tlakového namáhání, tak mez pevnosti v tahu hraje zásadní roli. Pro zjištění maximálního napětí tak byla provedena pevnostní analýza. Analýza jako výstup uvedla posunutí (průhyb) a výsledný součinitel bezpečnosti. Z těchto výsledků uvedených v Tab. 13 vyplývá, že reálnému zatížení by mělo odolat 6 ze 14 testovaných šarží, 2 další šarže jsou výsledkově velmi na hraně. Podmínku součinitele bezpečnosti většího než 1,2 však splňují pouze 4 šarže, a to šarže s plnými perimetry HTN-CF25, šarže s plnými perimetry PC a obě šarže materiálu PA6-CF. Nejvyšším součinitelem bezpečnosti disponuje šarže s plnými perimetry materiálu PA6-CF s hodnotou 1,54. Zbývající dvě až čtyři šarže se součinitelem bezpečnosti vyšších než 1 by tedy měly zatížení odolat, avšak pro použití by nebyly vhodné, jelikož se nachází až příliš blízko svému pevnostnímu limitu. Z těchto čtyřech použitelných šarží by měla teoreticky nejmenšího posunutí („průhybu“) dosáhnout šarže s plnými perimetry HTN-CF25 (viz Obr. 36).

Tab. 13 Výsledky pevnostní analýzy plastové páčky

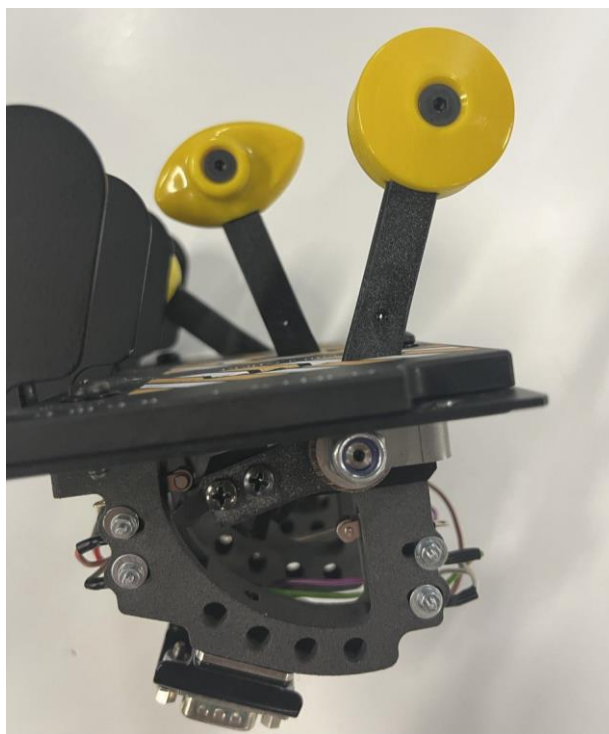
Materiál	Šarže	Posunutí [mm]	Součinitel bezpečnosti [-]	Měla by páčka zvládnout zatížení?	Splňuje páčka podmínku součinitele bezpečnosti?
PETG	4 perim	10,06	0,93	NE	NE
PETG	fullperim	9,50	0,98	Na hraně	NE
CPE HG100	4 perim	10,32	0,88	NE	NE
CPE HG100	fullperim	9,92	0,93	NE	NE
PETG-CF	4 perim	8,45	0,88	NE	NE
PETG-CF	fullperim	6,66	0,92	NE	NE
PA12-CF	4 perim	9,98	0,79	NE	NE
PA12-CF	fullperim	4,24	1,05	Na hraně	NE
HTN-CF25	4 perim	2,33	1,14	ANO	NE
HTN-CF25	fullperim	1,18	1,52	ANO	ANO
PC	4 perim	5,75	1,12	ANO	NE
PC	fullperim	6,40	1,21	ANO	ANO
PA6-CF	4 perim	4,38	1,52	ANO	ANO
PA6-CF	fullperim	4,82	1,54	ANO	ANO



Obr. 36 Vizualizace průhybu páčky pomocí pevnostní analýzy při maximálním zatížení (materiál HTN-CF25)

6.5 Testování mechanické odolnosti páček

Výsledky testování mechanické odolnosti páček ukázaly některé neočekávané výsledky. První částí bylo testování určitého počtu páček na samotném simulátoru za běžného provozu a cvičení pilotů. K testování byl vzhledem k nízké kapacitě vybrán pouze jeden náhodný vzorek od každého ze tří mechanicky nejodolnějších materiálů neboli HTN-CF25, PC a PA6-CF. Vzorky byly testovány reálnými piloty po dobu přibližně 30 letových dní. Každá z páček byla za tu dobu podrobena přibližně 300 testovacím cyklům. Po vyjmutí sestavy nouzového systému (viz Obr. 37) a následném zkoumání nevykazoval žádný ze vzorků žádný příznak porušení či deformace. Tyto vzorky byly následně vráceny zpět do simulátoru za účelem pokračování testování v dlouhodobém horizontu.



Obr. 37 Vyjmutí sestavy nouzového systému s páčkami po 30 letových dnech

Druhým testem bylo zatížení danou silou za pomoci speciálního přípravku. Volba částečně cyklického zatěžování měla ověřit, že vybraný materiál je vhodný nejen pro statické namáhání, ale odolá i komplexním zatížením. Ze 70 testovaných vzorků jich bez porušení vydrželo testování 59. K porušení některých vzorků došlo pouze u materiálů CPE HG 100 a PA12-CF. Určité míry plastické deformace dosáhly všechny testované vzorky, avšak míra deformace se v závislosti na použitém materiálu a parametrické šarži lišila. Výsledky testování jsou viditelné v Tab. 14.

Nejmenší plastické deformace dosáhly materiály, které dosáhly nejvyšší pevnosti v tahu i v ohybu a rovněž nadprůměrných hodnot z hlediska modulu pružnosti v tahu. Jedná se o materiály HTN-CF25, PC a PA6-CF. Tyto materiály tak toto zatížení přečkaly bez obtíží (viz Obr. 38). Obecně platí, že materiály s vyšším modulem pružnosti v tahu dosáhly nižší plastické deformace, a to však s jedinou výjimkou, kterou je materiál PA12-CF. Tento materiál dosáhl solidních hodnot vrubové houževnatosti, modulu pružnosti v tahu a u varianty s plnými perimetry rovněž solidních pevností v tahu i ohybu, avšak u 8 z 10 testovaných vzorků i tak došlo k poruše s tím, že zbylé vzorky dosáhly značné deformace. Oba vzorky, které odolaly bez porušení však byly paradoxně tištěné ve variantě se 4 perimetry, která disponovala dle pevnostní analýzy nejnižším součinitelem bezpečnosti ze všech testovaných šarží. U šarže s plnými perimetry byla bezpečnost blízko limitu, avšak stále vyšší než 1, přesto došlo k porušení všech vzorků. K tomuto výsledku mohl přispět fakt, že se vzorky z materiálu PA12-CF deformovaly nejen ve směru zatížení, ale i ve směru kolmém, docházelo tak ke krutu. Tento efekt byl rovněž patrný u materiálu PA6-CF, zde však byla odolnost materiálu výrazně vyšší, nedošlo k poruše vzorku a po odlehčení tento krut prakticky úplně zmizel a vzorek se vrátil do původního stavu.



Obr. 38 Deformace vzorku (PC, plné perimetry)

Tab. 14 Výsledky domácího testování odolnosti tištěných páček

Materiál/šarže	Výdrž zatížení	Průměrná deformace [1-10]
PETG 4perim	5x OK	3,4
PETG fullperim	5x OK	3,3
CPE HG100 4perim	2x OK, 3x KO	8,6
CPE HG100 fullperim	5x OK	3,5
PETG-CF 4perim	5x OK	3,4
PETG-CF fullperim	5x OK	3,1
PA12-CF 4perim	2x OK, 3x KO	8,7
PA12-CF fullperim	5x KO	10
HTN-CF25 4perim	5x OK	1,4
HTN-CF25 fullperim	5x OK	1,3
PC 4perim	5x OK	2
PC fullperim	5x OK	1,8
PA6-CF 4perim	5x OK	2
PA6-CF fullperim	5x OK	1,7

Naopak opačného výsledku dosáhly materiály PETG a PETG-CF. Součinitel bezpečnosti těchto materiálů byl ve všech případech menší než 1 (nutno podotknout, že u materiálu PETG a šarže s plnými perimetry však velmi těsně), přesto však všechny vzorky tištěné z těchto materiálů testovacímu zatížení odolaly a míra deformace zde nebyla nijak zvlášť vysoká. Speciálně u materiálu PETG-CF se jedná o velmi překvapivé zjištění, jelikož dle výsledků mechanických zkoušek (meze pevnosti v tahu a vrubové houževnatosti) a odhadů tento materiál neměl tomuto zatížení odolat anebo měl odolat jen s velkými obtížemi. Přesto však u těchto vzorků nedošlo k lomu nebo výrazné deformaci ani například ke kroucení ramene páčky. Tato skutečnost mohla být spojena s více faktory, například vynikající adhezí vrstev, nepřesnou pevnostní analýzou anebo jednoduše tím, že materiály nebyly testovány po dostatečně dlouhou dobu a k jejich porušení by došlo později. Tato problematika bude podrobena vlastnímu zkoumání.

Z výsledků testování při porovnání s pevnostní analýzou je patrné, že tento typ odhadu životnosti a odolnosti materiálu je u 3D tisku bohužel vzhledem ke své anizotropii a nestálosti vlastností velmi špatně použitelný. Analýza dokázala relativně přesně odhadnout průhyby vzorku, avšak mechanická odolnost ve spojitosti se součinitelem bezpečnosti, a hlavně místa porušení vzorku se v některých případech lišila. Z hlediska místa porušení některých vzorků je na vině možná tvorba drobných defektů či vrubů během tisku, se kterými však analýza nedokáže počítat. Například většina nevyhovujících vzorků se porušila v místě obvodových perimetrů otvoru na rameni páčky (viz Tab. 15). Specificky při

použití pouze perimetrů došlo k porušení v tomto místě u všech vzorků (viz. Obr. 39). Tato skutečnost může být způsobena defektem či nedostatečným rozlišením tisku při vyplňování malých mezer při navazování perimetrů. Mechanickou odolnost v delším časovém horizontu a její spojitost se součinitelem bezpečnosti je však nutné v čase nadále zkoumat.



Obr. 39 Vzorek porušený mimo koncentrátor napětí (PA12-CF, plné perimetry)

Tab. 15 Popis porušených vzorků při testování mechanické odolnosti

Materiál	Šarže	Číslo vzorku	Čas porušení	Došlo k porušení vzorku?	Porušil se vzorek v místě koncentrátoru napětí?	Porušení
CPE HG100	4perim	2	0:01	ANO	NE	Porušení mezi koncentrátorem a otvorem
CPE HG100	4perim	4	0:30	ANO	ANO	Porušení v koncentrátoru
CPE HG100	4perim	5	5:05	ANO	NE	Porušení v perimetrech otvoru
PA12-CF	4perim	2	4:20	ANO	ANO	Porušení v koncentrátoru
PA12-CF	4perim	4	3:05	ANO	ANO	Porušení v koncentrátoru
PA12-CF	4perim	5	2:50	ANO	NE	Porušení mezi koncentrátorem a otvorem
PA12-CF	fullperim	P1	0:40	ANO	NE	Porušení v perimetrech otvoru
PA12-CF	fullperim	P2	0:15	ANO	NE	Porušení v perimetrech otvoru
PA12-CF	fullperim	P3	2:05	ANO	NE	Porušení v perimetrech otvoru
PA12-CF	fullperim	P4	0:10	ANO	NE	Porušení v perimetrech otvoru
PA12-CF	fullperim	P5	0:45	ANO	NE	Porušení v perimetrech otvoru

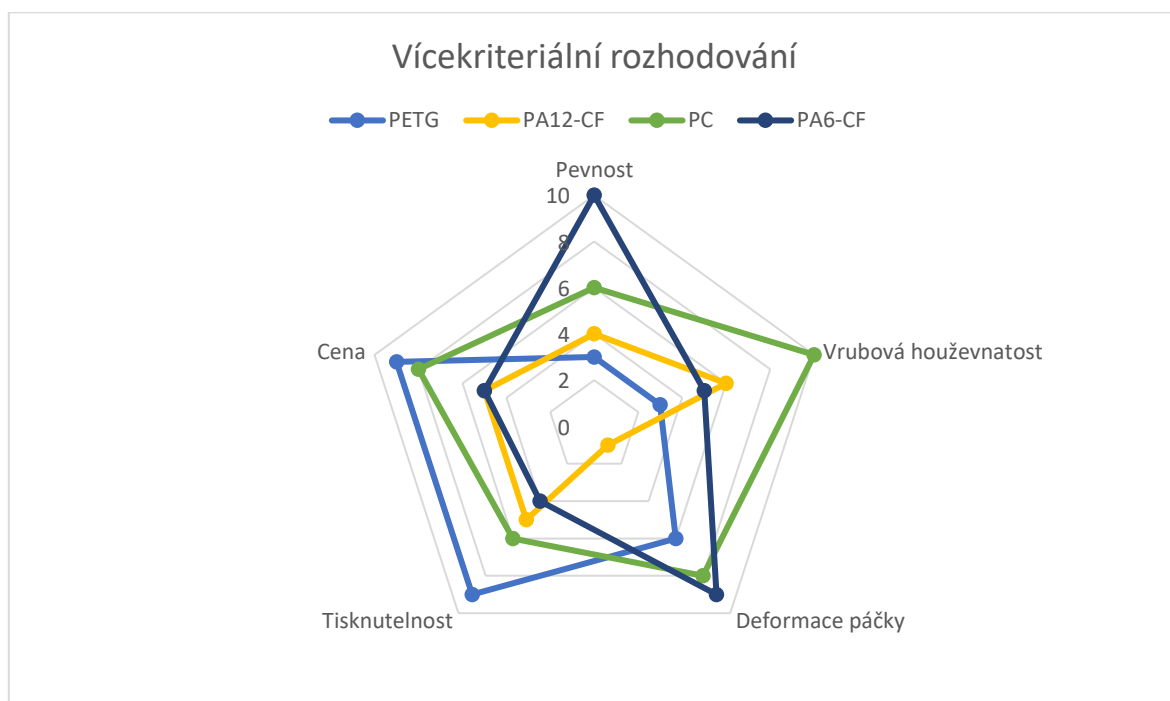
6.6 Vícekriteriální rozhodování

Z důvodu vyhodnocení a výběru vhodného materiálu pro 3D tisk páčky nouzového hydraulického systému v leteckém simulátoru bylo vybráno vícekriteriální rozhodování pomocí bodovací metody za pomoci tří hodnotících expertů. Mezi hodnotící kritéria patřila pevnost, vrubová houževnatost, míra deformace po testování, tisknutelnost a také cena. Materiály CPE HG100 a PA12-CF byly do analýzy rovněž zařazeny, i když nesplňují základní zadání, a to odolnost tištěné páčky proti porušení při testování. Zařazeny jsou z důvodu inspirace pro potenciální podobné projekty, kde by se však zatěžující síla a způsob namáhání mohly lišit. U všech hodnotících kritérií byla stanovena stupnice od jedné do deseti se sestupnou tendencí dle bodovací metody. [59]

Pro zajištění větší objektivity výsledků tohoto zkoumání byla míře deformace páčky přiřazena dvojnásobná váha a ceně váha o polovinu vyšší oproti běžné. Bylo tak učiněno z důvodů specifikace těchto požadavků zadavatelem. Každý ze tří expertů provedl bodování a následně byl u každého kritéria stanoven průměr s tím, že výsledné hodnoty byly zaokrouhleny na celá čísla. Hodnocení variant pro tento konkrétní případ je viditelné v Tab. 16 a grafické znázornění vícekriteriálního hodnocení pro náhodně vybrané 4 materiály je viditelné v Graf 6.

Tab. 16 Vícekriteriální rozhodování

Materiál	Kritéria					Součet	Pořadí
	Pevnost	Vrubová houževnatost	Deformace páčky	Tisknutelnost	Nákladovost		
PETG	3	3	6	9	9	40,5	3.
CPE HG100	2	4	3	9	8	33	6.
PETG-CF	2	1	6	8	7	33,5	5.
PA12-CF	4	6	1	5	5	24,5	7.
HTN-CF25	10	3	10	4	1	38,5	4.
PC	6	10	8	6	8	50	1.
PA6-CF	10	5	9	4	5	44,5	2.



Graf 6 Graficky znázorněné vícekriteriální rozhodování pro 4 náhodně vybrané materiály

7 Diskuze

Z výsledků vícekriteriálního rozhodování vyplývá, že po zahrnutí vícera faktorů je nejméně výhodným materiálem pro tuto aplikaci materiál PC. Dosahuje totiž dostačující pevnosti, výborné vrubové houževnatosti, malé deformace a také příznivé ceny. Tisknutelnost tohoto materiálu je taktéž dobrá, je však vhodné mít k dispozici tiskárnu s pasivně či aktivně vyhřívanou komorou.

Vhodnými materiály pro použití jsou rovněž materiály PA6-CF a HTN-CF25, které vykazují vynikající pevnostní vlastnosti a malou míru deformace. Jsou tedy vhodné pro ty nejvíce namáhané součásti. Jejich nevýhodou je poté nižší hodnota vrubové houževnatosti, což může mít za následek horší únavové vlastnosti při dynamickém namáhání. Dalšími nevýhodami jsou poté vyšší cena materiálů a vzhledem k výrazné navlhavosti také horší tisknutelnost.

Velmi dobrého výsledku při posuzování variant dosáhl materiál PETG. Tento materiál je levný, snadno tisknutelný a s menší mírou deformace odolal i testovacímu zatížení. Pokud by tedy navrhovaný díl obecně nebyl tak často a intenzivně namáhaný a důležitým kritériem by byla cena a také dostupná technika (například méně pokročilá tiskárna bez vyhřívané komory, abrazivně odolné trysky, tiskové hlavy s nízkou teplotní odolností apod.), tak by se jednalo o velmi vhodnou alternativu k výše zmíněným technickým materiálům.

V návaznosti na předcházející odstavec a obecně na výsledky testování je nutné zmínit, že pro ověření a potvrzení výsledků by bylo vhodné provést u všech materiálů dlouhodobé testování s cílem získání únavových vlastností a také průběžné testování v delším časovém horizontu pro zjištění případné rozdílné míry degradace jednotlivých materiálů. Toto testování tak bude předmětem dalšího dlouhodobého zkoumání.

Pro ilustraci by bylo rovněž vhodné zařadit porovnání vybraných materiálů s původní slitinou hliníku. Jedná se o vysoce pevnou slitinu užívanou v leteckém a automobilovém průmyslu. Dosahuje pevnosti v tahu až 470 MPa při tažnosti 5 % [60]. Experimentálně zjištěná mez pevnosti v tahu nejpevnějšího z plastů (PA6-CF) tak je o 453 % nižší. Většina vybraných materiálů však i přes tento rozdíl vyhovuje při použití v leteckém simulátoru z hlediska požadavků na mechanickou odolnost. Hliníková slitina by tak pro tuto aplikaci nebyla ekonomicky i logisticky vhodnou volbou. Nevýhodou této slitiny je totiž vysoká cena

a celková nevýhodnost jejího použití pro kusovou až malosériovou výrobu, což je ostatně motivací a cílem této práce. Žádný z těchto materiálů by ovšem nebylo možné využít pro aplikaci přímo v letadle, jelikož dle certifikačních mechanismů musí nový materiál i přes cenovou výhodnost a experimentálně zjištěný vyhovující součinitel bezpečnosti minimálně dorovnat, ideálně však překonat vlastnosti stávajícího materiálu. Pro přímé použití v letectví by byl vhodnější kovový 3D tisk. [60]

8 Závěr

Cílem této práce bylo vybrat vhodný materiál pro náhradu hliníkové páčky nouzového hydraulického systému v leteckém simulátoru za pomoci plastového 3D tisku, čehož bylo dosaženo. Pro svou jednoduchost, cenovou nenáročnost a rozšířenost byla vybrána technologie Fused Deposition Modeling (FDM). Teoretická část se věnovala vybrané technologii tisku, tiskovým materiálům, tiskovým parametrům a také certifikaci materiálů pro použití v letectví. Pro testování bylo vybráno celkem 7 různých tiskových materiálů (PETG, CPE HG100, PETG-CF, PA12-CF, HTN-CF25, PC a PA6-CF) a 2 šarže tiskových parametrů lišících se v počtu perimetrů (4 perimetry ve spojitosti se 100% výplní a pouze perimetry).

U zvolených materiálů byly zjištěny základní mechanické vlastnosti za pomoci normovaných zkoušek. Byla provedena zkouška ohybem, zkouška rázové houževnatosti metodou Charpy a také zkouška tahem. Kromě následného testování tištěných páček byla rovněž provedena analýza, která měla za cíl dopředu určit, zdali daný vzorek odolá namáhání. Tento odhad obsahoval výpočet maximálního napětí v ohybu a také pevnostní analýzu v programu Autodesk Inventor.

Testování tištěných páček se skládalo ze dvou částí, a to testování odolnosti za pomoci speciálního přípravku a daného zatížení a také testování v delším časovém horizontu na samotném simulátoru. K testování na simulátoru byly vzhledem k nízké testovací kapacitě vybrány 3 mechanicky nejodolnější materiály, a to HTN-CF25, PC a PA6-CF. Všechny tyto materiály odolaly přibližně 300 testovacím cyklům bez známky porušení či deformace. Testování odolnosti za pomoci závaží a speciálního přípravku odolalo celkem 5 ze 7 materiálů. U všech materiálů se vlivem delšího opakovaného statického zatížení objevila určitá míra trvalé deformace, avšak v některých případech byla tato deformace velmi malá.

Experiment mimo jiné ukázal, že použití pevnostní analýzy pro 3D tištěné vzorky není vhodné jak z hlediska určení odolnosti, tak případné predikce místa porušení vzorku, jelikož analýza není schopna predikovat různé drobné defekty a další specifika technologie FDM. Výsledky byly po vyhodnocení shrnuty do vícekritériálního rozhodování, které jako nejvhodnější materiál určilo polykarbonát (PC). Všechny cíle diplomové práce byly splněny.

Seznam použité literatury

- [1] GIBSON, Ian, David ROSEN a Brent STUCKER, 2015. *ADDITIVE MANUFACTURING TECHNOLOGIES*. 2nd ed. New York: Springer. ISBN 978-1-4939-2112-6.
- [2] TURNOVCOVÁ, Jiřina, 2021. *Technologické možnosti 3D tisku metodou DLP*. Praha. Bakalářská práce. ČVUT v Praze. Vedoucí práce Ing. Libor Beránek, Ph.D.
- [3] HAINES, Justin, 2022. History of 3D Printing: When Was 3D Printing Invented?. *All3DP* [online]. 29.4.2022 [cit. 2023-07-20]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/history-of-3d-printing-when-was-3d-printing-invented/>
- [4] The History of 3D Printing: 3D Printing Technologies from the 80s to Today. *Sculpteo* [online]. [cit. 2023-07-20]. Dostupné z: <https://www.sculpteo.com/en/3d-learning-hub/basics-of-3d-printing/the-history-of-3d-printing/>
- [5] The First Fuel-Efficient 3D Printed Car is Back on the Map, 2018. *Stratasys* [online]. 13.11.2018 [cit. 2023-07-20]. Dostupné z: <https://www.stratasys.com/en/stratasysdirect/resources/articles/3d-printed-car-fuel-efficient-fdm-urbee-2/>
- [6] The Best Free 3D Printing Software in 2023, 2023. *All3DP* [online]. All3DP, 27.5.2023 [cit. 2023-07-20]. Dostupné z: <https://all3dp.com/1/best-free-3d-printing-software-3d-printer-program/#section-design-software>
- [7] BAUM, Howie. NEW MEDICAL USES OF 3D AND 4D PRINTING. *University of Cincinnati* [online]. [cit. 2023-07-20]. Dostupné z: <https://www.uc.edu/content/dam/uc/ce/docs/OLLI/Page%20Content/NEW%20MEDICAL%20USES%20OF%203D%20AND%204D%20PRINTING%20revised%202.pdf>
- [8] WANG, Pengwen, Jing YANG, Yanan HU, Jiaofei HUO a Xiaoyang FENG, 2021. Innovative design of a helmet based on reverse engineering and 3D printing. *Alexandria Engineering Journal*. **60**(3), 3445-3453. ISSN 11100168. Dostupné z: doi:10.1016/j.aej.2021.02.006

- [9] DOSHI, Manav, Ameya MAHALE, Suraj KUMAR SINGH a Samadhan DESHMUKH, 2022. Printing parameters and materials affecting mechanical properties of FDM-3D printed Parts: Perspective and prospects. *Materials Today: Proceedings* [online]. **50**, 2269-2275 [cit. 2023-07-20]. ISSN 22147853. Dostupné z: doi:10.1016/j.matpr.2021.10.003
- [10] Bowden Extruder or a Direct Drive Extruder: Which is Better?, 2022. *Manufactur3D* [online]. Manufactur3D, 13.7.2022 [cit. 2023-07-20]. Dostupné z: <https://manufactur3dmag.com/bowden-extruder-or-a-direct-drive-extruder/>
- [11] 3D Printing Concepts and 3D Printer Parts, 2020. *Leapfrog* [online]. [cit. 2023-07-20]. Dostupné z: <https://www.lpfrg.com/guides/3d-printing-concepts-and-3d-printer-parts/>
- [12] MILSIMER, Petr. *Vliv perimetrů na mechanické vlastnosti plastových 3D tištěných dílů*. Praha, 2021. Bakalářská práce. ČVUT v Praze, Fakulta strojní. Vedoucí práce Ing. Vladislav Andronov.
- [13] O'CONNELL, Jackson. The Types of FDM 3D Printers: Cartesian, CoreXY & More. *All3DP* [online]. All3DP, 2023 [cit. 2023-07-20]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/cartesian-3d-printer-delta-scara-belt-corexy-polar/>
- [14] HOOPER, Shane. CoreXY Kinematics. *3D DISTRIBUTED* [online]. 2021 [cit. 2023-07-20]. Dostupné z: <https://3ddistributed.com/corexy-3d-printer/corexy-kinematics/>
- [15] Luzanin, Ognjan & Movrin, Dejan & Plancak, M.. (2014). Effect of layer thickness, deposition angle, and infill on maximum flexural force in FDM-built specimens. *Journal for Technology of Plasticity*. 39.
- [16] TORRES, Jonathan, José COTELO, Justin KARL a Ali P. GORDON. Mechanical Property Optimization of FDM PLA in Shear with Multiple Objectives. *JOM* [online]. 2015, **67**(5), 1183-1193 [cit. 2023-07-20]. ISSN 1047-4838. Dostupné z: doi:10.1007/s11837-015-1367-y

- [17] TURA, Amanuel Diriba, Hirpa G. LEMU a Hana Beyene MAMO. Experimental Investigation and Prediction of Mechanical Properties in a Fused Deposition Modeling Process. *Crystals* [online]. 2022, **12**(6) [cit. 2023-07-20]. ISSN 2073-4352. Dostupné z: doi:10.3390/cryst12060844
- [18] PANDZIC, Adi, Damir HODZIC a Aleksa MILOVANOVIC. Effect of Infill Type and Density on Tensile Properties of PLA Material for FDM Process. *Proceedings of the 30th International DAAAM Symposium 2019* [online]. DAAAM International Vienna, 2019, 2019, 0545-0554 [cit. 2023-07-20]. DAAAM Proceedings. ISBN 9783902734228. Dostupné z: doi:10.2507/30th.daaam.proceedings.074
- [19] ABEYKOON, Chamil, Pimpisut SRI-AMPHORN a Anura FERNANDO. Optimization of fused deposition modeling parameters for improved PLA and ABS 3D printed structures. *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture* [online]. 2020, **3**(3), 284-297 [cit. 2023-07-20]. ISSN 25888404. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijlmm.2020.03.003
- [20] ĆWIKŁA, G, C GRABOWIK, K KALINOWSKI, I PAPROCKA a P OCIEPKA. The influence of printing parameters on selected mechanical properties of FDM/FFF 3D-printed parts. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* [online]. 2017, **227** [cit. 2023-07-20]. ISSN 1757-8981. Dostupné z: doi:10.1088/1757-899X/227/1/012033
- [21] YU, Wangwang, Jianan SHI, Liwei SUN a Wen LEI. Effects of Printing Parameters on Properties of FDM 3D Printed Residue of Astragalus/Poly(lactic Acid) Biomass Composites. *Molecules* [online]. 2022, **27**(21) [cit. 2023-07-20]. ISSN 1420-3049. Dostupné z: doi:10.3390/molecules27217373
- [22] GUESSASMA, Sofiane, Sofiane BELHABIB a Hedi NOURI. Effect of printing temperature on microstructure, thermal behavior and tensile properties of 3D printed nylon using fused deposition modeling. *Journal of Applied Polymer Science* [online]. 2021, **138**(14) [cit. 2023-07-20]. ISSN 0021-8995. Dostupné z: doi:10.1002/app.50162

- [23] MIAZIO, Łukasz. Impact of Print Speed on Strength of Samples Printed in FDM Technology. *Agricultural Engineering* [online]. 2019, **23**(2), 33-38 [cit. 2023-07-20]. ISSN 2449-5999. Dostupné z: doi:10.1515/agriceng-2019-0014
- [24] WANG, Peng, Bin ZOU, Shouling DING, Lei LI a Chuanzhen HUANG. Effects of FDM-3D printing parameters on mechanical properties and microstructure of CF/PEEK and GF/PEEK. *Chinese Journal of Aeronautics* [online]. 2021, **34**(9), 236-246 [cit. 2023-07-20]. ISSN 10009361. Dostupné z: doi:10.1016/j.cja.2020.05.040
- [25] ERYILDIZ, Meltem. Effect of Build Orientation on Mechanical Behaviour and Build Time of FDM 3D-Printed PLA Parts: An Experimental Investigation. *European Mechanical Science* [online]. 2021, **5**(3), 116-120 [cit. 2023-07-20]. ISSN 2587-1110. Dostupné z: doi:10.26701/ems.881254
- [26] NARASAMMAN, Misalini, Mohd Juzaila ABD LATIF, Lim GUO DONG, Adila Fazliana CHE MANAN, Mohd RIZAL ALKAHARI, Mohd SHUKRI YOB, Nur Hidayah Mohd YUSO a Parathythasan RAJAANDRA. Effect of printing orientation on tensile properties of 3D printed polylactic acid material. *Universiti Teknikal Malaysia Melaka* [online]. 2022, 2 [cit. 2023-07-20]. Dostupné z: https://www3.utm.edu.my/care/proceedings/merd22/pdf/02%20Additive%20Manufacturing/020_p41_42.pdf
- [27] LEE, Chun-Ying a Chung-Yin LIU. The influence of forced-air cooling on a 3D printed PLA part manufactured by fused filament fabrication. *Additive Manufacturing* [online]. 2019, **25**, 196-203 [cit. 2023-07-20]. ISSN 22148604. Dostupné z: doi:10.1016/j.addma.2018.11.012
- [28] TOOR, Ravi. The UK 3D Printing Filament Market in 2021. *Filamentive* [online]. Filamentive, 2021, 28.2.2021 [cit. 2023-07-20]. Dostupné z: <https://www.filamentive.com/the-uk-3d-printing-filament-market/>
- [29] KALIA, Susheel a Luc AVÉROUS. *Biodegradable and Biobased Polymers for Environmental and Biomedical Applications* [online]. 2016-02-18 [cit. 2023-07-20]. Dostupné z: doi:10.1002/9781119117360

- [30] ECHEVERRÍA, Coro, Irene LIMÓN, Alexandra MUÑOZ-BONILLA, Marta FERNÁNDEZ-GARCÍA a Daniel LÓPEZ. Development of Highly Crystalline Polylactic Acid with β -Crystalline Phase from the Induced Alignment of Electrospun Fibers. *Polymers* [online]. 2021, **13**(17) [cit. 2023-07-20]. ISSN 2073-4360. Dostupné z: doi:10.3390/polym13172860
- [31] WHAT IS PETG? (EVERYTHING YOU NEED TO KNOW). *TWI* [online]. [cit. 2023-07-20]. Dostupné z: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/what-is-petg#HowisitMade>
- [32] PETG. *ChemSpider* [online]. [cit. 2023-07-20]. Dostupné z: <http://www.chemspider.com/Chemical-Structure.2015567.html>
- [33] ABS Plastic Filament Engineering Information. *Engineers Edge* [online]. [cit. 2023-07-20]. Dostupné: https://www.engineersedge.com/3D_Printing/abs_plastic_filament_engineering_information_14211.htm
- [34] All About ABS 3D Printing Filament: Materials, Properties, Definition. *Xometry* [online]. 2022, 19.9.2022 [cit. 2023-07-20]. Dostupné z: <https://www.xometry.com/resources/3d-printing/abs-3d-printing-filament/>
- [35] PC (Polycarbonate): FDM Thermoplastic Filament. *Stratasys* [online]. 2021 [cit. 2023-07-20]. Dostupné z: https://www.stratasys.com/siteassets/materials/materials-catalog/fdm-materials/pc/mds_fdm_pc_0422a.pdf
- [36] Comprehensive Guide on Polycarbonate (PC). *Omnexus* [online]. Omnexus [cit. 2023-07-20]. Dostupné z: <https://omnexus.specialchem.com/selection-guide/polycarbonate-pc-plastic>
- [37] BERRY, Peter. Rozdíl mezi Nylonem 6 a Nylonem 66. *STREPHONSAYS* [online]. 2021, 11.8.2021 [cit. 2023-07-20]. Dostupné z: <https://cs.strephonsays.com/difference-between-nylon-6-and-nylon-66>
- [38] DUDDLESTON, Lukas. Polyamide (Nylon) 12 Degradation during the Selective Laser Sintering (SLS) Process: A Quantification for Recycling Optimization. *ResearchGate* [online]. University of Wisconsin–Madison, 2015, 119 stran [cit. 2023-07-20]. Dostupné z: doi:10.13140/RG.2.1.3548.8487

- [39] Everything You Need to Know About Nylon Filament for 3D Printing. *BCN3D* [online]. 2020, 5.2.2020 [cit. 2023-07-20]. Dostupné z: <https://www.bcn3d.com/everything-you-need-to-know-about-nylon-filament-for-3d-printing/>
- [40] Comprehensive Guide on Thermoplastic Polyurethanes (TPU). *Omnexus* [online]. [cit. 2023-07-20]. Dostupné z: <https://omnexus.specialchem.com/selection-guide/thermoplastic-polyurethanes-tpu>
- [41] TPU Material. *Tractus3D* [online]. [cit. 2023-07-20]. Dostupné z: <https://tractus3d.com/materials/tpu/>
- [42] *Certification Specifications, Acceptable Means of Compliance and Guidance Material for Large Rotorcraft: CS-29*. In: . European Union Aviation Safety Agency, 2021, číslo 9. Dostupné také z: <https://www.easa.europa.eu/en/document-library/certification-specifications/cs-29-amendment-9>
- [43] Norsk Titanium to Deliver the World's First FAA-Approved, 3D-Printed, Structural Titanium Components to Boeing. *Norsk Titanium* [online]. Oslo, 2017, 10.4.2017 [cit. 2023-07-20]. Dostupné z: <https://www.norsktitanium.com/media/press/norsk-titanium-to-deliver-the-worlds-first-faa-approved-3d-printed-structural-titanium-components-to-boeing>
- [44] PEARSON, Aaron. Stratasys additive manufacturing chosen by Airbus to produce 3D printed flight parts. *Stratasys* [online]. 2020, 24.3.2020 [cit. 2023-07-20]. Dostupné z: <https://www.stratasys.com/en/resources/blog/airbus-3d-printing/>
- [45] First titanium 3D-printed part installed into serial production aircraft. *Airbus* [online]. 2017, 13.9.2017 [cit. 2023-07-20]. Dostupné z: <https://www.airbus.com/en/newsroom/press-releases/2017-09-first-titanium-3d-printed-part-installed-into-serial-production>
- [46] Boeing and Norsk Titanium recognised for metal additively manufactured structural components. *Metal AM* [online]. 2018, 25.1.2018 [cit. 2023-07-20]. Dostupné z: <https://www.metal-am.com/boeing-norsk-titanium-recognised-metal-additively-manufactured-structural-components/>
- [47] *Certification Memorandum: Additive Manufacturing*. In: . European Union Aviation Safety Agency, 2021, číslo 03. Dostupné také z:

https://www.easa.europa.eu/sites/default/files/dfu/cm-s-008_issue_03_-_final_post_consultation.pdf

[48] First airline MRO under EASA to design, certify and fly 3D printed parts. *Etihad Engineering* [online]. 2017, 8.2.2017 [cit. 2023-07-20]. Dostupné z: <https://www.etihadengineering.com/media/news/2017/etihad-airways-engineering-3d-printing-easa.html>

[49] *Recommended Guidance for Certification of AM Component*. In: . *Aerospace Industries Association*, 2020. Dostupné také z: <https://www.aia-aerospace.org/wp-content/uploads/AIA-Additive-Manufacturing-Best-Practices-Report-Final-Feb2020.pdf>

[50] AS/EN 9100. TÜV SÜD [online]. [cit. 2023-07-20]. Dostupné z: <https://www.tuvsud.com/cs-cz/cinnosti/audity-a-certifikace-systemu/as-en-9100-certifikace-systemu-rizeni-kvality-v-letectvi>

[51] CPE. *Prusa Research* [online]. Praha, 2021 [cit. 2023-07-20]. Dostupné z: https://help.prusa3d.com/article/cpe_166877

[52] Essentium HTN-CF25. *Essentium* [online]. [cit. 2023-07-20]. Dostupné z: <https://essentium.com/product/essentium-htn-cf25/>

[53] PANDZIC, Adi, Damir HODZIC a Aleksa MILOVANOVIC. Influence of Material Colour on Mechanical Properties of PLA Material in FDM Technology. *Proceedings of the 30th International DAAAM Symposium 2019* [online]. DAAAM International Vienna, 2019, 2019, 0555-0561 [cit. 2023-07-20]. DAAAM Proceedings. ISBN 9783902734228. Dostupné z: doi:10.2507/30th.daaam.proceedings.075

[54] ČSN EN ISO 178. *Plasty - Stanovení ohybových vlastností*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2019.

[55] ČSN EN ISO 179-1. *Plasty - Stanovení rázové houževnatosti metodou Charpy: Část 1: Neinstrumentovaná rázová zkouška*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.

[56] ČSN EN ISO 527-2. *Plasty - Stanovení tahových vlastností - Část 2: Zkušební podmínky pro tvářené plasty*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012.

[57] ČSN EN ISO 527-1. Plasty - Stanovení tahových vlastností - Část 1: Obecné principy. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012.

[58] NASA-STD-3000, Man-System Integration Standards: HUMAN PERFORMANCE CAPABILITIES. *National Aeronautics and Space Administration: NASA* [online]. 1995 [cit. 2023-07-20]. Dostupné z: <https://msis.jsc.nasa.gov/sections/section04.htm>

[59] SOUKOPOVÁ, Jana. Vícekriteriální metody hodnocení. *Informační systém Masarykovy univerzity* [online]. Brno: MUNI [cit. 2023-07-20]. Dostupné z: https://is.muni.cz/el/1456/jaro2013/MKV_VZVP/um/33149329/Studijni_text_metody_vicekriterialniho_rozhodovani.pdf

[60] EN AW-7075: DATA AND FACTS FOR APPLICATION. *Leichtmetall* [online]. Hannover: Leichtmetall Aluminium Giesserei Hannover [cit. 2023-07-20]. Dostupné z: <https://www.leichtmetall.eu/app/uploads/leichtmetall-data-sheet-EN-AW-7075.pdf>

Seznam obrázků

Obr. 1 Porovnání nákladů v závislosti na tvarové náročnosti [2]	14
Obr. 2 První komerčně dostupná 3D tiskárna - model SLA-1 [3].....	15
Obr. 3 Prototyp 3D tištěného vozidla Urbee [5]	16
Obr. 4 Postup výroby pomocí 3D tisku [7].....	18
Obr. 5 Schéma reverzního inženýrství [8].....	19
Obr. 6 Porovnání přímého podávání (vlevo) a systému Bowden [10]	21
Obr. 7 Průřez konstrukce hotendy s viditelným oddělením studené a horké části[11]	22
Obr. 8 Příklad podomácku vyrobené CoreXY konstrukce [14]	24
Obr. 9 Vliv hustoty výplně na mez pevnosti v tahu materiálu PLA (Pandzic et al) [18].....	25
Obr. 10 Vliv počtu perimetrů (dle pořadí 1,2,4,7) na mez pevnosti v tahu materiálu PLA [20]	26
Obr. 11 Vliv tiskové rychlosti na mez pevnosti v tahu, ohybu a rázovou houževnatosti u materiálu PEEK [24]	28
Obr. 12 Vliv orientace 3D tisku na mez pevnosti v tahu materiálu PLA [25].....	29
Obr. 13 Studie Filamentive ohledně zjištění nejpoužívanějších materiálů pro FDM 3D tisk [28].....	30
Obr. 14 Schéma certifikačního postupu EASA [42].....	35
Obr. 15 Titanový díl letounu Boeing 787 vyráběný pomocí technologie RPD [46]	37
Obr. 16 3D tištěné krytky v letadle společnosti Etihad [48]	38
Obr. 17 Dodaný výkres s doplněnými požadavky objednatelem	42
Obr. 18 Porovnání modelu před a po úpravě – pohled zepředu.....	43
Obr. 19 Porovnání modelu před a po úpravě – pohled z boku	43
Obr. 20 Porovnání modelu před a po úpravě v prostředí sliceru – pohled z vnitřní strany	44
Obr. 21 Porovnání modelu před a po úpravě v prostředí sliceru – pohled z vnější strany	44
Obr. 22 Porovnání koncentrátorů napětí před (vlevo) a po úpravě modelu (materiál PETG)	45
Obr. 23 Přednostní zkušební těleso pro zkoušku ohybem	46
Obr. 24 Vzorek s vrubem pro zkoušku rázové houževnatosti metodou Charpy	46
Obr. 25 Zkušební vzorek 1B pro zkoušku tahem	47
Obr. 26 3D tiskárna Voron Trident 300	48
Obr. 27 Ukázka tiskové orientace vzorků pro zkoušku ohybem se zobrazením ve sliceru .	49
Obr. 28 Zkušební stroj MTS Exceed E42 pro zkoušku ohybem.....	51
Obr. 29 Zatěžování vzorku při zkoušce ohybem (PETG-CF).....	53
Obr. 30 Charpyho kladivo Instron CEAST.....	54
Obr. 31 Zkušební stroj LabTest 5.100SP1	55
Obr. 32 Prostředí pevnostní analýzy v programu Autodesk Inventor 2024.....	57
Obr. 33 Měření síly přitahu digitálním siloměrem	59
Obr. 34 Umístění tištěných páček v simulátoru	60
Obr. 35 Domácí testování odolnosti páčky (materiál PETG)	61

Obr. 36 Vizualizace průhybu páčky pomocí pevnostní analýzy při maximálním zatížení (materiál HTN-CF25).....	72
Obr. 37 Vyjmutí sestavy nouzového systému s páčkami po 30 letových dnech	73
Obr. 38 Deformace vzorku (PC, plné perimetry)	74
Obr. 39 Vzorek porušený mimo koncentrátor napětí (PA12-CF, plné perimetry)	76

Seznam tabulek

Tab. 1 Vybrané materiály pro testování, jejich výrobci, barva a cena.....	40
Tab. 2 Tiskové teploty a použití límce pro jednotlivé materiály.....	50
Tab. 3 Časy tisku jednotlivých šarží.....	51
Tab. 4 Tabulka se vstupními parametry pro pevnostní analýzu	58
Tab. 5 Výsledky zkoušky ohybem tištěných vzorků	63
Tab. 6 Rozdíly pevností v ohybu dle užitých parametrových šarží	63
Tab. 7 Výsledky zkoušky rázové houževnatosti tištěných vzorků.....	65
Tab. 8 Rozdíly vrubových houževnatostí dle užitých parametrových šarží	65
Tab. 9 Výsledky zkoušky tahem tištěných vzorků.....	66
Tab. 10 Rozdíly pevností v tahu dle užitých parametrových šarží.....	67
Tab. 11 Výsledky měření modulu pružnosti v tahu tištěných vzorků.....	69
Tab. 12 Porovnání výsledků mechanických zkoušek s tabulkovými hodnotami uváděnými výrobci	70
Tab. 13 Výsledky pevnostní analýzy plastové páčky.....	72
Tab. 14 Výsledky domácího testování odolnosti tištěných páček.....	75
Tab. 15 Popis porušených vzorků při testování mechanické odolnosti	77
Tab. 16 Vícekriteriální rozhodování	78

Seznam grafů

Graf 1 Hodnoty meze pevnosti v ohybu tištěných vzorků	62
Graf 2 Hodnoty vrubové houževnatosti tištěných vzorků	64
Graf 3 Hodnoty meze pevnosti v tahu tištěných vzorků	66
Graf 4 Porovnání pevnosti v tahu tištěného a vstřikovaného materiálu PC	68
Graf 5 Hodnoty modulu pružnosti v tahu tištěných vzorků	69
Graf 6 Graficky znázorněné vícekriteriální rozhodování pro 4 náhodně vybrané materiály	78

Seznam příloh

Příloha 1 – zkouška ohybem

Příloha 2 – zkouška tahem

Příloha 3 – pevnostní analýza

Příloha 4 – testování reálné deformace páček