VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE

DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC TECHNOLOGY

VYUŽITÍ TECHNOLOGIE 3D TISKU V AUTOMOBILOVÉM PRŮMYSLU

USE OF 3D PRINTING TECHNOLOGY IN THE AUTOMOTIVE INDUSTRY

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE — Bc. Pavel Hyhlík

AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE — doc. Ing. Tomáš Binar, Ph.D.

SUPERVISOR

BRNO 2023

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

Diplomová práce

magisterský navazující studijní program **Elektrotechnická výroba a management**

Ústav elektrotechnologie

Student: Bc. Pavel Hyhlík ***ID:*** 211149

Ročník: 2 ***Akademický rok:*** 2022/23

NÁZEV TÉMATU:

Využití technologie 3D tisku v automobilovém průmyslu

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Objasněte technologii 3D tisku a její využití v různých oblastech průmyslu. Připravte zkušební tělesa z více druhů materiálů vhodných pro 3D tisk a podrobte je degradačnímu působení v UV komoře. Pomocí mechanických zkoušek ověřte vlastnosti zkoumaných materiálů vzorků, případně proveďte další laboratorní zkoušky. Na základě zjištěných výsledků navrhněte konkrétní aplikaci pro tvorbu náhradního dílu včetně výkresové a výrobní dokumentace.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce.

Termín zadání: 6.2.2023 ***Termín odevzdání:*** 23.5.2023

Vedoucí práce: doc. Ing. Tomáš Binar, Ph.D.

doc. Ing. Petr Bača, Ph.D.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá zkoumáním technologie 3D tisku a její využitelností v automobilovém průmyslu. Rozebírá typy technologií, materiály používané pro 3D tisk, potřebný software a konkrétní možnosti použití. Jeden z materiálů je vybrán a podroben analýze jeho vlastností, poté jsou z něj zkonstruovány a vyrobeny náhradní díly. Práce zahrnuje i případovou studii, zabývající se ekonomickou výhodností aditivní výroby u zkonstruovaných dílů.

Klíčová slova

3D tisk, polymer, FDM, vrubová houževnatost, pevnost v tahu, tvrdost, elektronová mikroskopie

Abstract

This thesis deals with 3D printing technology and its applicability to the automotive industry. It discusses the types of technology, the materials used for 3D printing, required software and the specific applications. One of the materials is selected and analyzed for its properties, after which spare parts are designed and manufactured from it. The thesis includes a case study looking at the economic viability of additive manufacturing for engineered parts.

Keywords

3D Print, polymer, FDM, notch toughness, tensile strength, hardness, electron microscopy

Bibliografická citace

HYHLÍK, Pavel. Využití technologie 3D tisku v automobilovém průmyslu [online]. Brno, 2023 [cit. 2023-05-23]. Dostupné z: https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/151563. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektrotechnologie. Vedoucí práce Tomáš Binar.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení studenta:	Bc. Pavel Hyhlík
VUT ID studenta:	211149
Typ práce:	Diplomová práce
Akademický rok:	2022/23
Téma závěrečné práce:	Využití technologie 3D tisku v automobilovém průmyslu

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne 23. května 2023 ----------

podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce panu doc. Ing. Tomáši Binarovi, Ph.D. za odbornou pomoc při zpracování mé práce. Poděkování patří také Ing. Přemyslu Menčíkovi, Ph.D. a Ing. Nikolu Papežovi, Ph.D. za zprostředkování potřebných měření.

V Brně dne 23. května 2023 ----------

podpis autora

Obsah

SEZNAM OBRÁZKŮ **9**

SEZNAM TABULEK **11**

SEZNAM GRAFŮ **11**

ÚVOD **12**

1. TEORETICKÁ ČÁST **13**

1.1 TECHNOLOGIE 3D TISKU 13
1.1.1 Fused deposition modeling *13*
1.1.2 Stereolithography apparatus *15*
1.1.3 Selective laser sintering *17*
1.2 MATERIÁLY 18
1.2.1 Filamenty *18*
1.2.2 Fotopolymery *20*
1.2.3 Prášky pro SLS a DMLS *20*
1.3 SOFTWARE POUŽÍVANÝ PŘI VÝROBNÍM PROCESU S 3D TISKEM 21
1.3.1 Software na modelování objektů *21*
1.3.2 Slicing software *22*

2. VYUŽITÍ 3D TISKU V PRŮMYSLU **24**

2.1 PROTOTYPOVÁNÍ 24
2.2 VÝROBA NÁHRADNÍCH DÍLŮ 25
2.3 SNÍŽENÍ NÁKLADŮ NA VÝROBU 25
2.4 SNÍŽENÍ HMOTNOSTI DÍLŮ 26
2.5 VÝROBA NA ZAKÁZKU 27
2.6 EKOLOGIE 28

3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST **29**

4. VÝBĚR VHODNÉHO MATERIÁLU **31**

4.1 AKRYLONITRIL-BUTADIEN-STYREN 31
4.2 AKRYLONITRIL-STYREN-AKRYLÁT 31
4.3 POLYETHYLENTEREFTALÁT-GLYKOL 32
4.4 POLYAMID 33
4.5 POLYVINYLCHLORID 34
4.6 KO-POLYESTER 34
4.7 HIGH IMPACT POLYSTYRENE 35
4.8 POROVNÁNÍ A VÝBĚR MATERIÁLU 35
4.9 MOŽNOSTI APLIKACE 38

5. TESTOVÁNÍ PARAMETRŮ MATERIÁLU **40**

5.1 PŘÍPRAVA TESTOVACÍCH VZORKŮ 40
5.2 ZKOUŠKA PEVNOSTI V TAHU 41
5.3 ZKOUŠKA TVRDOSTI 44
5.4 ZKOUŠKA VRUBOVÉ HOUŽEVNATOSTI 46
5.4.1 Degradace v klimatické komoře *49*
5.4.2 Vyzářená energie *51*

5.4.3 Hmotnost vzorků ... *52*
5.4.4 Měření při různých teplotách ... *55*
5.4.5 Temperace testovacích vzorků ... *56*
5.4.6 Výsledky měření vrubové houževnatosti při různých teplotách ... *57*
5.5 MĚŘENÍ NA ELEKTRONOVÉM MIKROSKOPU ... 65
6. KONSTRUKCE NÁHRADNÍCH DÍLŮ ... 72
6.1 ZVÝŠENÍ ODOLNOSTI ZVOLENÉHO MATERIÁLU ... 72
6.2 VZORKY PRO SPOLEČNOST TATRA DEFENSE A.S. ... 73
6.3 SIMULACE ZATÍŽENÍ DÍLŮ ... 77
7. PŘÍPADOVÁ STUDIE ... 80
7.1 SESTAVA KRYTU POJISTKY TATRA DEFENSE A.S. ... 80
ZÁVĚR ... 83
LITERATURA ... 85
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK ... 93

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 - Znázornění principu FDM tisku [4] ... 14
Obrázek 2 - Hotend FDM tiskárny [5] ... 14
Obrázek 3 - Znázornění principu SLA tiskárny [4] ... 16
Obrázek 4 - Znázornění principu DLP tiskárny [4] ... 16
Obrázek 5 - Znázornění principu SLS tiskárny [4] ... 17
Obrázek 6 - Role filamentu [16] ... 18
Obrázek 7 - Láhev s pryskyřicí pro SLA a DLP tisk [29] ... 20
Obrázek 8 - Jemný granulát pro 3D tiskárny SLS [34] ... 21
Obrázek 9 - Okno programu SolidWorks ... 22
Obrázek 10 - Okno programu PrusaSlicer ... 23
Obrázek 11 - Prototyp vytvořený pomocí 3D tisku [41] ... 24
Obrázek 12 - Adaptéry na hadice pro Audi W12 FSI [40] ... 25
Obrázek 13 - Tištěná šablona pro Boeing 777X [45] ... 26
Obrázek 14 - Odlehčený vytištěný díl z kovu [46] ... 27
Obrázek 15 - Sestava přepínačů pro Chevrolet Camaro 1969 [47] ... 28
Obrázek 16 - Stroj pro recyklaci polymerů ProtoCycler+ od společnosti ReDeTec [48] ... 28
Obrázek 17 - Blokový diagram postupu ... 29
Obrázek 18 - Tiskárna Ultimaker 2+ [64] ... 40
Obrázek 19 - Testovací vzorek 1A dle normy ČSN EN ISO 527 ... 42
Obrázek 20 - Testovací vzorek 1BA dle normy ČSN EN ISO 527 ... 42
Obrázek 21 - Přetržený testovací vzorek 1BA materiálu Nylon CF15 Carbon ... 44
Obrázek 22 - Tvrdoměr INSIZE ISH-SDM [68] ... 45
Obrázek 23 - Testovací vzorek (Vrubová houževnatost) ... 47
Obrázek 24 - Vrubovací stroj CEAST NOTCHVIS 6951 ... 47
Obrázek 25 - Přístroj pro měření vrubové houževnatosti Zwick 5113.100 ... 48
Obrázek 26 - Klimatická komora Q-SUN Xe-3 ... 50
Obrázek 27 - Vnitřek klimatické komory Q-LAB Q-SUN Xe-3 [72] ... 50
Obrázek 28 - Umístění vzorků v klimatické komoře ... 51
Obrázek 29 – Použitá laboratorní váha KERN ABS 220-4N ... 53
Obrázek 30 - Laboratorní pec Climatic Test Systems 91250 ... 56
Obrázek 31 - Kontejner s teploměrem pro chlazení vzorků ... 57
Obrázek 32 - Vzorky s dobou degradace 2 měsíce ... 62
Obrázek 33 - Vzorek nylonu č. 16 nepřeražený při teplotě 80 °C ... 62
Obrázek 34 - Zvětšený vzorek č. 86 ... 63
Obrázek 35 - Všechny delaminované vzorky ... 64
Obrázek 36 – Přeražený, skoro delaminovaný vzorek po degradaci (2 měsíce) ... 64
Obrázek 37 - Leica EM ACE600 ... 65
Obrázek 38 - Pozice K, vzorek 27, bez degradace, přeražen při -80 °C, zorné pole 104 µm ... 67
Obrázek 39 - Pozice D, vzorek 26D, 1 měsíc degradace, přeražen při -80 °C, zorné pole 104 µm ... 67
Obrázek 40 - Pozice B, vzorek 1, bez degradace, přeražen při 0 °C, zorné pole 104 µm ... 67
Obrázek 41 - Pozice F, vzorek 1D, 1 měsíc degradace, přeražen při 0 °C, zorné pole 104 µm ... 67
Obrázek 42 - Pozice H, vzorek 3, bez degradace, přeražen při 30 °C, zorné pole 104 µm ... 68
Obrázek 43 - Pozice G, vzorek 30D, 1 měsíc degradace, přeražen při 30 °C, zorné pole 104 µm ... 68
Obrázek 44 - Pozice C, vzorek 17, bez degradace, přeražen při 70 °C, zorné pole 104 µm ... 68
Obrázek 45 - Pozice J, vzorek 44D, 1 měsíc degradace, přeražen při 70 °C, zorné pole 104 µm ... 68
Obrázek 46 - Pozice K, vzorek 27, bez degradace, přeražen při -80 °C, zorné pole 692 µm ... 69

Obrázek 47 - Pozice D, vzorek 26D, 1 měsíc degradace, přeražen při -80 °C, zorné pole 692 µm 69
Obrázek 48 - Pozice B, vzorek 1, bez degradace, přeražen při 0 °C, zorné pole 692 µm..... 69
Obrázek 49 - Pozice F, vzorek 1D, 1 měsíc degradace, přeražen při 0 °C, zorné pole 692 µm..... 69
Obrázek 50 - Pozice H, vzorek 3, bez degradace, přeražen při 30 °C, zorné pole 692 µm..... 70
Obrázek 51 - Pozice G, vzorek 30D, 1 měsíc degradace, přeražen při 30 °C, zorné pole 692 µm..... 70
Obrázek 52 - Pozice C, vzorek 17, bez degradace, přeražen při 70 °C, zorné pole 692 µm..... 70
Obrázek 53 - Pozice J, vzorek 44D, 1 měsíc degradace, přeražen při 70 °C, zorné pole 692 µm..... 70
Obrázek 54 - Pozice E, vzorek 32D, 1 měsíc degradace, přeražen při 40 °C, zorné pole 104 µm..... 71
Obrázek 55 - Pozice E, vzorek 32D, 1 měsíc degradace, přeražen při 40 °C, zorné pole 692 µm..... 71
Obrázek 56 - Pozice I, vzorek 55D, 1 měsíc degradace, přeražen při 110 °C, zorné pole 104 µm..... 71
Obrázek 57 - Pozice I, vzorek 55D, 1 měsíc degradace, přeražen při 110 °C, zorné pole 692 µm..... 71
Obrázek 58 - Kryt pojistky Tatra 73
Obrázek 59 - Výkres krytu pojistky Tatra 74
Obrázek 60 - Základna krytu pojistky 74
Obrázek 61 - Výkres základny krytu pojistky..... 75
Obrázek 62 - Upravená tiskárna Creality Ender 5..... 76
Obrázek 63 - Vytištěný kryt pojistky 77
Obrázek 64 - Vytištěná základna krytu pojistky 77
Obrázek 65 – Vizualizace simulace zatížení shora na základnu krytu pojistky 78
Obrázek 66 – Vizualizace simulace zatížení shora na kryt pojistky..... 78
Obrázek 67 - Vizualizace simulace zatížení ze všech stran na základnu krytu pojistky..... 79
Obrázek 68 - Vizualizace simulace zatížení ze všech stran na kryt pojistky 79

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 - Vlastnosti materiálu a použité normy (ABS Extrafill) ... 31
Tabulka 2 - Vlastnosti materiálu a použité normy (ASA Extrafill) ... 32
Tabulka 3 - Vlastnosti materiálu a použité normy (PET-G) ... 33
Tabulka 4 - Vlastnosti materiálu a použité normy (Nylon FX256) ... 33
Tabulka 5 - Vlastnosti materiálu a použité normy (Nylon CF15 Carbon) ... 33
Tabulka 6 - Vlastnosti materiálu a použité normy (Onyx) ... 34
Tabulka 7 - Vlastnosti materiálu a použité normy (Vinyl 303) ... 34
Tabulka 8 - Vlastnosti materiálu a použité normy (CPE HG100) ... 35
Tabulka 9 - Vlastnosti materiálu a použité normy (HIPS Extrafill) ... 35
Tabulka 10 - Porovnání vlastností materiálů pro 3D tisk ... 36
Tabulka 11 - Klasifikace vlastností materiálů ... 38
Tabulka 12 - Parametry tisku testovacích vzorků ... 41
Tabulka 13 - Tabulka s naměřenými hodnotami pevnosti v tahu (PLA) ... 43
Tabulka 14 - Tabulka s naměřenými hodnotami pevnosti v tahu (Nylon-Carbon) ... 43
Tabulka 15 - Naměřená data tvrdosti materiálů PLA a Nylon CF15 Carbon ... 45
Tabulka 16 - Naměřené hodnoty vrubové houževnatosti pro PLA a Nylon-Carbon ... 49
Tabulka 17 - Přirovnání vyzářené energie k lokacím v různých podnebích ... 52
Tabulka 18 - Výsledky měření hmotnosti ... 54
Tabulka 19 - Průměrná váha vzorků pro KCV ... 55
Tabulka 20 - Naměřená KCV a vypočtená data (PLA) ... 58
Tabulka 21 - Naměřená KCV a vypočtená data (PA12+CF15) ... 58
Tabulka 22 - Naměřená KCV a vypočtená data (PA12+CF15, degradace 1 měsíc) ... 59
Tabulka 23 - Naměřená KCV a vypočtená data (PA12+CF15, degradace 2 měsíce) ... 60
Tabulka 24 - Průměrné hodnoty vrubové houževnatosti ... 61
Tabulka 25 – Ceny a náklady na výrobu ... 81

SEZNAM GRAFŮ

Graf 1 - Závislost vrubové houževnatosti materiálů PLA a PA12+CF15 na teplotě testovaného vzorku . 61
Graf 2 - Závislost ceny za kus na objemu série ... 81

ÚVOD

Rostoucí náklady na materiál a jeho nedostatek, zvyšující se ceny energií, nestabilní globální politická situace a hrozba ekonomické krize nutí výrobce hledat úspory ve všech odvětvích průmyslu. Jednou z možností úspor je zjednodušení a optimalizace vývoje a výrobního procesu pomocí 3D tisku. Použitím aditivního postupu výroby lze snížit náklady oproti obvyklým způsobům výroby. 3D tisk se dnes již běžně v těchto aplikacích používá.

3D tisk je dnes již hojně využívaná technologie. Oproti jiným technologiím výroby z plastů, jako je například vstřikování, je však stále drahá. Používá se proto především pro výrobu v menších sériích, při návrhu prototypů, zakázkové/kusové výrobě, nebo také například pro domácí použití. Při kusové výrobě a menším počtu kusů může být 3D tisk levnější než nákladná výroba formy při již zmíněném výrobním procesu vstřikování. Navíc není zapotřebí mnoho příprav a proces je tudíž, až na samotný průběh výroby, rychlejší. Technologie 3D tisku může být řešením poptávky po starších dílech, které se nevyrábí a jsou již nedostupné, nebo jejichž výroba konvenčními způsoby by byla drahá a nemuselo by se vyplatit znovu spouštět výrobu konkrétního dílu kvůli několika málo kusům. 3D tisk je rovněž využíván při vývoji, modelování a výrobě protéz a ortéz ve zdravotnictví [1]. Neméně důležitou součástí tohoto tématu jsou i materiály používané k tisku. Většinou se jedná o různé druhy plastu, které se liší svými mechanickými vlastnostmi. Existuje ale i 3D tisk kovovými materiály.

Cílem této diplomové práce je vytvořit rešerši používaných technologií 3D tisku, materiálů, softwaru využívaného při tomto výrobním procesu a uvést konkrétní příklady aplikace v automobilovém průmyslu. Bude zvolen materiál a budou otestovány jeho mechanické vlastnosti. Vybraný a otestovaný materiál bude použit pro konstrukci náhradních dílů pro společnost TATRA DEFENSE a.s. Součástí práce bude i případová studie, zabývající se ekonomickou stránkou použití 3D tisku pro výrobu těchto náhradních dílů.

1. TEORETICKÁ ČÁST

3D tisk je způsob aditivní výroby, kdy je postupně přidáván materiál po vrstvách takovým způsobem, že vytvoří požadovaný objekt.

Za začátky 3D tisku lze považovat 80. léta, neboť byl vynalezen stereolitografický proces (jev, při kterém dochází k tuhnutí polymeru při působení světla [2], nejčastěji ultrafialového). O několik let později byly stroje využívající tuto technologii poprvé uvedeny na trh [3]. V 80. letech 20. století byly vynalezeny další způsoby aditivní výroby. Jedním z nich je na univerzitě v Texasu sestrojený SLS (selective laser sintering). Taktéž byla tou dobou vynalezena technologie FDM (fused deposition modeling). Kvůli své vysoké ceně ale tyto technologie nebyly masově nasazeny a byly používány především ke konstrukci prototypů. To se ovšem změnilo počátkem nového tisíciletí, kdy byly vyvinuty menší a jednodušší stroje využívající technologii FDM, které byly cenově dostupné pro široké publikum, a zájem o 3D tisk tak prudce vzrostl.

Všechny zmíněné technologie se v automobilovém průmyslu nějakým způsobem využívají. Nejprve budou popsány principy technologií 3D tisku, budou prozkoumány používané materiály a také software, který je nutné během procesu vývoje a výroby s využitím 3D tisku použít a který bude použit i při návrhu dílu v této práci. Poté budou uvedeny případy použití 3D tisku v automobilovém průmyslu.

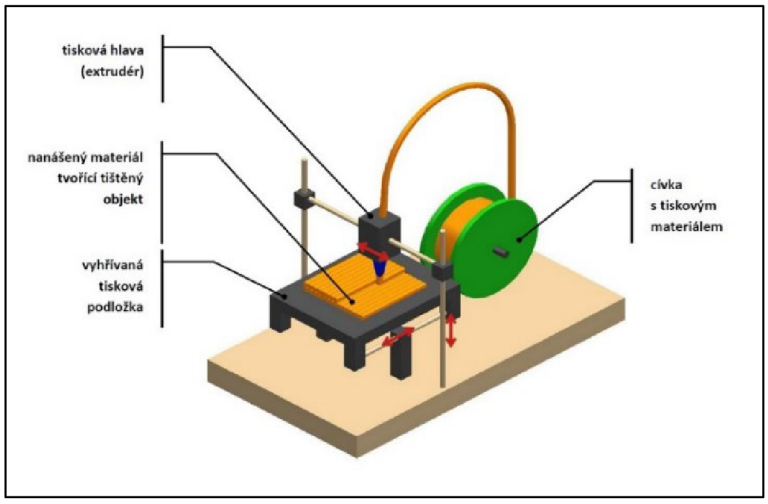
1.1 Technologie 3D Tisku

Existuje několik technologií 3D tisku, které se liší způsobem provedení aditivního procesu. Mají různé rozlišení, různé fyzikální vlastnosti použitých materiálů, různá pravidla při navrhování objektů a také mají každá své výhody i nevýhody. Mezi nejčastěji používané technologie patří FDM, SLA a SLS.

1.1.1 Fused deposition modeling

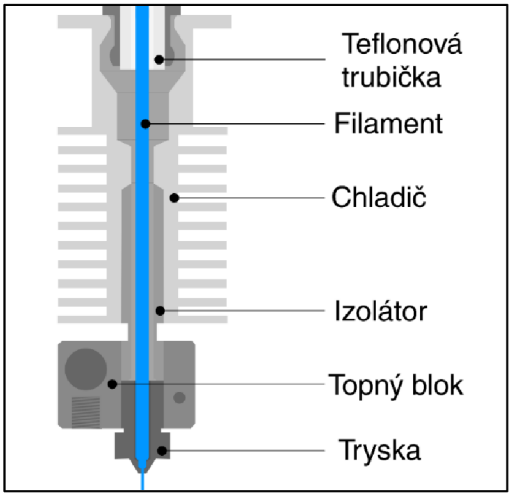
Jedná se o v dnešní době nejvíce využívanou technologii. FDM (volně přeloženo jako modelování taveného uloženého materiálu) je technologie využívající tavení materiálu uloženého v zásobníku. Tato technologie se na trhu vyskytuje také pod názvem FFF, což je zkratka fused filament fabrication (výroba z taveného vlákna).

Materiál uložený na cívce ve formě vlákna je krokovým motorem posouván skrz trubičku směrem k tiskové hlavě, jak je patrné z obrázku č. 1.



Obrázek 1 - Znázornění principu FDM tisku [4]

Ta je tvořena topným blokem, který rozvádí teplo od topného tělesa k trysce. V trysce je podávaný materiál roztaven a po vrstvách nanášen na tiskovou podložku. Tloušťka jedné vrstvy se zpravidla pohybuje v rozmezí 0,1–0,3 mm. Kromě topného tělesa je v topném bloku umístěn i teploměr kvůli zpětné vazbě. Na celý blok navazuje izolátor (takzvaně heatbrake) s chladičem, jak je vidět na obrázku č. 2 níže. Ty slouží k zamezení tavení materiálu dříve než v trysce a následnému ucpávání. Celá tato sestava se pak nazývá „hotend“.



Obrázek 2 - Hotend FDM tiskárny [5]

Na tiskové hlavě se dále nachází ventilátor chladiče a ventilátor či ventilátory pro chlazení vytvářeného objektu, které foukají těsně pod trysku. Lze tak docílit hladšího tisku větších převisů na objektu. Chlazení ale zhoršuje mechanickou odolnost výrobku, jelikož rychle chlazené vrstvy nestihnou dostatečně prolnout. Celá tisková hlava se v závislosti na konstrukci tiskárny pohybuje po osách X a Z nebo po osách X a Y. Pohyb

po 3. ose je zajištěn tiskovou podložkou. Ta bývá zároveň vyhřívaná, aby se předešlo deformaci produktu vlivem rozdílných teplot v různých částech tělesa.

Tiskárny FDM také musí obsahovat řídicí desku a zdroj. Ty jsou nejčastěji skryté v kovové krabici na spodní straně stroje, někdy je zdroj umísťován na boku tiskárny. Na řídicí elektroniku jsou napojeny všechny motory tiskárny, topné těleso, vyhřívaná podložka a také senzory. Na tiskárnách můžeme najít koncové spínače na každé ose pohybu, termistory či termočlánky pro měření teploty trysky a vyhřívané tiskové podložky a na některých modelech i indukční či kapacitní senzory pro kalibraci roviny tiskové podložky. K řídicí desce je běžně připojen také display s ovládacími prvky pro navigaci v menu tiskárny, spouštění tisku a nastavování parametrů.

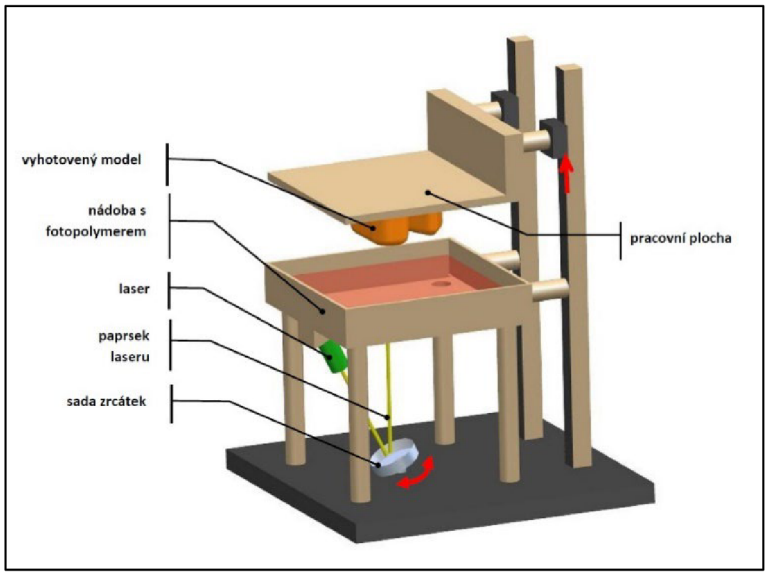
Největší výhodou této technologie je její cena. Z technologií zde probíraných je tato na pořízení i provoz cenově nejpřívětivější, proto je nejběžněji používaná. Také se jedná o stroje, jejichž obsluhu zvládne po krátkém školení takřka kdokoliv. Při použití dražších materiálů lze dosáhnout dobrých mechanických vlastností produkovaných výrobků. Za nevýhodu může být považováno vertikální rozlišení tisku, zde je tiskárna limitována šířkou vrstvy.

V průmyslových odvětvích spojených s výrobou vozidel se v současné době technologie FDM používá především k rychlé výrobě prototypů [6].

1.1.2 Stereolithography apparatus

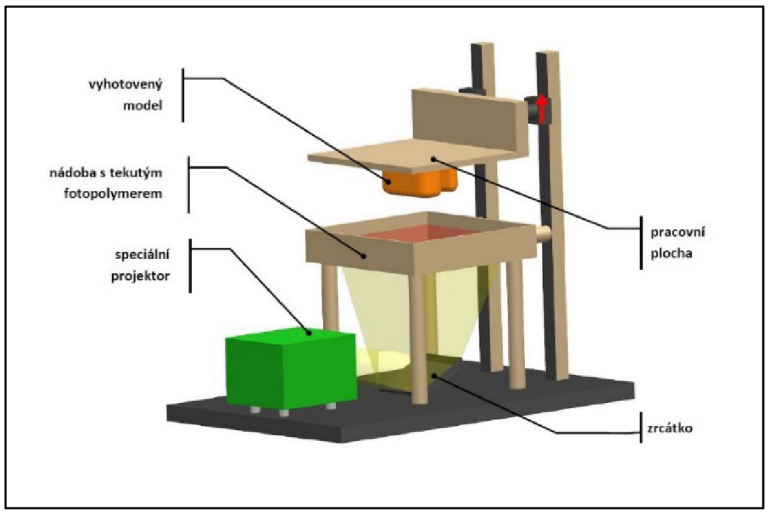
Technologie SLA (lze přeložit jako stereolitografický přístroj) je nejstarší ze všech zmiňovaných. Během výrobního procesu nedochází k natavení vstupního materiál, jak je tomu v případě FDM. Zde je fotopolymer (resin) v zásobníku (v nádobě) po vrstvách postupně vytvrzován působením laserem emitovaného UV záření [7].

Tisková podložka je na začátku tisku v kontaktu s tekutým fotopolymerem v nádobě. Poté jsou laserem postupně ozařována místa, kde má materiál polymerizovat. Tiskovou podložkou je zajišťován vertikální pohyb po ose Z. Tisková hlava, v tomto případě tvořena laserem coby zdrojem záření a modulátorem paprsku ve formě zrcadel, zajišťuje horizontální pohyb po osách X a Y, jak je patrné z obrázku č. 3. Tento typ tiskáren je, na rozdíl od většiny strojů s technologií FDM, vybaven krytem. U technologie SLA je nezbytný z důvodu zamezení kontaminace UV zářením, které by mohlo nechtěnou polymerizací nepříznivě ovlivnit tvar výsledného objektu.



Obrázek 3 - Znázornění principu SLA tiskárny [4]

Na stejném principu fungují i 3D tiskárny typu DLP (digital light processing – digitální zpracovávání světla) [8]. Tento typ tiskáren se od strojů s technologií SLA liší jen zdrojem světla. Na rozdíl od laseru je zde využit projektor, viz. obrázek č. 4. Přístroj je tak schopen osvítit větši plochu nádoby s resinem a tiskový proces je tak rychlejší v porovnání s technologií SLA [9].



Obrázek 4 - Znázornění principu DLP tiskárny [4]

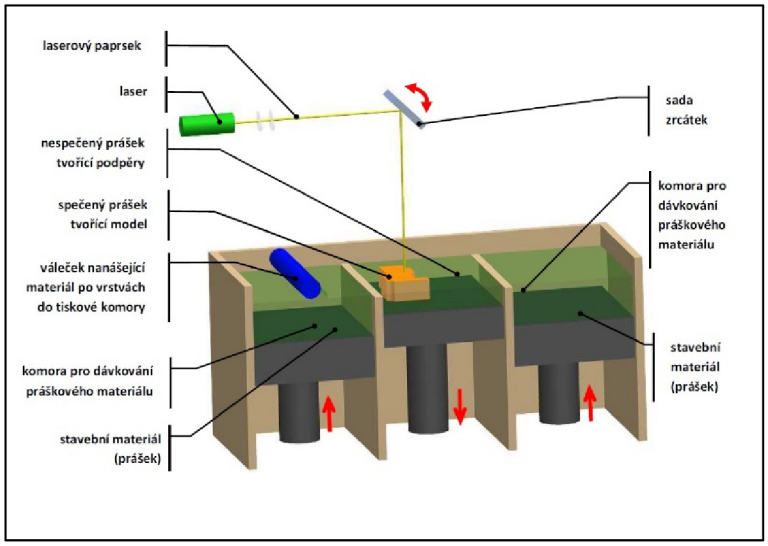
Výhodou těchto technologií je vysoké rozlišení tisku. A to jak horizontální, tak vertikální. Proces výroby těchto technologií je obecně pomalejší, například v porovnání s dříve zmíněným FDM, výtisky jsou také méně mechanicky odolné. Ačkoliv se cena komerčně dostupných tiskáren s touto technologií snižuje, jsou v porovnání s tiskárnami FDM dražší. Vyšší jsou také náklady za materiál.

V automobilovém průmyslu se SLA tisk využívá k ověřování funkčnosti, testování konstrukcí a výrobě prototypů [10]. Tuto technologii používají hlavně výrobci motorů a jednotlivých komponent.

1.1.3 Selective laser sintering

Technologie SLS (selektivní laserové slinování) používá materiál ve formě prášku [11]. Ten je uložen v zásobníku a na tiskovou podložku je nanesen válečkem. Tvorba objektu zde probíhá pomocí takzvaného slinování [12], materiál ve formě prášku je zahříván na vysokou teplotu, ne však na jeho teplotu tání. Jednotlivé částice prášku se pak spečou dohromady a vytvoří pevný objekt. K zahřívání se používá laserový paprsek. Jeho horizontální pohyb po osách X a Y obstarává, stejně jako u technologie SLA, sada zrcadel. Pohyb po ose Z je opět ovládán posunem tiskové podložky nahoru a dolů. Celé ústrojí je znázorněno na obrázku č. 5 níže.

Tato technologie 3D tisku umožňuje použití nejen plastu, ale i kovových materiálů (DMLS – direct metal laser sintering).



Obrázek 5 - Znázornění principu SLS tiskárny [4]

Za podobnou této technologii můžeme považovat technologii 3D tisku SLM. Selective laser melting (selektivní tavení laserem) se používá často k tisku kovem [13]. Liší se hlavně výkonem zdroje záření. Materiál je zde úplně roztaven na tekutou homogenní směs, výsledný produkt by tak měl být mechanicky odolnější.

Velkou výhodou těchto technologií je možnost použití více materiálů, včetně kovu. Předměty vyrobené touto technologií mají také dobré mechanické vlastnosti a tisk vysoké rozlišení ve všech osách, k tisku navíc nejsou zapotřebí podpěry. Nevyužitý materiál nashromážděný kolem tisknutého objektu lze z velké části recyklovat [14]. Výtisky technologií SLS mají z důvodu vlastnosti technologie pórovatý povrch a často je tak

nutné použít povrchovou úpravu. Další nevýhodou technologie SLS a především SLM je jejich cena, která převyšuje běžně dostupné stroje typu FDM i SLA/DLP.

V automobilovém průmyslu se tato technologie používá ve stejných aplikacích jako předchozí zmíněné, nabízí se také využití pro výrobu starších náhradních dílů [15].

1.2 Materiály

Tato kapitola se zabývá materiály, které se pro 3D tisk běžně používají. Každá technologie používá materiál v jiné formě. Technologie FDM/FFF používá materiál ve formě filamentu, SLA používá fotopolymer (resin) a technologie SLS k tisku používá materiály ve formě prášku či jemného granulátu. Každá forma materiálu má své výhody i nevýhody.

1.2.1 Filamenty

K 3D tisku technologií FDM se používá několik druhů plastů. Materiál je ve formě struny navinut na roli (viz. obrázek č. 6), ze které se při procesu tisku postupně odvíjí. Průměr tiskové struny je 1,75 mm, existují však i filamenty s průměrem struny 2,85 mm. Nejčastěji používanými materiály jsou PLA, PET a ABS.

Obrázek 6 - Role filamentu [16]

Studie [17] provedená na fakultě technologií, managementu a strojírenství vysoké školy NMIMS v Bombaji analyzující vliv tisku na mechanické vlastnosti materiálů popisuje materiál PLA jako relativně křehký, rozložitelný, málo houževnatý materiál s dobrou odolností vůči UV záření. Je snadné jím tisknout a vrstvy na sebe snadno přiléhají. Tiskne se při teplotách 185–235 °C [18]. PLA se používá pro aplikace v elektrotechnice, automobilovém průmyslu, nebo prototypování. Jedná se o cenově dostupný materiál.

ABS je teplotně a mechanicky odolný, otěruvzdorný materiál, který je citlivý na UV záření a lze ho uhlazovat rozpouštědly obsahujícími aceton. Pro tisk se používají teploty v rozmezí 220–275 ° [19]. Používá se vesměs ve stejných aplikacích jako materiál PLA. Díky tomu, že tolik nedegraduje, ho lze použít i na výrobu potrubí a dalšího příslušenství, které je vystaveno venkovním podmínkám.

Další běžně používaný materiál pro 3D tisk technologií FDM je PET. Ten je odolný jak chemicky, tak vůči venkovním podmínkám. Typicky je mechanicky odolnější než PLA, ale méně odolný než ABS. Během tisku ztrácí svojí houževnatost vlivem působení tepla. Teploty pro tisk jsou 220–260 °C [20]. Dá se použít ve stejných aplikacích jako předchozí materiály, je ovšem vhodný i pro použití v potravinářství a medicíně.

Polyamid, známý spíše pod svým komerčním názvem Nylon, je mechanicky velmi odolný materiál, který je zároveň odolný vůči působení tepla. Díky těmto svým vlastnostem se hodí pro výrobu nástrojů. Jeho nevýhodou je náchylnost k pohlcování vlhkosti. Při tisku je teplota nastavena na 235–260 °C [21].

TPU je otěruvzdorný materiál, kterému nevadí maziva. Proto se často využívá pro výrobu různých těsnění, hadic a trubek. Tiskne se při teplotách 240–260 °C [22].

Polykarbonát (PC) je teplu odolný, mechanicky pevný a houževnatý materiál. Jeho tisk vyžaduje vyšší teploty než předešlé materiály (250–290 °C) [23]. Používá se především v biomedicíně a pro výrobu funkčních součástek.

Další materiál, který studie zmiňuje je PEEK (Polyether-ether-keton). Tento teplotně, chemicky i mechanicky velmi odolný materiál se používá pro výrobu vysoce namáhaných funkčních součástí a také pro výrobu implantátů. Jeho skvělé vlastnosti jsou vykoupeny vysokou cenou. Také je obtížné jím tisknout, teplota pro tisk se pohybuje okolo 400 °C [24] a takové teploty běžné stroje typu FDM nejsou schopny vyvinout.

Za zajímavý materiál pro 3D tisk je možné považovat také Polypropylen (PP). Je teplotně i mechanicky odolný a především je zdravotně nezávadný, proto se používá v potravinářství. Tisk vyžaduje teplotu 210–230 °C [25]. Tento materiál se obtížně tiskne, neboť špatně přiléhá na tiskovou podložku.

Výhodou materiálu ve formě filamentu je jednoduchá manipulace s ním, obecně je levný a k jeho výrobě není potřeba žádná drahá technologie. V případě kontaminace nečistotami či mastnotou je snadné ho očistit. Přesnost dávkování materiálu závisí na přesnosti extrudéru použité 3D tiskárny. Nevýhodou může být uvolňování toxických a zapáchajících výparů některých materiálů při tisku na otevřeném stroji. Materiály také po rozdělání z vakuového balení mají tendenci navlhat a degradovat, proto je vhodné je spotřebovat co nejdříve, nebo je skladovat v suchém prostředí. V automobilovém průmyslu můžeme dnes nalézt širokou paletu použitých typů plastu. Běžně se používá například PET [26], ABS, PC, PP [27] nebo PVC [28].

1.2.2 Fotopolymery

Jak bylo zmíněno v jedné z předchozích kapitol, fotopolymery se používají k tisku pomocí technologie SLA. Jedná se o pryskyřice v kapalném skupenství, které při vystavení záření polymerizují. Prodávají se v uzavíratelných láhvích, jak lze vidět na obrázku č. 7 níže a ve větších objemech v kanystrech.

Obrázek 7 - Láhev s pryskyřicí pro SLA a DLP tisk [29]

Jednotlivé fotopolymery se od sebe mohou odlišovat vlnovou délkou záření, při které dochází k tuhnutí. Nejčastěji se tato hodnota nachází někde okolo 400 nm. Mechanické a estetické vlastnosti se dají ovlivňovat přísadami [30].

Na trhu existují pryskyřice standardní, flexibilní, čiré, houževnaté, tuhé, odolné vůči teplotě, rychle tuhnoucí pryskyřice pro prototypování, pryskyřice pro návrh a výrobu šperků, pryskyřice pro použití v medicíně a pryskyřice imitující povrch keramiky [31].

Výhodou je stále relativně jednoduchá manipulace s materiálem. Jelikož je resin prodáván v lahvích a kanystrech, je jednoduché jej skladovat a uskladněný materiál degraduje pomaleji než polymery ve formě filamentu. Materiál při tisku může také uvolňovat jedovaté výpary jako FDM, tisk ale vždy probíhá na strojích uzavřené konstrukce. Kontaminovaný materiál není možné čistit. Další nevýhodou je citlivost fotopolymeru na UV záření, a tak je zapotřebí ho uchovávat v nádobách, které UV záření nepropouští.

1.2.3 Prášky pro SLS a DMLS

Technologie SLS využívá k tisku materiál ve formě prášku. Podobně, jako je tomu v případě FDM, zde můžeme narazit na různé druhy plastu.

Mezi nejčastější materiály se řadí nylon, polypropylen, PBT, TPU nebo PEEK, popřípadě jejích varianty s příměsi [32]. Jejich mechanické i chemické vlastnosti jsou obdobné těm uvedeným v kapitole o filamentech.

Co se tisku kovem týče, materiál je ve stejné formě jako v případě plastu, v prášku. Je možné tisknout hliníkem, ocelí, nerezovou ocelí, titanem, slitinami niklu, kobaltem, chromem a drahými kovy [33]. Prášek pro tisk ve strojích SLS a DMLS se nachází na obrázku č. 8.

Obrázek 8 - Jemný granulát pro 3D tiskárny SLS [34]

Materiál v prášku je při velkých objemech relativně levný. Manipulace s materiálem je obtížnější, než zacházení s filamentem i fotopolymerem. Jemný granulát se práší a má tendenci rychle navlhat, proto je nutné ho skladovat v suchu a ideálně v utěsněných nádobách. V případě kontaminace je takřka nemožné materiál čistit.

1.3 Software používaný při výrobním procesu s 3D tiskem

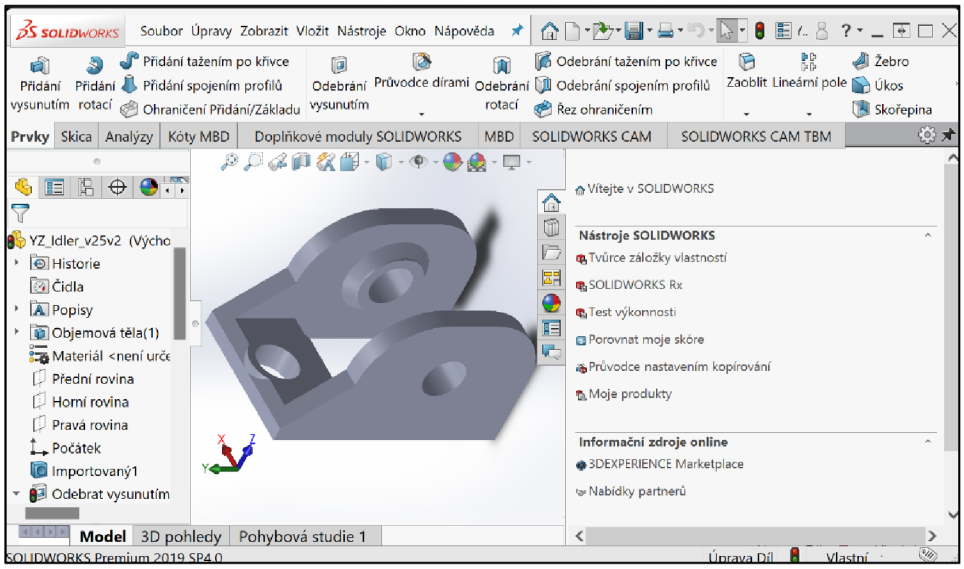
Existují 2 typy softwaru, které je nutné během výrobního procesu 3D tisku použít. V této diplomové práci jsou použity oba typy softwaru, proto budou v následující kapitole rozebrány. Nejdříve je potřeba objekt vytvořit, k tomu se používají programy typu CAD. Poté se musí vymodelované těleso převést do formátu podporovaného 3D tiskárnou, k tomu slouží takzvané slicery.

1.3.1 Software na modelování objektů

K vytváření objektů pro 3D tisk se v průmyslovém prostředí používají programy pro modelování trojrozměrných objektů typu CAD (Computer aided design). Tento software slouží k projektování objektů, struktur, popřípadě sestav. Programy obsahují paletu geometrických a matematických nástrojů pro návrh, úpravu, diagnostiku i analýzy objektů [35].

Konstrukční prostor se nachází v trojrozměrné soustavě souřadnic, jsou zde osy X, Y a Z. K navigaci v poli slouží rotace a posun. K samotné konstrukci objektů se zde

využívají 2D plochy, které lze tvořit pomocí přímek, kružnic, křivek, obdélníků, elips, mnohoúhelníků i pomocí psaní textu. S těmito plochami jsou poté prováděny operace jako je vysunutí v určitém směru, odebrání nebo rotace, tím vznikne trojrozměrný objekt. Dále je zde možnost objektům zaoblit a zkosit hrany, přidat žebrování, či je kopírovat do pole. Takto vytvořená tělesa lze měřit, lze kontrolovat přesahy mezi těly objektů, je možné určit jejich objem a těžiště a při přidání typu materiálu lze určit jejich hmotnost. Na objektech je možné provádět pomocí přídavných modulů různé simulace, například simulace proudění vzduchu, nebo jiné kapaliny, odvodu tepla a tepelného zatížení součástí nebo simulaci fyzického zatížení a namáhání. Navrženému objektu lze také vytvořit dokumentaci popisující jeho rozměry, materiál a další parametry s pohledy z různých stran. Okno prostředí softwaru se nachází na obrázku č. 9.



Obrázek 9 - Okno programu SolidWorks

Výsledné objekty se pro potřeby 3D tisku nejčastěji ukládají do formátů „.obj“ a „.stl“ Nejběžnějšími programy tohoto typu jsou Inventor od společnosti Autodesk, SketchUp od firmy Trimble a Solidworks, který vyvíjí společnost Dassault Systèmes. Program SolidWorks bude použit i při návrhu náhradního dílu v rámci této diplomové práce.

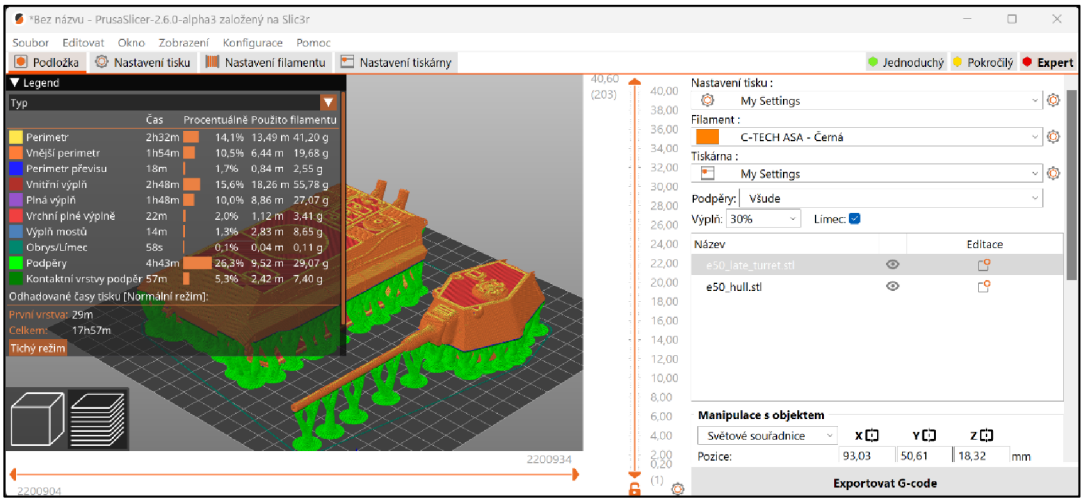
1.3.2 Slicing software

Dalším typem softwaru, který je při procesu 3D tisku využíván, je slicing software, nebo také zkráceně „slicer“. Termín lze do českého jazyka přeložit jako plátkovací software. Jak již bylo zmíněno v jedné z předchozích kapitol, objekty jsou uloženy nejčastěji ve formátech „.obj“ či „.stl“, kde jsou jejich atributy vyjádřeny geometricky [36]. Pro ovladač 3D tiskárny je ale třeba převést objekt do kompatibilního formátu. Tím je „.gcode“.

Jedná se o posloupnost instrukcí, která určuje pohyb tiskové hlavy, popřípadě podložky, v prostoru kartézských souřadnic. Tvar objektu je tak vyjádřen ve formě trajektorie nástroje takovým způsobem, že utvoří výsledný předmět. Tento způsob popisu trajektorie pracovního nástroje lze použít i pro obráběcí stroje jako je soustruh či fréza, pouze dochází k opačnému úkonu [37] (trajektorie opisuje místa objektu, která budou odebrána). Samotný kód obsahuje instrukce popisující lineární pohyb os, jejich rychlosti posunu a rychlost posunu filamentu [38]. Obsahuje také informace o teplotách tiskové hlavy a vyhřívané podložky, hodnoty rychlosti ventilátorů, nebo třeba pokyny ke kalibraci tiskové podložky. U SLA tisku se jedná o formát „.ctb“. Princip je podobný, jako je tomu v případě technologie FDM, na rozdíl od něj jsou zde uchovány instrukce pro pohyb paprsku laseru.

Dalším důležitým úkolem těchto programů je vytvořit vnitřní strukturu předmětu. Tisknout objekty zcela vyplněné materiálem by bylo drahé, časově náročné a výsledné výrobky by byly zbytečně těžké. Proto program uvnitř vytvoří síť materiálu, čímž částečně zachová strukturální pevnost objektu a ušetří čas i náklady na tisk. Vnitřní struktura se zpravidla řídí nějakým geometrickým vzorem, může mít podobu sítí, čtverců, šesticípých hvězd, krychlí nebo například trojúhelníků. Slicery jsou také schopné vytvářet podpěry objektu na místech, kde předmět tvoří převisy a při tisku by tak nebylo na co materiál vrstvit. Podpěry mají nejčastěji tvar hranatého či kulatého sloupu nebo stromu.

Jako typické zástupce tohoto typu softwaru lze uvést slicer Ultimaker Cura a PrusaSlicer. Tato softwarová řešení jsou obě k dispozici zdarma. Okno softwaru PrusaSlicer, který bude použit pro zpracování navrženého náhradního dílu, je na obrázku č. 10.



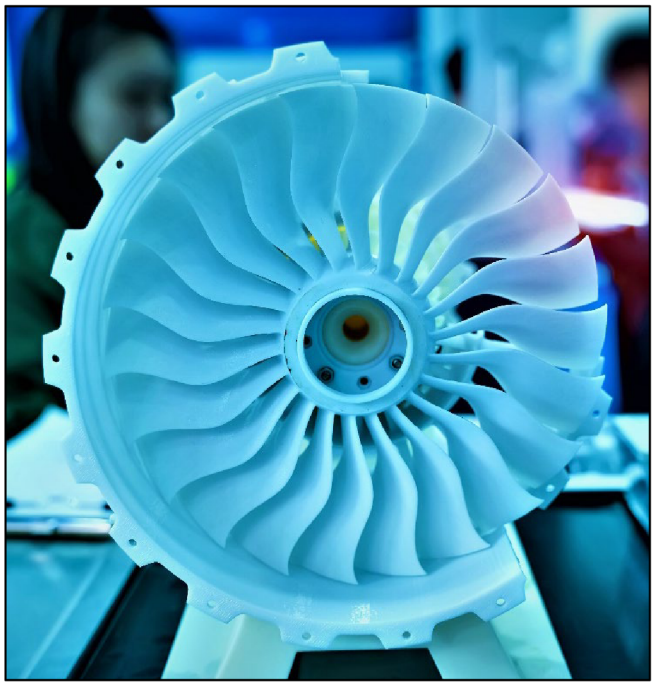
Obrázek 10 - Okno programu PrusaSlicer

2. VYUŽITÍ 3D TISKU V PRŮMYSLU

Všechny technologie zmíněné v předchozích kapitolách se v automobilovém průmyslu již využívají. Používá se tisk z plastu i z kovu. Tato kapitola práce přibližuje nejrůznější způsoby využití 3D tisku v automobilovém průmyslu, konkrétně rozebírá prototypování, výrobu náhradních dílů, použití ke snižování výrobních nákladů, snižování hmotnosti dílů, výrobu na zakázku a snížení ekologické zátěže při výrobě.

2.1 Prototypování

Díky vlastnostem technologií 3D tisku se nabízí využití v oblasti prototypování jednotlivých součástí i celků. Výroba prototypu je nejen levnější, ale hlavně i rychlejší, neboť ho lze vytvořit rovnou z objektu uloženého v digitální podobě bez mezikroků v návrhu, které vyžadují konvenční způsoby výroby [39], jako je třeba vstřikování. To platí pro tisk plastovými materiály, ale i pro tisk kovem. Příprava tisku kovem je mnohem rychlejší než příprava obrábění. Zmíněný článek jako další výhodu uvádí možnost rychle vytvářet náhradu špatně navržených nebo chybně zhotovených dílů během výrobního procesu. 3D tisk pro výrobu prototypů ve fázi vývoje automobilů používá například německá automobilka Audi [40] nebo česká Škoda. Dále se používá při testování aerodynamiky dílů. Jako příklad lze uvést prototyp lopatek dvouproudového motoru, který se nachází na obrázku č. 11.



Obrázek 11 - Prototyp vytvořený pomocí 3D tisku [41]

2.2 Výroba náhradních dílů

3D tisk je možné použít pro výrobu náhradních dílů, které už byly vyřazeny z výroby a nejsou tudíž k dispozici. Reaktivace výroby dílu konvenční cestou by byla příliš nákladná a firmě by se taková investice pravděpodobně nikdy nevyplatila. To platí pro jakékoliv odvětví, tudíž i pro automobilový průmysl. Tuto možnost využívá například firma Porsche pro své starší modely automobilů [42]. Vytisknutý díl šetří firmě čas i náklady spojené s přetvářením výrobní linky na výrobu staršího dílu, zároveň částečně eliminuje nutnost držet velké skladové zásoby starších součástek. Jako příklad jsou uvedeny díly tisknuté pro model Porsche 959 z konce 80. let. Jedná se o plnohodnotné náhrady původních dílů, které podléhají stejným testovacím procesům. Tisk méně běžných náhradních dílů používá i německé Audi. Touto cestou vznikají třeba kovové adaptéry [40] na hadice chladicího okruhu pro starší benzínové motory W12 FSI, které jsou na obrázku č. 12 níže.

Obrázek 12 - Adaptéry na hadice pro Audi W12 FSI [40]

2.3 Snížení nákladů na výrobu

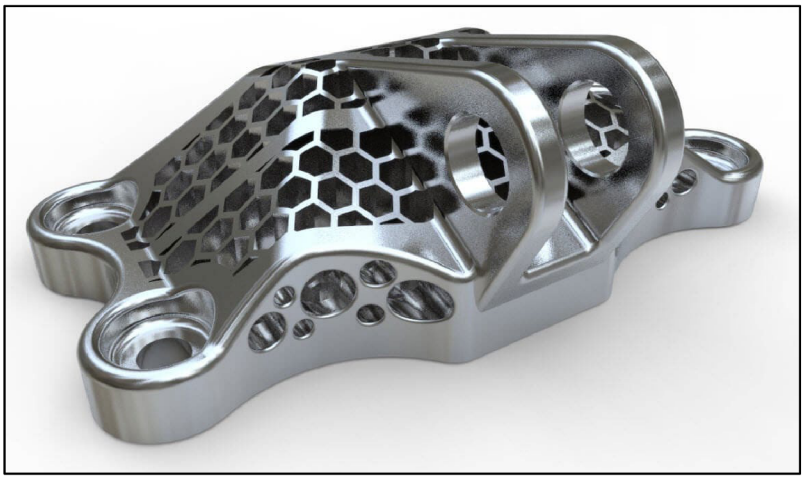
Využití 3D tisku může příznivě ovlivnit cenu konečného výrobku ušetřením nákladů při výrobním procesu. Poslední dobou velmi oblíbenou možností je výroba specifických nástrojů pro výrobu. Jako příklad lze uvést studii provedenou na katedře strojního inženýrství na univerzitě v Córdobě ve Španělsku [43], kde byly zkoumány možnosti využití 3D tisku pro konstrukci formy na výrobu součástí z polyuretanové pěny. Jako náhrada drahé kovové formy byla vyvinuta alternativa v podobě formy z materiálů ABS a polystyrenu, přičemž polystyrenová forma vykazovala lepší výsledky. Povrch forem byl v případech obou materiálů vyhlazen chemickou cestou pro snazší vyjmutí výrobku z formy. Velkou výhodou plastových forem je také jejich rychlá výroba. Oproti jejich kovovým protějškům nabízejí možnost rychlejší změny konfigurace výroby, popřípadě možnost levných oprav forem. Speciální nástroje pomocí 3D tisku vyrábí hned několik

automobilek. Ford [44] tiskne přípravky pro usnadnění manipulace s paletami, články dopravního pásu či nárazníky pro přepravní kontejnery. Česká automobilka Škoda používá 3D tisk ve stejných aplikacích, konkrétně pro výrobu svorek pro manipulaci s ozubenými koly, popisových štítků vozíků nebo ručních měřicích nástrojů. 3D tisk se pro výrobu specifických nástrojů používá i v leteckém průmyslu. Společnost Boeing z amerického Seattlu produkuje pomocí 3D tisku šablony pro ořez a vrtání skládacích wingletů na jeho novém modelu 777X [45]. Tištěná šablona se nachází na obrázku č. 13.

Obrázek 13 - Tištěná šablona pro Boeing 777X [45]

2.4 Snížení hmotnosti dílů

Technologie 3D tisku umožňují výrobu komplexních tvarů jako jsou mřížky či žebra. Začleněním těchto prvků do konstrukce lze vyráběný objekt výrazně odlehčit. V případě kovového tisku je možné použitím hliníkových slitin v kombinaci s 3D tiskem ušetřit 40–80 % hmotnosti [42]. Příklad takového dílu lze vidět na obrázku č. 14.



Obrázek 14 - Odlehčený vytištěný díl z kovu [46]

Dalšího ušetření hmotnosti lze dosáhnout i použitím topologické optimalizace, která je schopná návrhu optimálního tvaru při zachování strukturální pevnosti dílu. Topologickou optimalizaci a zmíněné konstrukční prvky lze aplikovat i při tisku plastovými materiály. Dalšími výhodami, které jsou se snížením hmotnosti spojené, jsou menší spotřeba surovin a snížení množství odpadu. Ušetřená hmotnost se příznivě odrazí na spotřebě paliva či elektrické energie a tím na celkovém dojezdu či doletu dopravního prostředku.

2.5 Výroba na zakázku

3D tisk výrobcům automobilů může pomoci nabídnout potenciálním zákazníkům více možností přizpůsobení vozidla. Jako příklad lze uvést výrobce luxusních automobilů Rolls-Royce, který na vývoji takové služby pracuje [42]. Zákazníci si budou moci přizpůsobovat konkrétní díly k obrazu svému. Do budoucna by firma chtěla zákazníkům nabídnout takové možnosti, jako je vlastní návrh rámu karoserie či přístrojové desky. Díky využití 3D tisku bude výroba originálních dílů levnější než běžnou cestou. 3D tisk umožňuje výrobu vlastních dílů i běžným uživatelům, například tištěné díly na Chevrolet Camaro z roku 1969, které se nachází obrázku č. 15.

Obrázek 15 - Sestava přepínačů pro Chevrolet Camaro 1969 [47]

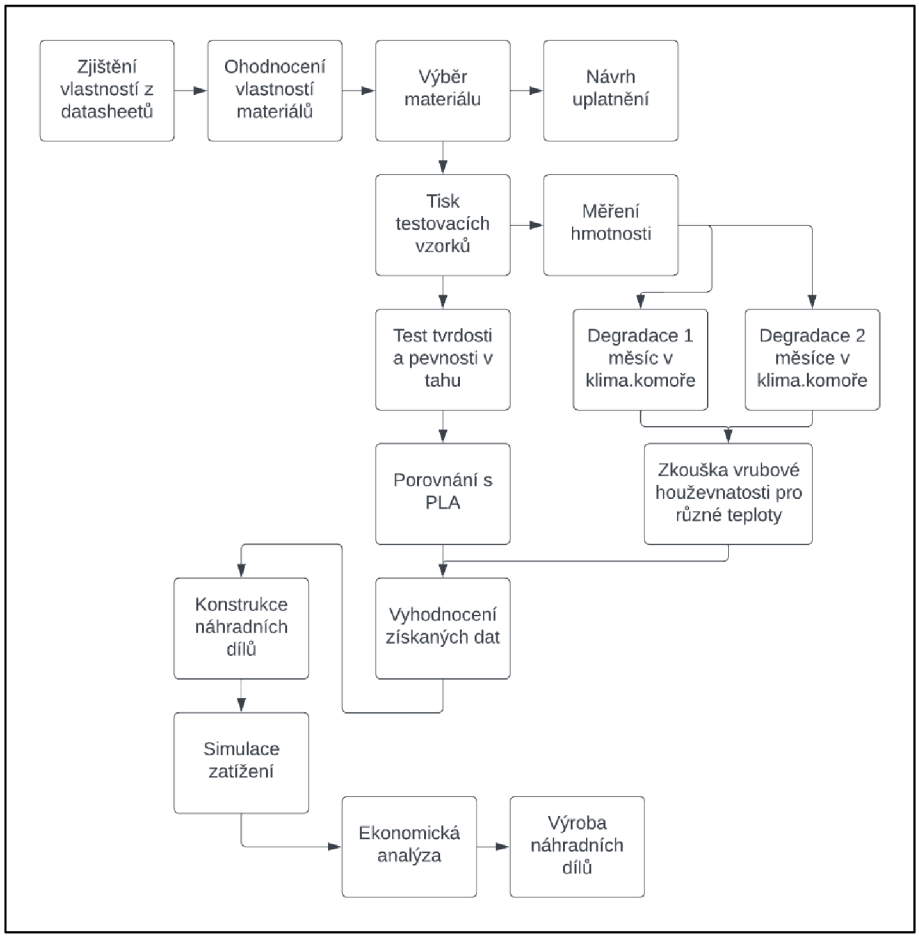
2.6 Ekologie

Jak již bylo v předchozích kapitolách zmíněno, využití 3D tisku umožňuje vyrábět lehčí vozidla. Snížení hmotnosti jakéhokoliv dopravního prostředku se pozitivně odrazí i na jeho spotřebě. Tím je možné snížit zároveň objem emisí vypuštěných při provozu. Výroba lehčích dílů znamená i méně vyprodukovaných emisí při výrobě. Zároveň tímto lze snížit spotřebu surovin při výrobě a také snížit množství odpadního materiálu, výrobní procesy tak mohou být čistší a zanechávat menší ekologickou stopu. Při tisku prototypů a speciálních nástrojů lze použít ekologičtější a rozložitelné materiály jako je PLA. V případě méně ekologických polymerů lze už vytisknuté objekty dále recyklovat zpátky na filament či granulát. Stroj pro recyklaci polymerů je znázorněn na obrázku č. 16.

Obrázek 16 - Stroj pro recyklaci polymerů ProtoCycler+ od společnosti ReDeTec [48]

3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Jak již bylo naznačeno v úvodu, za účelem výběru materiálů pro reálnou aplikaci a pro postup v rámci diplomové práce byl v rámci této části diplomové práce sestaven metodický postup ve formě blokového diagramu. Postup začíná vytipováním vhodných typů materiálů. Pro výrobu náhradního dílu bylo použito FDM/FFF, jelikož je tato technologie ekonomicky málo náročná a výrobní postup rychlý. Jedná tedy se o materiály ve formě filamentu. Pomocí údajů o vlastnostech materiálů od výrobce byl vybrán jeden konkrétní materiál. Následným testováním byly určeny vhodné aplikace v automobilovém průmyslu. Také byly zkonstruovány náhradní díly s využitím tohoto materiálu. Jednotlivé kroky diagramu na obrázku č. 17 budou rozebrány.



Obrázek 17 - Blokový diagram postupu

Prvním krokem v postupu je zjištění vlastností materiálů. Z datasheetů výrobce byla vybrána dostupná relevantní data pro všechny zkoumané materiály. Pro potřeby této práce bylo možné považovat za nejdůležitější hodnoty vyjadřující mechanické vlastnosti materiálů a také jejich cenu. Pro lepší přehlednost byla data zanesena do tabulek.

Dalším blokem je ohodnocení vlastností materiálů. Zde byla ta nejdůležitější data, která byla získána v minulém kroku, klasifikována body či známkou. Pomocí součtu bodů za jednotlivé bodované kategorie pro každou zkoumanou látku byly určeny materiály s nejvhodnějšími vlastnostmi a materiál s nejvyšším hodnocením byl vybrán pro další testování a reálnou aplikaci, to je zároveň dalším krokem blokového diagramu. Materiál by měl mít v závislosti na záměru využití vhodné mechanické a jiné fyzikální vlastnosti a také by měl dávat ekonomický smysl. Také byly na základě těchto vlastností navrženy možné aplikace v automobilovém průmyslu pro nejlépe hodnocené materiály.

Poté byly otestovány mechanické vlastnosti zvoleného materiálu. Byla změřena pevnost v tahu, tvrdost a houževnatost. Jako referenční materiál pro srovnání posloužilo běžné PLA. Dále byl uskutečněn test vrubové houževnatosti pro různé teploty. Měření vrubové houževnatosti totiž nejlépe odpovídá pravděpodobnému zatížení náhradních dílů, kterým se tato práce věnuje. Podrobněji je tato metoda popsána v kapitole „5.4 Zkouška vrubové houževnatosti“. Účelem těchto testů bylo určit skutečné mechanické vlastnosti vybraného materiálu. Dalším důvodem těchto testů bylo zjistit případný vliv nastavení tisku a degradace materiálu na mechanické vlastnosti udávané výrobcem filamentu.

Další blok hodnotí získaná data. V případě, že by vlastnosti materiálu hrubě neodpovídaly údajům od výrobce a byly výrazně mimo předpokládané hodnoty, mohl by být přehodnocen výběr materiálu, popřípadě by bylo možné změnit výrobce materiálu. Takto nově vybraný materiál by musel projít stejnými testy jako ostatní vybrané materiály, také by byla opět vyhodnocena jeho použitelnost pro konkrétní aplikace na základě jeho vlastností.

Tento vybraný materiál byl také podroben testu v klimatické komoře, kde byly vzorky vystaveny simulovanému slunečnímu záření, zvýšené vlhkosti a ostřiku tekutinou. Byla tak simulována různá podnebí a jejich vliv na mechanické vlastnosti polymerů. Mechanické vlastnosti vzorků po degradaci byly testovány opět na vrubovou houževnatost, stejně jako byly testovány vzorky nových materiálů. Tato zkouška umožnila získat další data o degradaci materiálů a prozkoumat případné omezení pro reálné aplikace. Podrobněji tento test rozebírá kapitola „5.4.1 Degradace v klimatické komoře“.

Další a poslední částí blokového schématu je konkrétní použití. Byl navržen náhradní díl pro společnost TATRA DEFENSE a.s., jehož výkres společnost poskytla. Jedná se o dvoudílnou soustavu krytu pojistky v kabině vozidla. Dále bylo simulováno jeho zatížení. Byla provedena případová studie, zabývající se ekonomickou výhodností použití 3D tisku pro výrobu zkonstruovaného náhradního dílu. Materiál, který prošel předchozími testy, byl použit pro výrobu tohoto dílu.

4. VÝBĚR VHODNÉHO MATERIÁLU

Předmětem zkoumání jsou v této kapitole konkrétní materiály, popřípadě jejich alternativy, pro technologii FDM, která bude použita při výrobě zkonstruovaného náhradního dílu. Jak již bylo zmíněno v jedné z předchozích kapitol, mají všechny materiály pro FDM podobu struny (filamentu) s tloušťkou struny 1,75 mm nebo 2,85 mm, která je navinuta na cívce.

Porovnávány jsou běžné materiály PET-G, ABS, ASA, materiály na bázi Nylonu, Vinyl, CPE a HIPS. Z důvodu povahy použití materiálů nebyly do výběru zařazeny degradující a flexibilní materiály.

4.1 Akrylonitril-butadien-styren

ABS je jedním z nejstarších materiálů, jaké se pro 3D tisk používají. Jeho výhoda je mechanická odolnost, otěruvzdornost a nízká cena. Povrch tohoto materiálu lze vyhlazovat za použití acetonu. Má tendenci být objemově nestabilní v závislosti na teplotě. To znamená, že se změnou teploty může dojít k deformaci. Při chlazení výtisku se tento materiál může objemově smrštit skoro o 1 %. Další nevýhodou může být citlivost některých těchto materiálů na UV záření [19] a jejich následná degradace. Při zahřívání se z povrchu materiálu uvolňují nebezpečné výpary, k tisku je tedy vhodný ventilovaný prostor či uzavřený prostor s filtrací. Také by se neměl používat v potravinářském průmyslu. Pro účely této práce posloužil jako zástupce materiálu ABS Extrafill [49] od firmy Fillamentum. Údaje o jeho vlastnostech byly získány z katalogového listu výrobce spolu s normou použitou pro testování.

Hustota [g/cm3]	Pevnost v tahu [MPa]	Prodloužení při přetržení [%]	Modul v tahu [MPa]	Vrubová houževnatost (Charpy) [kJ/m^2]	Teplota tvarové stálosti [°C]
1,04	39	20	1900	25	81
ISO 1183	ISO 527	ISO 527	ISO 178	ISO 179	ISO 75

Tabulka 1 - Vlastnosti materiálu a použité normy (ABS Extrafill)

4.2 Akrylonitril-styren-akrylát

Zkráceně ASA. Tento materiál je vlastnostmi podobný materiálu ABS z předchozí kapitoly. Je mechanicky odolný, v porovnání s ABS je však teplotně odolnější a nedegraduje tolik pod UV zářením [50]. I zde, podobně jako u ABS, lze povrch materiálu vyhladit acetonem. Stejně jako u ABS dochází během tisku k odpařování nebezpečných látek, a proto platí stejná pravidla, výpary navíc mohou zdeformovat

tisknutý objekt. Stejně, jako je tomu v případě materiálu ABS, neměl by se tento plast používat pro potravinářský a lékařský průmysl. Dostupná studie [51] uvádí závislost přilnavosti materiálu na teplotě tisku, pod 240 °C materiál nepřiléhá k podložce. Studie dále popisuje, že tiskem dochází ke snížení houževnatosti a pevnosti v tahu. Vlastnosti a testovací metody byly zjištěny z katalogového listu materiálu Fillamentum ASA Extrafill [52].

Hustota [g/cm3]	Pevnost v tahu [MPa]	Prodloužení při přetržení [%]	Modul v tahu [MPa]	Modul v ohybu [MPa]	Vrubová houževnatost (Izod) [J/m]	Teplota tvarové stálosti [°C]
1,07	40	35	1726	1814	441	86
ASTM D792	ASTM D638	ASTM D638	ASTM D638	ASTM D790	ASTM D256	ASTM D648

Tabulka 2 - Vlastnosti materiálu a použité normy (ASA Extrafill)

4.3 Polyethylentereftalát-glykol

PET-G je jedním z nejpoužívanějších materiálů pro 3D tisk. Jedná se o cenově dostupný materiál s dobrou chemickou, teplotní i mechanickou odolností. Při správném nastavení se tiskne snadněji než ABS a ASA, lépe přiléhá k podložce a nedochází ke smršťování či deformaci, na rozdíl od nich ale není otěruvzdorný. Lze jej recyklovat [20]. Je zdravotně nezávadný a na trhu existují filamenty certifikované pro použití v potravinářském průmyslu. Přesto se jeho použití pro tuto aplikaci nedoporučuje, protože se bakterie mohou dostat mezi vrstvy materiálu. Vlastnosti a metody pochází opět z katalogového listu [53] společnosti Fillamentum.

Hustota [g/cm3]	Pevnost v tahu [MPa]	Prodloužení při přetržení [%]	Modul v ohybu [MPa]	Vrubová houževnatost (Izod) [J/m]	Teplota tvarové stálosti [°C]
1,27	50	120	2150	85	70
ASTM D792	ASTM D638	ASTM D638	ASTM D790	ASTM D256	ASTM D648

Tabulka 3 - Vlastnosti materiálu a použité normy (PET-G)

4.4 Polyamid

Nylon je obchodní označení pro materiály na bázi polyamidů, jedná se o rodinu materiálů s vysokou pevností a houževnatostí. Je nárazuvzdorný a teplotně i chemicky odolný. Podobně jako v případě materiálu PET-G, lze na trhu nalézt filamenty certifikované pro použití v potravinářském průmyslu. Nevýhodou tohoto materiálu je typicky vyšší cena a náročnější tisk. Náročněji se s filamentem nakládá, jelikož se jedná o hygroskopický materiál [21]. Snadno pohlcuje vlhkost ze vzduchu a pro tisk je nutné, aby byl filament suchý. Jako příklady poslouží 2 materiály na bázi nylonu od výrobce Fillamentum a to Nylon FX256 [54] a Nylon CF15 Carbon [55], který je vyztužen uhlíkovými vlákny.

Hustota [g/cm^3]	Pevnost v tahu [MPa]	Prodloužení při přetržení [%]	Modul v tahu [MPa]	Vrubová houževnatost (Charpy) [kJ/m2]	Teplota tvarové stálosti [°C]
1,01	45	50	1400	Bez zlomu	110
ISO 1183	ISO 527	ISO 527	ISO 527	ISO 197-1eU	ISO 75

Tabulka 4 - Vlastnosti materiálu a použité normy (Nylon FX256)

Hustota [g/cm^3]	Pevnost v tahu [MPa]	Prodloužení při přetržení [%]	Modul v tahu [MPa]	Vrubová houževnatost (Charpy) [kJ/m2]	Teplota tání [°C]
1,08	54,5	103	500	86,2	160
ISO 1183	ISO 527	ISO 527	ISO 527	ISO 179	-

Tabulka 5 - Vlastnosti materiálu a použité normy (Nylon CF15 Carbon)

Podobný nylonu CF15 je také relativně nový materiál Onyx, který vyvinula firma Markforged. Složením se jedná o Nylon obohacený o vlákna z uhlíku [56]. Dle výrobce se vyznačuje svou silou, houževnatostí a chemickou odolností.

Hustota [g/cm^3]	Pevnost v tahu [MPa]	Pevnost v ohybu [MPa]	Prodloužení při přetržení [%]	Modul v ohybu [MPa]	Modul v tahu [MPa]	Vrubová houževnatost (Izod) [J/m]
1,2	37	71	58	3000	2400	330
-	ASTM D638	ASTM D790	ASTM D638	ASTM D790	ASTM D638	ASTM D256-10 A

Teplota tvarové stálosti [°C]
145
ASTM D648 B

Tabulka 6 - Vlastnosti materiálu a použité normy (Onyx)

4.5 Polyvinylchlorid

PVC je jedním z běžně používaných polymerů. Je tvrdý a chemicky i mechanicky odolný. PVC také velmi dobře odolává vlhkosti. Jeho nevýhodou je menší teplotní odolnost v porovnání s předchozími materiály. Jeho použití pro potravinářství se nedoporučuje. Tabulka s vlastnostmi pochází z katalogového listu materiálu Fillamentum Vinyl 303 [57].

Hustota [g/cm3]	Pevnost v tahu [MPa]	Prodloužení při přetržení [%]	Teplota měknutí [°C]
1,35	46,1	13,1	71
10-LA 022	10-LA 049	10_LA 049	ISO 306

Tabulka 7 - Vlastnosti materiálu a použité normy (Vinyl 303)

4.6 Ko-polyester

CPE je materiál složením podobný materiálu PET-G. Může být použit jako alternativa k již zmíněným ABS, ASA či PET. Jedná se o odolný, houževnatý materiál [58]. Je chemicky a teplotně odolnější než ABS. Také je pevnější v tahu, ohybu i rázu. Na trhu se vyskytují filamenty s certifikací pro styk s potravinami. Jako představitel toho materiálu poslouží Fillamentum CPE HG100 [59].

Hustota [g/cm3]	Pevnost v tahu [MPa]	Prodloužení při přetržení [%]	Modul v ohybu [MPa]	Vrubová houževnatost (Izod) [kJ/m2]	Teplota tvarové stálosti [°C]
1,25	47	150	1860	Bez zlomu	80
ASTM D792	ASTM D638	ASTM D638	ASTM D790	ASTM D256	ASTM D648

Tabulka 8 - Vlastnosti materiálu a použité normy (CPE HG100)

4.7 High impact polystyrene

HIPS (česky houževnatý polystyren) je materiál s dobrými mechanickými vlastnostmi. Je houževnatý a odolný vůči nárazu a teplu. Často je využíván k tisku podpěr, především v kombinaci s materiálem ABS [60]. V porovnání s ním je více citlivý na UV záření. Řadí se mezi materiály, které lze použít pro potravinářské účely a existují filamenty s certifikací pro tyto aplikace. Jako příklad je uveden materiál HIPS Extrafill [61] z katalogu společnosti Fillamentum.

Hustota [g/cm^3]	Pevnost v tahu [MPa]	Prodloužení při přetržení [%]	Modul v ohybu [MPa]	Modul v tahu [MPa]	Vrubová houževnatost (Charpy) [kJ/m^2]
1,05	26	40	2100	2000	Bez zlomu
ISO 1183	ISO 527	ISO 527	ISO 178	ISO 527	ISO 179-1eU

Rázová houževnatost (Izod) [kJ/m^2]	Teplota tvarové stálosti [°C]
180 J/m	89
ASTM D256-A	ISO 75

Tabulka 9 - Vlastnosti materiálu a použité normy (HIPS Extrafill)

4.8 Porovnání a výběr materiálu

V této kapitole budou porovnány vlastnosti materiálů představených v předchozích kapitolách. Záměrem kapitoly je určit materiály, které budou svými mechanickými a ekonomickými vlastnostmi nejvhodnější pro konstrukci náhradních dílů v automobilovém průmyslu.

Během zkoumání datasheetů výrobce bylo zjištěno, že ne všechny materiály byly podrobeny stejným testům (popřípadě stejným metodikám testu). Některé údaje například

o tvrdosti, rázové houževnatosti, modulu v ohybu, či o modulu v tahu v tabulkách některých materiálů prostě chybí. Porovnávání mechanických vlastností materiálů tak bylo obtížnější a porovnávat bylo možné jen ty údaje, které byly uvedeny u všech materiálů. Pro všechny zvažované materiály byly dostupné údaje o jejich hustotě, pevnosti v tahu, prodloužení při přetržení, údaje o jejich hodnotě tepelné deformace (HDT) a cena jednoho balení materiálu. Data byla zapsána do tabulky č. 10.

Materiál	Hustota [g/cm^3]	Pevnost v tahu [MPa]	Prodloužení při přetržení [%]	HDT [°C]	Cena za balení [Kč]	Cena za 1 kg [Kč]
PETG	1,27	50	120	70	550	550
ABS Extrafill	1,04	39	20	81	580	773
ASA Extrafill	1,07	40	35	86	616	821
Nylon CF15 Carbon	1,08	54,5	103	110	1660	2767
Nylon FX256	1,01	45	50	110	1420	1893
Onyx	1,20	37	40	145	5400	5400
CPE HG100	1,25	47	150	80	920	1227
Vinyl 303	1,35	46,1	13,1	71	1170	1560
HIPS Extrafill	1,05	26	40	89	670	893

Tabulka 10 - Porovnání vlastností materiálů pro 3D tisk

Cílem je vybrat jeden konkrétní materiál, který bude následně podroben dalším testům mechanických vlastností a testu v klimatické komoře. Při výběru byly za nejvíce relevantní považovány údaje o pevnosti v tahu, údaje o hodnotě tepelné deformace a cena filamentu.

Pevnost v tahu je údaj vyjadřující maximální možné napětí materiálu při jeho napínání těsně před tím, než se testovaný vzorek přetrhne. Vyjádřen je jako poměr síly ku ploše, jeho jednotkou je jednotka tlaku Pascal. Měření pevnosti v tahu probíhá na vzorku materiálu o rozměrech určených normou, který je upnut do měřicího přístroje. Během měření je vzorek postupně zatěžován tahem, přičemž síla je zaznamenávána až do přetržení. Údajem vhodným pro doplnění představy o chování materiálu při zatížení v tahu je výše dostupné prodloužení při přetržení. To udává, o kolik se testovaný vzorek prodlouží před tím, než dojde k úplnému přetržení a vyjadřuje tak míru plastické deformace.

HDT (Heat Deflection Temperature nebo také jinak Heat Distortion Temperature) je údaj vyjadřující teplotní odolnost daného materiálu. Teplota tvarové stálosti [62], jak lze tento pojem přeložit do českého jazyka, udává konkrétní teplotu, při které vzorek ztrácí svou strukturální pevnost a dochází k výraznějším průhybům materiálu při zatížení [63].

Testování probíhá na vzorku materiálu, který je zatěžován silou a zároveň je vystaven vyšší než běžné pokojové teplotě. Teplota je postupně zvyšována a je měřen průhyb materiálu. Teplota, při které dojde k maximálnímu průhybu vzorku, který udává norma či testovací metoda, je teplotou tvarové stálosti.

Cena za jedno balení byla přepočtena na cenu za kilogram daného materiálu, jelikož se různé filamenty prodávají v jiných gramážích. Cenu za kilogram lze považovat za údaj více vypovídající o ekonomické výhodnosti materiálu. Některá data, jako například hustota materiálu či prodloužení při přetržení byla vyhodnocena jako méně relevantní pro tento výběr. V pozdějších fázích projektu při výběru konkrétních použití ovšem můžou tato data pomoci například s určením omezení na určité aplikace.

Jelikož nebyly určeny konkrétní vlastnosti, ve kterých by měly vybírané materiály vynikat, nebyla hodnoceným kategoriím přiřazena žádná váha. Hodnocení jednotlivých aspektů materiálů probíhalo na stupnici od 1 do 10. Pro pevnost v tahu představuje hodnota 1 nejnižší zaznamenanou pevnost v tahu, konkrétně se jedná o hodnotu 26 MPa u materiálu HIPS Extrafill. Nejvyšší známkou 10 bodů byl klasifikován polymer Nylon CF15 Carbon s hodnotou 54,5 MPa. Klasifikace všech hodnot, které se nachází mezi těmito dvěma, proběhla pomocí dosazení do rovnice

$$y = 0{,}3158x - 7{,}2105\,, \tag{1}$$

která vyjadřuje lineární přímku mezi těmito body.

Pro hodnocení teploty ztráty tvarové stálosti byla nejnižší známkou klasifikována hodnota 70 °C u materiálu PETG. Naopak nejvyšší teplotní odolnost vykazuje materiál Onyx od společnosti Markforged s hodnotou 145 °C a byl proto ohodnocen 10 body.

Výpočet hodnocení pro další materiály proběhl obdobným postupem jako v případě pevnosti v tahu. Rovnice

$$y = 0{,}12x - 7{,}4 \tag{2}$$

vyjadřuje lineární přímku mezi hodnotami teploty 70 °C a 145 °C.

Podobný postup byl zvolen i pro ohodnocení ceny materiálu v přepočtu na 1 kilogram. Za cenově nejvýhodnější materiál lze považovat PETG. 1 kg filamentu stojí 550 Kč a materiál byl tak klasifikován 10 body. Naopak nejdražším materiálem ve výběru je materiál Onyx na bázi nylonu. Kilogram vyjde zhruba na 5400 Kč a materiál získal hodnocení 1 bod. Materiály s cenami mezi byly hodnoceny opět dosazením do lineární rovnice ve tvaru

$$y = -0{,}0019x + 11{,}021\,. \tag{3}$$

Pro lepší přehlednost byla data s klasifikací zapsána do tabulky č. 11.

Materiál	Pevnost v tahu	HDT	Cena	Hodnocení
PETG	8,58	1	10	19,56
ABS Extrafill	5,11	2,32	9,55	16,98
ASA Extrafill	5,42	2,92	9,46	17,80
Nylon CF15 Carbon	10,00	5,8	5,76	21,56
Nylon FX256	7,00	5,8	7,42	20,22
Onyx	4,47	10	1	15,47
CPE HG100	7,63	3,25	7,20	18,52
Vinyl 303	7,35	1,225	5,84	16,52
HIPS Extrafill	1,00	5,275	8,57	13,60

Tabulka 11 - Klasifikace vlastností materiálů

Jak je patrné z tabulky, nejlépe hodnoceným materiálem je Nylon CF15 Carbon s hodnocením 21,56 bodů, proto byl zvolen k dalšímu testování a pro použití při konstrukci náhradních dílů. Těsně pod ním se nachází Nylon FX256 s 20,22 body. Vysoce klasifikován byl také polymer PETG, který byl klasifikován 19,56 body, kopolymer CPE HG100 s 18,52 body a ASA Extrafill se 17,80 body. Nylon a PETG excelují vždy ve 2 kategoriích. Nylon CF15 Carbon je pevný a teplotně odolný materiál, který je ale druhým nejdražším materiálem. PETG je zase velmi levný a jeho pevnost je stále velmi vysoká, postrádá ovšem teplotní odolnost nylonu. Lze tak předběžně předpokládat, že tyto materiály by nalezli využití v jiných aplikacích, respektive lze očekávat že by bylo vhodné je použít na výrobu jiných náhradních dílů. Naproti tomu polymery CPE HG100 a ASA Extrafill vysloveně neexcelují ani v jedné kategorii, zato je jejich hodnocení napříč kategoriemi relativně vysoké.

Za zajímavý materiál, vzhledem k jeho hodnocení, lze považovat i polymer ABS Extrafill. Jeho klasifikace se pohybuje jen těsně pod hodnotou 17,80 pro ASA Extrafill. Nebyl klasifikován vysloveně špatně v žádné z kategorií, dá se tak hodnotit podobně jako například výše zmíněný materiál ASA. Nejnižší hodnocení si vysloužily filamenty Vinyl 303, který získal 16,52 bodů, HIPS Extrafill se 14,85 body a kvůli své vysoké ceně i Onyx, který při hodnocení získal celkem 13,60 bodů. Proto byly tyto materiály vyhodnoceny jako nejméně zajímavé pro další zkoumání v rámci této diplomové práce.

4.9 Možnosti aplikace

Hodnocené materiály se svými vlastnostmi liší, a tak se budou lišit i možnosti použití těchto materiálů v automobilovém průmyslu.

Nejlépe hodnocený polymer Nylon CF15 Carbon je podle tabulkových hodnot mechanicky nejodolnější a tepelně druhý nejodolnější z porovnávaných materiálů. To jej předurčuje k použití v náročnějších aplikacích. Jeho vysoká teplotní odolnost umožňuje použití i v motorovém prostoru. Díky tomu by bylo možné zkonstruovat z tohoto materiálu například držáky a konzole pro různé díly v motorovém prostoru jako vzpěra

na turbo, alternátor či vzduchový filtr, nebo součásti chlazení a plastové díly v okolí chladiče. Také by byl z vybraných materiálů nejvhodnější pro realizaci plastových krytů bloku motoru. To platí i pro verze Nylon FX256. Všechny tyto aplikace platí i pro materiál Onyx od společnosti Markforged, protože se jedná o obdobný materiál s podobnými parametry a vysokou teplotní odolností, jeho použití by ovšem bylo nákladnější.

Materiál PET-G se dle dat vyznačuje slušnou pevností v tahu, malou odolností vůči tepelnému namáhání a je levný. Využít ho tak lze především v aplikacích, kde nedochází k výraznému vystavení teplu. Můžeme tak pokládat PET-G za nevhodný pro konstrukci dílů, které se nachází v motorovém prostoru. Pro konstrukci ostatních dílů je tento materiál vhodný za předpokladu, že nebude docházet k extrémnímu mechanickému zatížení. Jeho využití lze nalézt především v použití pro díly v interiéru, například pro části přístrojové desky, držáky či ovládací prvky.

Polymery ASA Extrafill a CPE HG100 lze považovat za všestrannější materiály z výběru. Jejich pevnost v tahu je nižší než pevnost PET-G, jsou však teplotně odolnější. Jak ASA, tak CPE jsou mírně dražší než PET-G, avšak cena materiálu je, především v případě ASA Extrafill, stále příznivá. Lze předpokládat, že bude možné ho použít i v motorovém prostoru v dostatečné vzdálenosti od zahřívaných částí motoru. Stejně jako PET-G lze tento materiál použít i pro konstrukci ostatních nenamáhaných nebo lehce namáhaných dílů a pro výrobu dílů v interiéru. Díly, které by bylo možné z tohoto materiálu realizovat, jsou například kryty v motorovém prostoru i mimo, části světlometů a podobně jako u PET-G polymerové součásti interiéru vozidel.

Všechny zmiňované materiály by mohly být využity i během výrobního procesu v automobilovém průmyslu. V průběhu sestavování prototypů je možné aditivní výrobu využít pro konstrukci součástí, které ještě nemusí být v konečné fázi vývoje. Je možné vytvářet neobvyklé a specifické součásti výrobních strojů.

5. TESTOVÁNÍ PARAMETRŮ MATERIÁLU

Za účelem doplnění dat udávaných výrobcem a zjištění dalších parametrů matriálu pro lepší identifikaci možných aplikací a určení vlivu okolí na vlastnosti materiálu byly otestovány další mechanické vlastnosti. Ověřena byla pevnost v tahu a pro získání dalších údajů byla provedena zkouška vrubové houževnatosti a zkouška tvrdosti na stupnici Shore. Testy byly provedeny na materiálu Nylon CF15 Carbon, který byl vybrán v předchozí kapitole. Zkoušky byly vykonány na nově vytištěných vzorcích. Zkouška vrubové houževnatosti byla provedena i na vzorcích s různým stádiem degradace. Degradace materiálů byla simulována v klimatické komoře. Pro porovnání výsledků byl použit materiál PLA.

5.1 Příprava testovacích vzorků

Tisk všech testovacích vzorků proběhl na FDM tiskárně Ultimaker 2+, ta je vyobrazena na snímku č. 18.

Obrázek 18 - Tiskárna Ultimaker 2+ [64]

Parametry tisku testovacích vzorků byly nastaveny v souladu s doporučením výrobce zvoleného filamentu. Materiál PLA byl tištěn při teplotě 220 °C a pro Nylon CF15 Carbon byla zvolena teplota 260 °C. Další data o nastavení tiskárny Ultimaker 2+ při tisku vzorků byla vynesena do tabulky č. 12.

Parametr	PLA	Nylon CF15 Carbon
Teplota trysky [°C]	220	260
Teplota tiskové podložky [°C]	60	100
Rychlost tisku [mm/s]	60	60
Výška vrstvy [mm]	0,2	0,2
Šířka vrstvy [mm]	0,4	0,4
Výplň objektu	Pouze perimetry (Koncentrická 100 %)	Pouze perimetry (Koncentrická 100 %)

Tabulka 12 - Parametry tisku testovacích vzorků

5.2 Zkouška pevnosti v tahu

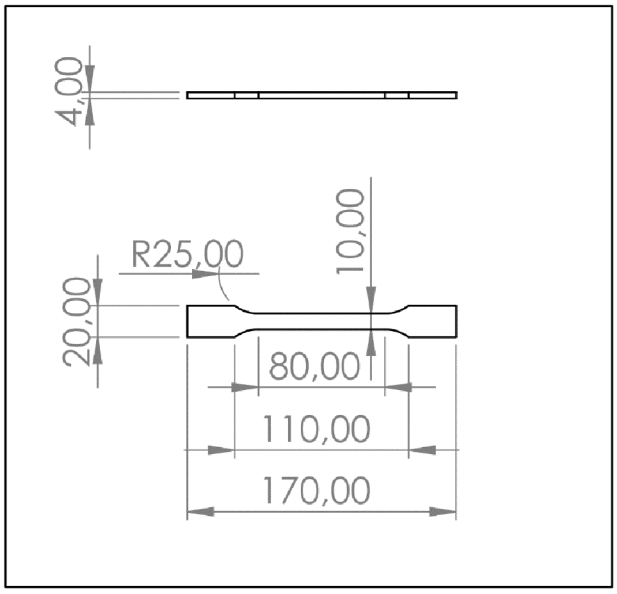
Prvním testem byla zkouška pevnosti v tahu, jedná se o jeden z údajů, který výrobce filamentů uvádí u všech svých produktů. Tato veličina (mez pevnosti v tahu) udává maximální možnou hodnotu síly, které je materiál schopen odolat při natahování, aniž by došlo k jeho destrukci [65]. Lze vyjádřit vztahem

$$\delta_m = \frac{F_{max}}{S_0}\ [MPa], \tag{4}$$

kde δ_m označuje mez pevnosti v tahu, F_{max} maximální sílu zatížení v tahu během testu a S_0 průřez tělesa na začátku zkoušky [66].

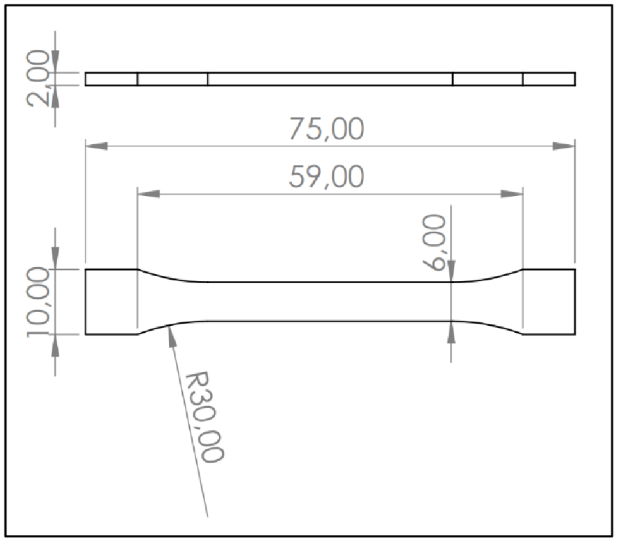
Testování probíhá na normovaných vzorcích, které jsou upnuty do testovacího přístroje. Vzorek je postupně pomalu natahován až do jeho prsknutí. Síla tahu vynaložená v momentu přetržení vzorku je hodnotou pevnosti v tahu. Při měření pevnosti v tahu mohou být měřeny i další veličiny vypovídající o chování materiálu při jeho natahovaní, často je měřeno například prodloužení a je určován Youngův modul pružnosti, který udává vztah napětí a deformace, kterou ono napětí vyvolá.

Zkoušky byly prováděny dle normy, která se zabývá vlastnostmi plastů v tahu, konkrétně se jedná o normu ČSN EN ISO 527. Tato norma udává i tvar testovacího vzorku 1A pro materiál PLA. Použité vzorky jsou 170 mm dlouhé, 20 mm široké a 4 mm vysoké. Uprostřed je každý vzorek zúžený na šířku 10 mm. Pro lepší přehlednost je testovací vzorek znázorněn na obrázku č. 19.



Obrázek 19 - Testovací vzorek 1A dle normy ČSN EN ISO 527

Testovací vzorky na zkoušku pevnosti v tahu materiálu Nylon CF15 Carbon typu 1BA jsou 75 mm dlouhé a 2 mm vysoké. Šířka vzorku v místě upnutí činí 10 mm, uprostřed je vzorek široký 6 mm. Výkres vzorku je na obrázku č. 20.



Obrázek 20 - Testovací vzorek 1BA dle normy ČSN EN ISO 527

Testování vzorků probíhalo na zkušebním stroji Labor Machine UTS 5 na Fakultě elektrotechniky a komunikačních technologií. Měření probíhalo při pokojové teplotě 23 °C. Data naměřená na vzorcích typu 1A materiálu PLA byla vynesena do tabulky č. 13.

Vzorek	F_{max} [N]	$F_{konc.}$ [N]	S_{max} [mm]	$S_{konc.}$ [mm]	A_{max} [%]	$A_{konc.}$ [%]
1	2290,5	1741,0	3,68	4,83	2,17	2,84
2	2327,8	2064,4	3,81	4,50	2,24	2,65
3	2376,9	2131,0	3,71	4,35	2,18	2,56
4	2242,8	2079,6	2,95	3,97	2,34	3,15
5	2302,8	2142,5	3,50	3,59	2,06	2,11
Průměr	2308,1	2031,7	3,53	4,25	2,20	2,66
σ	49,3	165,8	0,34	0,48	0,10	0,38

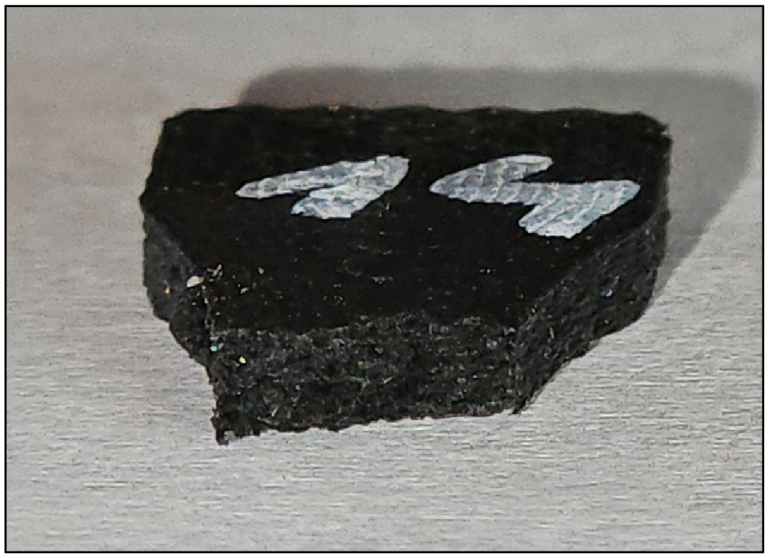
Tabulka 13 - Tabulka s naměřenými hodnotami pevnosti v tahu (PLA)

Naměřená data materiálu Nylon CF15 Carbon s použitím vzorků typu 1BA jsou v tabulce č. 14.

Vzorek	F_{max} [N]	F_{konc} [N]	S_{max} [mm]	S_{konc} [mm]	A_{max} [%]	A_{konc} [%]
1	1350,0	1275,3	1,52	1,66	2,17	2,37
2	1347,2	1214,9	1,66	2,01	2,36	2,87
3	1382,4	1289,3	1,62	1,79	2,32	2,56
4	1359,7	1184,7	1,42	1,52	2,02	2,17
5	1365,5	1172,5	1,40	1,54	2,00	2,20
6	1413,9	1339,8	1,70	1,85	2,42	2,64
7	1446,9	1344,1	1,55	1,79	2,21	2,55
8	1359,2	1287,6	1,54	1,67	2,21	2,38
Průměr	1378,1	1263,5	1,55	1,73	2,21	2,47
σ	35,1	66,1	0,11	0,17	0,15	0,23

Tabulka 14 - Tabulka s naměřenými hodnotami pevnosti v tahu (Nylon-Carbon)

Při měření byla určena maximální dosažená pevnost v tahu F_{max}, pevnost v tahu při přetržení F_{konc}, prodloužení při dosažení maximální pevnosti v tahu S_{max}, prodloužení při přetržení S_{konc} a také tato prodloužení vyjádřená v procentech A_{max} a A_{konc}. Pro naměřené hodnoty byla určena směrodatná odchylka σ pomocí funkce v excelu. Zúžená plocha, na kterou působí tah, má u vzorku typu 1A plochu celkem 40 mm^2, u vzorku typu 1BA činí plocha 12 mm^2. V přepočtu na plochu je pevnost v tahu materiálu Nylon CF15 Carbon 114,84 N/mm^2, tedy 114,84 MPa a 57,70 N/mm^2 (57,70 MPa) pro PLA. Nylon vyztužený uhlíkovými vlákny tak vykazuje zhruba 2x vyšší pevnost v tahu než PLA. Při zvýšení podílu uhlíkových vláken v materiálu by se pevnost v tahu ještě zvýšila, jak dokazuje studie [67] provedená na univerzitě Zhejiang v čínském Chang-čou. Procentní prodloužení při přetržení je u obou materiálů velmi podobné a pohybuje se nad hranicí 2 %. Přetržený nylonový testovací vzorek pevnosti v tahu se nachází na obrázku č. 21.

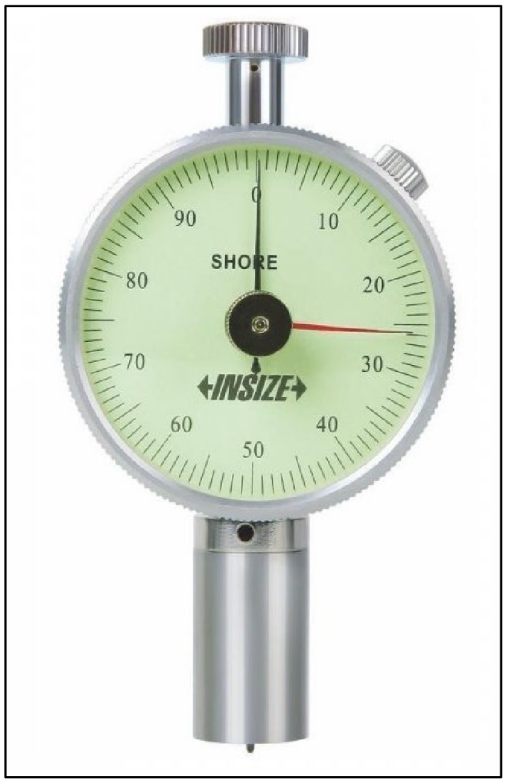


Obrázek 21 - Přetržený testovací vzorek 1BA materiálu Nylon CF15 Carbon

5.3 Zkouška tvrdosti

Vzorky byly podrobeny testu tvrdosti. Pro potřeby této práce bylo použito měření tvrdosti materiálu na stupnici Shore, jelikož je tato metoda vhodná pro měření tvrdosti polymerů. Při takových testech je do zkoumaného vzorku vtlačován hrot, většinou ve tvaru ostré špičky. Vtlačování probíhá určitou silou a s maximální hloubkou průniku, tyto hodnoty jsou dané normou nebo použitou metodou měření. Tvrdost materiálu je vyjádřena číslem, vyšší číslo značí vyšší tvrdost testovaného materiálu. Stupnice obsahuje hodnoty od 0 do 100, přičemž hodnota 0 odpovídá stavu, kdy hrot pronikne až do maximální hloubky průniku, která je určena metodou, nebo měřicím přístrojem. Pokud hrot nepronikne do materiálu vůbec, je takový materiál hodnocen číslem 100. Existuje celkem 12 typů stupnice, liší se tvarem vtlačovaného hrotu, působící silou, hloubkou vtlačení a každá se hodí pro jiné typy materiálu, respektive pro jinak tvrdé materiály.

Měření probíhalo dle normy ČSN EN ISO 868. Použit byl manuální měřicí přístroj INSIZE ISH-SDM s rozsahem 20–90 HD na stupnici Shore D a hloubkou vniku ostrého hrotu 2,5 mm. Přístroj se nachází na obrázku č. 22.



Obrázek 22 - Tvrdoměr INSIZE ISH-SDM *[68]*

Při měření byla okolní pokojová teplota 23 °C. Měřeny byly vzorky pro materiál PLA i Nylon CF15 Carbon ve tvaru destičky o šířce 50 mm, délce 50 mm a výšce 5 mm. Naměřená data se nachází v tabulce č. 15.

Vzorek	PLA		Nylon CF15 Carbon	
Měření	**H_D Vršek**	**H_D Spodek**	**H_D Vršek**	**H_D Spodek**
1	82,5	79,0	70,0	75,0
2	82,0	77,0	70,0	73,0
3	83,0	77,5	70,0	74,0
4	82,5	78,5	69,0	76,0
5	83,5	78,5	70,0	75,0
6	83,5	77,6	70,0	77,0
7	83,0	79,0	72,0	75,0
8	83,0	78,0	72,0	77,0
9	83,5	78,0	68,0	75,0
10	83,5	78,5	69,0	75,0
Průměr	83,0	78,2	70,0	75,2
D (X)	0,28	0,43	1,56	1,51
σ	0,50	0,62	1,18	1,17

Tabulka 15 - Naměřená data tvrdosti materiálů PLA a Nylon CF15 Carbon

Z jednotlivých měření byly vypočítány průměrné hodnoty tvrdosti pro oba materiály. Průměrná tvrdost PLA činí 83 z přední strany vzorku a 78,2 vzadu. Tvrdost nylonu je 70 zpředu a tvrdost zadní strany vzorku činí 75,2. Z výsledků je patrné, že je tvrdost vzorku, kromě materiálu, ovlivněna i texturou povrchu. Studie [69] uskutečněná na Univerzitě Karla III. v Madridu uvádí, že tvrdost lisovaného materiálu PA12 se pohybuje mezi 71 a 74 body na stupnici Shore D. Jde tedy o hodnoty srovnatelné s těmi z provedeného měření. U vzorku z PLA vykazuje vyšší tvrdost vrchní strana. U nylonu je tvrdší strana, která se nacházela na tiskové podložce. Také byl určen rozptyl hodnot D (X) a směrodatná odchylka σ. Materiál PLA je tvrdší, než je polymer Nylon CF15 Carbon.

5.4 Zkouška vrubové houževnatosti

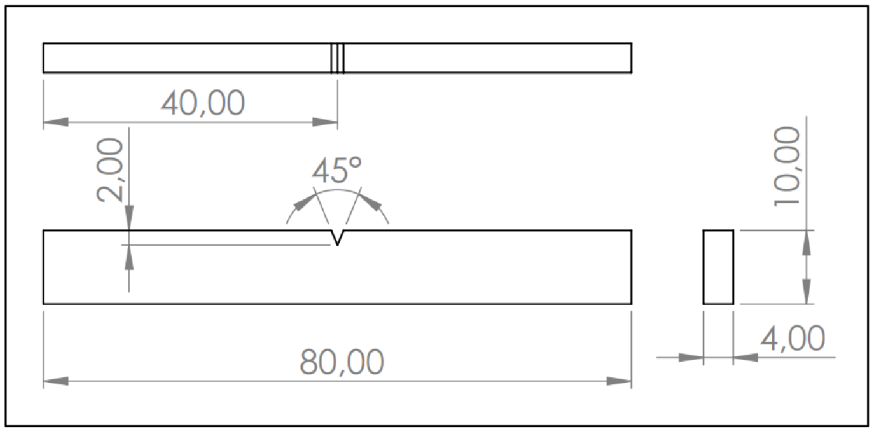
Pro otestování mechanických vlastností byla provedena zkouška vrubové houževnatosti Charpyho metodou. Cílem této zkoušky je zjistit hodnoty houževnatosti pro zvolený materiál. Test byl nejdříve proveden při pokojové teplotě.

Vrubová houževnatost se značí jako KCV a vyjadřuje množství energie, které dokáže materiál absorbovat, než se zlomí [70]. Její jednotkou je tedy joule a jedná se o hodnotu při přelomení materiálu. Je také možné přepočítat hodnotu energie vzhledem k ploše v místě přerážení materiálu, což lze vyjádřit vzorcem:

$$KCV_c = \frac{KV}{S}\ [J/m^2]\ , \qquad (5)$$

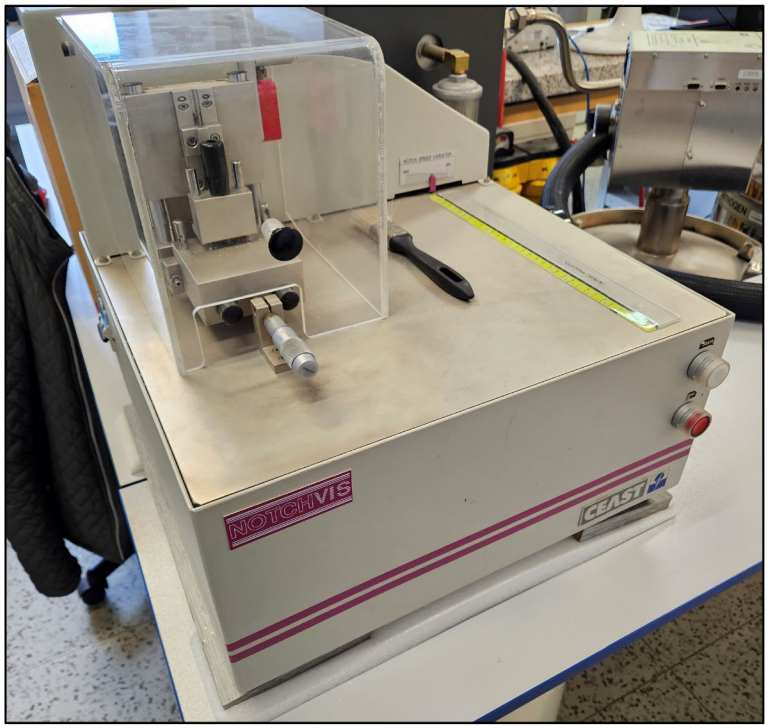
kde KCV_c vyjadřuje hodnotu vrubové houževnatosti na plochu, KV je hodnotou vykonané práce v joulech a S je plochou v místě přeražení.

Zkouška se provádí na vzorcích ve tvaru podlouhlého kvádru s drážkou uprostřed po celé šířce tělesa. Rozměry vzorku mohou záviset na normě a použitém stroji. Vzorky použité při měření vrubové houževnatosti byly dlouhé 80 mm, široké 10 mm a vysoké 4 mm. Drážka na vzorku má tvar rovnoramenného trojúhelníku a její odvěsny svírají úhel 45°. Testovací vzorky byly vytištěny jako kvádry a vrub byl vytvořen pomocí vrubovacího stroje CEAST NOTCHVIS 6951. Podle dostupných dat může orientace vzorku při tisku vlivem anizotropie výrazně ovlivnit jeho pevnost [71]. Nákres testovacího vzorku pro zkoušku vrubové houževnatosti se nachází na obrázku č. 23.



Obrázek 23 - Testovací vzorek (Vrubová houževnatost)

Použitý vrubovací stroj je vyobrazen na snímku č. 24.



Obrázek 24 - Vrubovací stroj CEAST NOTCHVIS 6951

Síla pro přeražení vzorku je vyvinuta pomocí zdviženého kladiva na ramenu, které je na začátku experimentu uvolněno. Kladivo narazí do vzorku na protější straně, než je drážka, a vzorek přerazí. Síla potřebná k přeražení vzorku je hodnota určující vrubovou houževnatost. Záznam může probíhat v závislosti na použitém stroji digitálně, nebo pomocí měření koncové polohy ramena vůči ocejchované stupnici. Zkouška je specifikována normou ČSN EN ISO 148 pro kovové materiály a normou ČSN EN ISO 179 pro polymery. Ačkoliv se jedná o polymer, použita byla norma

ČSN EN ISO 148, jelikož specifikuje i postupy pro měření vrubové houževnatosti za různých teplot.

Měření bylo provedeno na kalibrovaném stroji Zwick 5113.100 na Fakultě chemické Vysokého učení technického v Brně. Přístroj byl osazen kladivem s celkovou energií 10,8 J, ztrátová energie kladiva činila celkem 0,016 J. Jelikož není ztrátová energie kladiva nulová, je třeba upravit každou naměřenou hodnotu vrubové houževnatosti dle vzorce:

$$\mathrm{KCV}_{\text{skutečná}} = \mathrm{KCV}_{\text{naměřená}} - 0{,}016 \ \ [\mathrm{J}] \ . \tag{6}$$

Použitý měřicí přístroj je znázorněn na obrázku č. 25.

Obrázek 25 - Přístroj pro měření vrubové houževnatosti Zwick 5113.100

Naměřené hodnoty vrubové houževnatosti pro PLA i Nylon CF15 Carbon při pokojové teplotě 23 °C byly vyneseny do tabulky č. 16.

Vzorek	PLA [J]	Nylon CF15 Carbon [J]
1	0,088	0,320
2	0,100	0,357
3	0,088	0,382
4	0,088	0,320
5	0,088	0,321
Průměr	0,090	0,340
σ	0,000	0,001
D (X)	0,005	0,028

Tabulka 16 - Naměřené hodnoty vrubové houževnatosti pro PLA a Nylon-Carbon

Z naměřených dat byla vypočtena průměrná hodnota, rozptyl hodnot a směrodatná odchylka. Na první pohled je patrné, že materiál Nylon CF15 Carbon vykazuje více než 3x vyšší houževnatost v porovnání s PLA. Jelikož potenciální zatížení náhradního dílu pro společnost TATRA DEFENSE a.s. bude klást nejvyšší nároky právě na vrubovou houževnatost, bude dál prozkoumán právě tento parametr. Vzhledem k výrazně vyšší houževnatosti nylonu v porovnání s materiálem PLA bude dále testován pouze Nylon CF15 Carbon. Pro lepší povědomí o chování vrubové houževnatosti v různých prostředích byla provedena zkouška vrubové houževnatosti pro různé teploty. Ozkoušení působení vnějších vlivů proběhlo za pomocí klimatické komory, které je popsáno v příští kapitole práce. Dalším důvodem pro uskutečnění tohoto výzkumu je nedostupnost jakýchkoliv dat o hodnotách vrubové houževnatosti tohoto materiálu při různých teplotách.

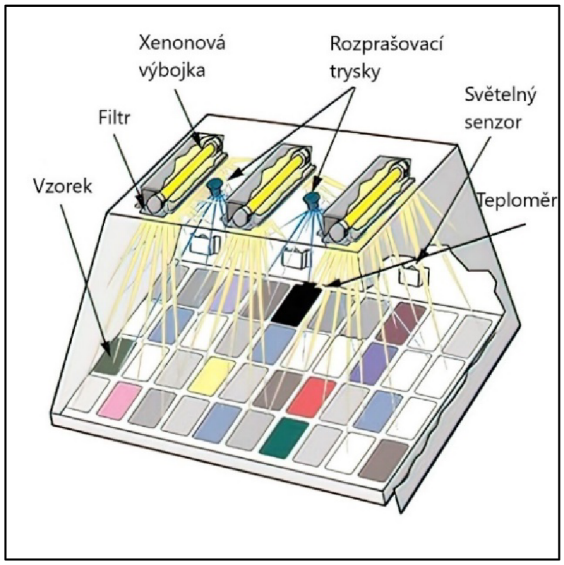
5.4.1 Degradace v klimatické komoře

Jedná se o zařízení, ve kterém jsou vložené vzorky vystaveny působení záření, vody a tepoty po určitou dobu. Tímto způsobem lze simulovat vliv venkovního prostředí na mechanické i jiné fyzické vlastnosti testovaného materiálu.

Pro testy byla použita klimatická komora Q-SUN Xe-3 [72] od společnosti Q-LAB. Stroj umožňuje zkoušky polymerů pro venkovní i vnitřní prostředí normou ASTM D2565 a ASTM D4459. Klimatická komora je na obrázku č. 26.

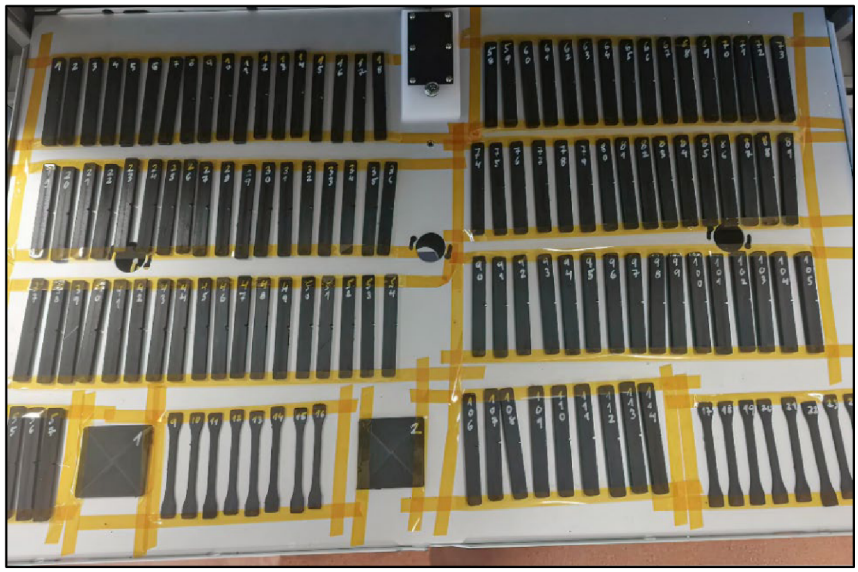
Obrázek 26 - Klimatická komora Q-SUN Xe-3

Kromě intenzity záření je možné v komoře regulovat vlhkost. Stroj nabízí možnost periodického ostřikování kapalinou pro simulaci deště, je možné nastavit průtok kapaliny, dobu ostřikování i tlak proudu. Lze také vzorky ostřikovat kyselým deštěm či mýdlovou vodou. Dále komora umožňuje regulovat teplotu uvnitř. Testovací prostor má dle výrobce rozměry 451 mm na 718 mm. Vnitřek této klimatické komory je znázorněn na obrázku č. 27.



Obrázek 27 - Vnitřek klimatické komory Q-LAB Q-SUN Xe-3 *[72]*

Cílem testování bylo simulovat osvícení vzorku sluncem a získat tak data o degradaci materiálu při vystavení slunečnímu záření a také určit vliv vlhkosti na mechanické vlastnosti materiálu. Všechny testovací vzorky byly zároveň umístěny na hliníkovou podložku klimatické komory a upevněny lepicí páskou z polyimidu, jak je ukázáno na obrázku č. 28.



Obrázek 28 - Umístění vzorků v klimatické komoře

Klimatická komora byla nastavena na cyklování po 24 hodinách, přičemž doba osvitu vzorků činila 8 hodin. Zvolená intenzita záření se zvyšovala z 80 W/m^2 na 150 W/m^2 a poté zase klesala. Průměrná hodnota intenzity záření byla 115 W/m^2. Vlhkost v klimatické komoře při zapnutém osvitu byla navolena na 35 %. Cyklus také zahrnoval ostřikování vzorků destilovanou vodou po dobu půl hodiny.

5.4.2 Vyzářená energie

Za 1 měsíc bylo v klimatické komoře vyzářeno celkem 80952 kJ/m^2, za 2 měsíce potom 150470 kJ/m^2. Druhá hodnota vyzářené energie je nižší než dvojnásobek, jelikož byla komora poslední 4 dny zastavena kvůli výměně xenonové lampy. Pro srovnání s daty naměřenými v reálném prostředí je třeba tyto údaje převést na Wh/m^2 dle poměru 1 Wh/m^2 = 3,6 kJ/m^2. Hodnota pro 1 měsíc osvitu tedy činí 22487 Wh/m^2 a pro 2 měsíce 41797 Wh/m^2. V Oslu je za jeden den vyzářeno zhruba 5167 Wh/m^2, v Praze 5647 Wh/m^2, v Aténách 6835 Wh/m^2 a v Káhiře zhruba 7922 Wh/m^2. V tabulce č. 13 se nachází srovnání energie vyzářené v klimatické komoře s lokacemi v různých podnebích. Čísla v tabulce č. 17 pro různá města vyjadřují dobu ve dnech, po kterou by vzorek musel být vystaven slunečnímu záření v dané zeměpisné šířce, aby bylo dosaženo stejné vyzářené energie jako v klimatické komoře.

Doba ozáření pro zvolenou lokaci	Doba degradace	
	1 měsíc	2 měsíce
Oslo	4,4	8,1
Praha	4,0	7,4
Atény	3,3	6,1
Káhira	2,8	5,3

Tabulka 17 - Přirovnání vyzářené energie k lokacím v různých podnebích

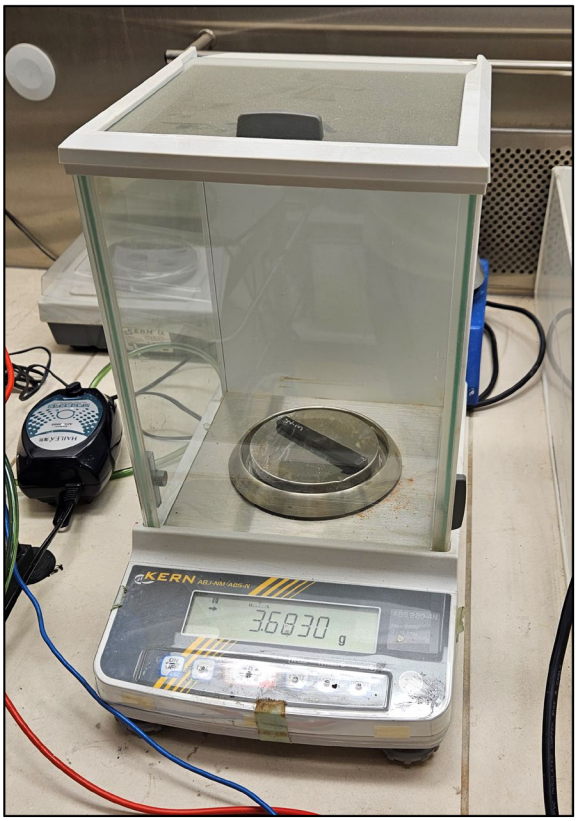
Data pro jednotlivá města byla získána pomocí služby Solcast [73] z dat pro týden 5.–11. 6. 2022 a zpracována v programu Microsoft Excel. Hodnota vyzářené energie za den je hodnotou zprůměrovanou za 7 dní.

U polymerů, včetně nylonu, běžně dochází vlivem UV záření ke změně barvy ozářeného objektu vlivem krystalizace materiálu na povrchu, jak popisuje i studie [74] uskutečněná na Alabamské univerzitě v Briminghamu. Vzhledem k černé barvě testovaného materiálu však nejsou patrné žádné změny barvy.

Lze tvrdit, že hodnoty vyzářené energie nedosahují dostatečné míry a pro důkladnější otestování vlivu slunečnímu záření na charakteristiky materiálu. Pro další podrobnější zkoumání by bylo vhodné vystavit vzorky záření po delší dobu, použít výkonnější zdroj záření, nebo testovat vzorky venku pod přímým zářením slunce.

5.4.3 Hmotnost vzorků

Všechny testovací vzorky byly také před uskutečněním zkoušky vrubové houževnatosti zváženy. Určení hmotnosti vzorků může pomoci lépe určit vliv výrobních odchylek a degradace na mechanické vlastnosti materiálu. Vážení probíhalo na laboratorní analytické váze KERN ABS 220-4N s rozsahem 0–220 g a rozlišením 0,1 mg. Ta se nachází na obrázku č. 29.



Obrázek 29 – Použitá laboratorní váha KERN ABS 220-4N

Vážených testovacích vzorků pro zkoušku vrubové houževnatosti bylo celkem 114. Jedná se o vzorky, které byly určeny pro test v klimatické komoře. Naměřené hmotnosti jednotlivých vzorků jsou v tabulce č. 18.

1 měsíc degradace			2 měsíce degradace		
Vzorek	**Před degradací**	**Po degradaci**	**Vzorek**	**Před degradací**	**Po degradaci**
1	3,6985	4,1209	58	3,7120	3,6934
2	3,7016	3,9030	59	3,7064	3,7033
3	3,6413	4,1816	60	3,7243	3,7085
4	3,6849	4,0165	61	3,7816	3,7781
5	3,7773	3,8538	62	3,7302	3,7198
6	3,6835	4,0320	63	3,7277	3,7238
7	3,6785	3,9881	64	3,7021	3,7040
8	3,7238	4,0539	65	3,7272	3,7259
9	3,7274	4,0100	66	3,7338	3,7100
10	3,6921	4,0496	67	3,6448	3,6105
11	3,6185	3,8864	68	3,2425	3,1805
12	3,6882	3,9778	69	3,7228	3,7052
13	3,7203	4,1056	70	3,6441	3,5311
14	3,7014	3,9478	71	3,6705	3,5545
15	3,5902	4,1216	72	3,4272	3,2710
16	3,7035	4,0064	73	3,7349	3,6838
17	3,7914	3,8486	74	3,7091	3,7279

18	3,6882	3,9938	75	3,6642	3,6838
19	3,6859	4,1527	76	3,7212	3,7349
20	3,7019	3,9998	77	3,6550	3,3736
21	3,7034	4,0621	78	3,7255	3,7429
22	3,6964	3,9743	79	3,6939	3,7067
23	3,6901	4,0471	80	3,6278	3,6409
24	3,7296	4,1072	81	3,6961	3,7059
25	3,7260	4,0953	82	3,7116	3,7164
26	3,6569	4,0626	83	3,6962	3,6947
27	3,6816	4,0954	84	3,6937	3,6568
28	3,7055	3,9452	85	3,6707	3,6459
29	3,7024	3,8688	86	3,6778	3,6510
30	3,6797	3,9531	87	3,1889	3,1465
31	3,7217	3,9753	88	3,7103	3,6620
32	3,6975	4,0562	89	3,7156	3,6767
33	3,6185	4,1495	90	3,7013	3,6946
34	3,6931	4,0432	91	3,6003	3,6002
35	3,7184	3,9902	92	3,6958	3,6965
36	3,6552	4,0359	93	3,6905	3,6934
37	3,7452	4,0144	94	3,6981	3,6972
38	3,7047	4,1709	95	3,6891	3,6892
39	3,6945	3,9782	96	3,7169	3,7212
40	3,6798	4,0420	97	3,7177	3,7210
41	3,6659	4,1580	98	3,6360	3,6230
42	3,7888	3,8512	99	3,6922	3,6712
43	3,7269	4,0105	100	3,6795	3,6606
44	3,6941	4,0516	101	3,7007	3,6715
45	3,7327	4,1646	102	3,6935	3,6654
46	3,6522	4,0762	103	3,6785	3,6449
47	3,6624	3,9597	104	3,6934	3,6724
48	3,7104	4,0250	105	3,7148	3,6950
49	3,7180	3,9748	106	3,6515	3,6228
50	3,6874	4,0591	107	3,7031	3,6889
51	3,7130	3,9848	108	3,7150	3,7078
52	3,7102	4,1191	109	3,6875	3,6837
53	3,7155	4,0709	110	3,7162	3,7098
54	3,7356	4,0680	111	3,7005	3,6831
55	3,6942	3,9091	112	3,7020	3,6819
56	3,6746	4,1376	113	3,7044	3,6885
57	3,7129	3,7531	114	3,7014	3,6935

Tabulka 18 - Výsledky měření hmotnosti

Hmotnosti vzorků byly zobrazeny ve 2 skupinách, první sloupce obsahují vzorky s dobou degradace 1 měsíc a druhé zase vzorky, které v klimatické komoře strávily 2 měsíce. Jelikož se jedná o mnoho vzorků a velké množství dat, byla do tabulky č. 19 vynesena průměrná hmotnost vzorků před a po degradaci.

Stádium degradace	Vzorky	Váha [g]	D (X)	σ
Bez degradace	1–57	3,6981	0,0013	0,0363
1 měsíc degradace		4,0226	0,0084	0,0916
Bez degradace	58–114	3,6749	0,0100	0,1000
2 měsíce degradace		3,6517	0,0152	0,1232

Tabulka 19 - Průměrná váha vzorků pro KCV

Hmotnost vzorku po 1 měsíci degradace byla vytvořena průměrováním hmotností první poloviny, tedy 57 vzorků. Hmotnost vzorku po 2 měsících je průměrem druhé poloviny ze 114 vzorků. Stejně tak hmotnosti vzorků před degradací. Zároveň byl určen rozptyl hodnot D (X) a směrodatná odchylka σ.

Z tabulky lze vyčíst, že průměrná hmotnost vzorku po prvním měsíci v klimatické komoře vzrostla z 3,6981 g na 4,0226 g. Jedná se o nárůst hmotnosti o zhruba 8,8 %. Po 2 měsících degradace se překvapivě hmotnost vzorků snížila na průměrnou váhu 3,6517 g. Došlo tedy k poklesu hmotnosti 9,2 % oproti vzorkům, které v komoře strávili 1 měsíc a k poklesu o 1 % v porovnání s čerstvými vzorky. Tato změna hmotnosti je zapříčiněna několik faktory. Jak bylo zmíněno v kapitole „5.4.2. Vyzářená energie“, klimatická komora několik dní před testováním houževnatosti neběžela a vzorky tak nebyly ostřikovány destilovanou vodou. Došlo tedy ke snížení vlhkosti a k vysušení vzorků. Zároveň byla malá část materiálu na povrchu vzorků odtržena při sundávání polyimidové pásky, neboť při degradaci materiálů pevně přilnula na povrch testovacích vzorků. Další vliv měla jistě i samotná degradace a odplavení malé části materiálu při ostřiku.

Studie [75] provedená na univerzitě v Tchien-ťinu v Číně zkoumala hygroskopii litého nylonu s obsahem 10 a 15 % uhlíkových vláken při různém pH média a vliv na pevnost v ohybu a tvrdost tohoto materiálu. Materiál byl schopen absorbovat 5,6–6 % vlhkosti, respektive jeho hmotnost se zvýšila o 5,6–6 %. To odpovídá předchozímu zjištění. Testované vzorky byly vyrobeny metodou 3D tisku a tudíž jsou mnohem členitější, pórovitější a jejich schopnost absorbovat vlhkost je vyšší, než je tomu u litých vzorků použitých ve studii. Studie zároveň tvrdí, že absorpce roste s klesající kyselostí média. Rychlost absorpce se zvyšuje s rostoucí teplotou. Pevnost v ohybu materiálu se snížila o 45 % a tvrdost klesla o 44 %.

Již zmíněná studie [74] z Alabamy udává, že se hmotnost matriálu zvýšila o 4 %. Jedná se ovšem o lisovaný a tudíž i méně pórovitý materiál s polyamidem 6.

5.4.4 Měření při různých teplotách

Studie [76] uskutečněná na Turínské polytechnické univerzitě v Itálii zkoumá polymer, konkrétně hybridní materiál mezi PA6 a PA12, velmi podobný testovanému Nylonu CF15 Carbon. Jedná se o PA612 s podílem uhlíkových trubiček 20 %. Studie zkoumá tvrdost, pevnost v tahu a také vrubovou houževnatost materiálu. Také popisuje

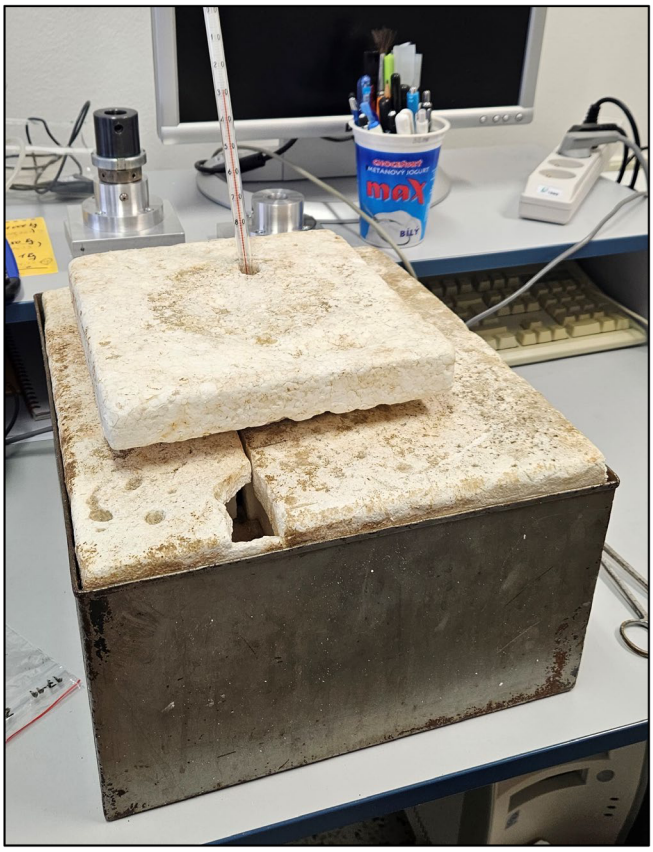
vliv hustoty výplně na hodnotu vrubové houževnatosti. Hodnota vrubové houževnatosti testovaného materiálu při výplni 100 % se pohybovala okolo hodnoty 2,5 kJ/m^2. Toto měření naváže na tuto studii a její výsledky poslouží pro porovnání.

5.4.5 Temperace testovacích vzorků

Testovací vzorky byly ohřívány v laboratorní horkovzdušné peci Climatic Test Systems ltd. 91250 na kovové podložce. Regulace teploty probíhá po navolení automaticky. Vzorky musí být dle normy umístěné ve vzdálenosti minimálně 50 mm od stěn a alespoň 10 mm od sebe. Použitá laboratorní pec se nachází na obrázku č. 30.

Obrázek 30 - Laboratorní pec Climatic Test Systems 91250

Chlazení vzorků probíhalo pomocí izolovaného kovového kontejneru, do kterého byl postupně přiléván dusík ředěný technickým lihem. Teplota média byla monitorována skleněným tyčinkovým lihovým teploměrem o rozsahu -80–30 °C. Vzorky byly v kapalině uloženy na plastové mřížce a musely být pokaždé umístěny alespoň 25 mm od hladiny a od dna a také minimálně 10 mm od stěny nádoby. Doba temperace vzorků odpovídala nebo přesahovala dobu stanovenou použitou normou. Kontejner s teploměrem je na obrázku č. 31.



Obrázek 31 - Kontejner s teploměrem pro chlazení vzorků

5.4.6 Výsledky měření vrubové houževnatosti při různých teplotách

Bylo provedeno jedno měření pro materiál PLA a 3 měření pro vzorky Nylonu s uhlíkem v různém stádiu po působení vnějších vlivů. Data pro nylon byla měřena na vzorcích pár dnů po tisku a na vzorcích, které strávily jeden měsíc a 2 měsíce v klimatické komoře (viz. kapitola „5.4.1 Degradace v klimatické komoře“). Materiál PLA byl měřen pouze pár dní po tisku a slouží zde jako reference pro srovnání. Pro každou teplotu byla houževnatost měřena na 3 vzorcích, aby se omezil vliv chyby měření, výsledná hodnota vrubové houževnatosti je tedy dána průměrem 3 naměřených vzorků. Rozsah teplot je dán schopností měřicího přístroje a materiálu shora a nejnižší možnou teplotou měřitelnou analogovým teploměrem zdola.

Všechny měřené vzorky byly očíslovány a výsledná hodnota vrubové houževnatosti pro danou teplotu je průměrem třech měřených vzorků. Naměřená a vypočtená data pro materiál PLA byla vynesena do tabulky č. 20.

PLA							
T [°C]	Vzorky:	1	2	3	Průměr	D (X)	σ
70	13,14,15	2,052	2,686	2,815	2,518	0,1668	0,4084
60	10,11,12	0,136	0,148	0,112	0,132	0,0003	0,0183
50	7,8,9	0,100	0,088	0,112	0,100	0,0001	0,0120
40	4,5,6	0,100	0,100	0,100	0,100	0,0000	0,0000
30	1,2,3	0,124	0,124	0,112	0,120	0,0000	0,0069
0	1,2,3	0,136	0,136	0,136	0,136	0,0000	0,0000
-10	4,5,6	0,088	0,136	0,100	0,108	0,0006	0,0250
-20	7,8,9	0,136	0,088	0,136	0,120	0,0008	0,0277
-30	10,11,12	0,148	0,124	0,136	0,136	0,0001	0,0120
-40	13,14,15	0,124	0,124	0,136	0,128	0,0000	0,0069
-50	16,17,18	0,136	0,136	0,136	0,136	0,0000	0,0000
-60	22,23,14	0,124	0,136	0,112	0,124	0,0001	0,0120
-70	19,20,21	0,124	0,112	0,112	0,116	0,0000	0,0069
-80	25,26,27	0,124	0,124	0,112	0,120	0,0000	0,0069

Tabulka 20 - Naměřená KCV a vypočtená data (PLA)

Materiál PLA bylo možné změřit od -80 do 70 °C. Pro teploty nad 70 °C nebyla získána data, protože se polymer ohýbal. Červená barva značí nepřeražené vzorky. Hodnota pro pokojovou teplotu již byla zjištěna, proto nebyla měřena. Pro výsledky měření byla spočítána směrodatná odchylka σ a rozptyl hodnot D (X). Naměřená vrubová houževnatost pro materiál Nylon CF15 Carbon bez degradace se nachází v tabulce č. 21.

Nylon CF15 Carbon							
T [°C]	Vzorky	1	2	3	Průměr	D (X)	σ
90	19,20,21	4,111	2,743	1,941	2,932	1,2039	1,0972
80	16,17,18	3,923	3,504	3,058	3,495	0,1871	0,4326
70	13,14,15	1,194	1,009	0,852	1,018	0,0293	0,1712
60	10,11,12	0,736	0,570	0,621	0,642	0,0072	0,0850
50	7,8,9	0,482	0,494	0,444	0,473	0,0007	0,0261
40	4,5,6	0,394	0,407	0,382	0,394	0,0002	0,0125
30	1,2,3	0,357	0,382	0,357	0,365	0,0002	0,0144
0	1,2,3	0,307	0,307	0,295	0,303	0,0000	0,0069
-10	4,5,6	0,295	0,295	0,283	0,291	0,0000	0,0069
-20	7,8,9	0,283	0,271	0,283	0,279	0,0000	0,0069
-30	10,11,12	0,234	0,258	0,234	0,242	0,0002	0,0139
-40	13,14,15	0,246	0,234	0,246	0,242	0,0000	0,0069
-50	16,17,18	0,234	0,234	0,221	0,230	0,0001	0,0075
-60	22,23,14	0,221	0,221	0,221	0,221	0,0000	0,0000
-70	19,20,21	0,283	0,197	0,197	0,197	0,0000	0,0000
-80	25,26,27	0,271	0,183	0,185	0,213	0,0025	0,0502

Tabulka 21 - Naměřená KCV a vypočtená data (PA12+CF15)

Nylon s uhlíkovými vlákny bez vystavení vnějším vlivům byl měřen od -80 do 90 °C. Nad 90 °C nebylo možné získat relevantní data ze stejného důvodu, jako tomu je u materiálu PLA. Červená barva opět značí vzorky, které nebylo možné přerazit. Testovací vzorek č. 19 pro záporné teploty, který byl vychlazen na -70 °C, nebyl do průměru započítán, neboť před měřením upadl na zem a jeho teplota tak byla při přeražení vyšší. V porovnání s PLA je materiál houževnatější. Data materiálu Nylonu CF15 Carbon, který strávil jeden měsíc v klimatické komoře, jsou vynesena do tabulky č. 22.

Nylon CF15 Carbon (1 měsíc degradace)							
T [°C]	Vzorky:	1	2	3	Průměr	D (X)	σ
110	55,56,57	0,930	0,891	0,826	0,882	0,0028	0,0525
100	52,53,54	0,878	1,074	0,982	0,978	0,0096	0,0981
90	49,50,51	0,982	1,048	1,009	1,013	0,0011	0,0332
80	46,47,48	1,247	0,982	1,048	1,092	0,0190	0,1380
70	43,44,45	1,220	1,048	1,167	1,145	0,0078	0,0881
60	37,38,39	0,969	0,969	0,917	0,952	0,0009	0,0300
50	34,35,36	0,891	0,736	0,697	0,775	0,0105	0,1026
40	31,32,33	0,634	0,904	1,127	0,888	0,0609	0,2469
30	28,29,30	0,570	0,419	0,570	0,520	0,0076	0,0872
0	1,2,3	0,295	0,258	0,320	0,291	0,0010	0,0312
-10	4,5,6	0,258	0,234	0,203	0,232	0,0008	0,0276
-20	7,8,9	0,221	0,234	0,258	0,238	0,0004	0,0188
-30	10,11,12	0,221	0,197	0,221	0,213	0,0002	0,0139
-40	13,14,15	0,221	0,197	0,283	0,234	0,0020	0,0444
-50	16,17,18	0,283	0,221	0,271	0,258	0,0011	0,0329
-60	19,20,21	0,271	0,221	0,283	0,258	0,0011	0,0329
-70	22,23,24	0,197	0,283	0,197	0,226	0,0025	0,0497
-80	25,26,27	0,197	0,197	0,197	0,197	0,0000	0,0000

Tabulka 22 - Naměřená KCV *a vypočtená data (PA12+CF15, degradace 1 měsíc)*

Měření vzorků, které byly na měsíc umístěny do klimatické komory, probíhalo v celém rozsahu od -80 do 110 °C. Hodnota -80 °C je minimální možná teplota měřitelná použitým teploměrem a hodnota 110 °C je maximální teplota laboratorní pece. Přeraženy byly vzorky 1–57 a pro výsledky byl opět určen rozptyl hodnot a směrodatná odchylka. Z tabulky je opět patrná vyšší houževnatost nylonu v porovnání PLA. Tabulka č. 23 obsahuje data pro nylon s dobou degradace 2 měsíce.

Nylon CF15 Carbon (2 měsíce degradace)							
T [°C]	Vzorky:	1	2	3	Průměr	D (X)	σ
110	85,86,87	0,432	0,382	0,234	0,349	0,0106	0,1030
100	82,83,84	0,482	0,407	0,345	0,411	0,0047	0,0686
90	79,80,81	0,532	0,532	0,469	0,511	0,0013	0,0364
80	76,77,78	0,482	0,494	0,494	0,490	0,0000	0,0069
70	73,74,75	0,234	0,419	0,419	0,357	0,0114	0,1068
60	70,71,72	0,185	0,173	0,234	0,197	0,0010	0,0323
50	67,68,69	0,221	0,173	0,234	0,209	0,0010	0,0321
40	64,65,66	0,234	0,234	0,234	0,234	0,0000	0,0000
30	61,62,63	0,258	0,221	0,221	0,233	0,0005	0,0214
0	88,89,90	0,185	0,173	0,197	0,185	0,0001	0,0120
-10	91,92,93	0,197	0,283	0,185	0,222	0,0029	0,0535
-20	94,95,96	0,197	0,185	0,185	0,189	0,0000	0,0069
-30	97,98,99	0,185	0,161	0,197	0,181	0,0003	0,0183
-40	100,101,102	0,185	0,197	0,161	0,181	0,0003	0,0183
-50	103,104,105	0,173	0,173	0,185	0,177	0,0000	0,0069
-60	106,107,108	0,161	0,173	0,173	0,169	0,0000	0,0069
-70	109,110,111	0,173	0,173	0,197	0,181	0,0002	0,0139
-80	112,113,114	0,161	0,161	0,161	0,161	0,0000	0,0000

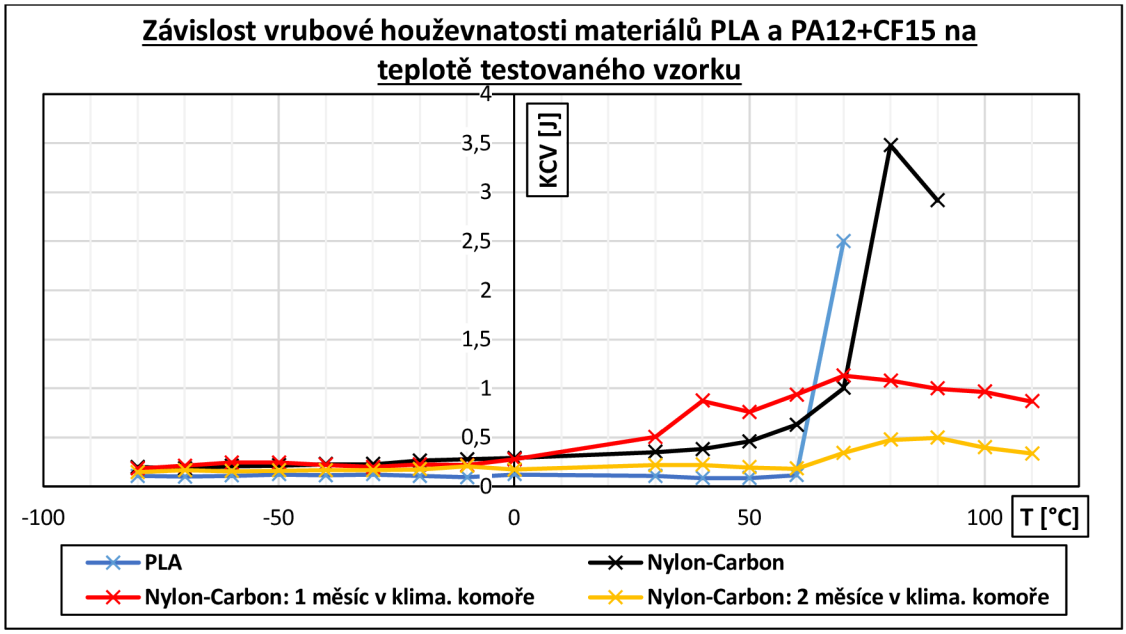
Tabulka 23 - Naměřená KCV a vypočtená data (PA12+CF15, degradace 2 měsíce)

Stejně jako v případě vzorků s dobou degradace 1 měsíc, byly vzorky degradované po dobu 2 měsíců měřeny v rozmezí teplot od -80 do 110 °C. K měření posloužily testovací vzorky 58–114. Houževnatost Nylonu CF15 Carbon při tomto měření znatelně klesla. Ze všech naměřených dat byla odečtena ztrátová energie kladiva a pro lepší přehlednost byly průměrné hodnoty pro jednotlivé teploty a stádia degradace měřených materiálů vyneseny do tabulky č. 24.

Teplota [°C]	KCV [J]			
	PLA	PA12+CF15	PA12+CF15 (1 měsíc)	PA12+CF15 (2 měsíce)
110	-	-	0,866	0,333
100	-	-	0,962	0,395
90	-	2,916	0,997	0,495
80	-	3,479	1,076	0,474
70	2,502	1,002	1,129	0,341
60	0,116	0,626	0,936	0,181
50	0,084	0,457	0,759	0,193
40	0,084	0,378	0,872	0,218
30	0,104	0,349	0,504	0,217
0	0,120	0,287	0,275	0,169
-10	0,092	0,275	0,216	0,206
-20	0,104	0,263	0,222	0,173
-30	0,120	0,226	0,197	0,165
-40	0,112	0,226	0,218	0,165
-50	0,120	0,214	0,242	0,161
-60	0,108	0,205	0,242	0,153
-70	0,100	0,181	0,210	0,165
-80	0,104	0,197	0,181	0,145

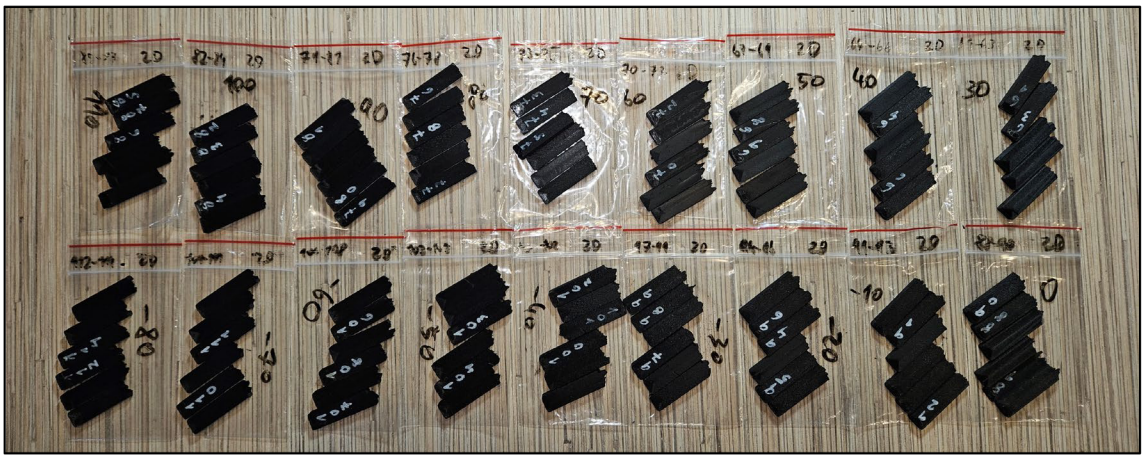
Tabulka 24 - Průměrné hodnoty vrubové houževnatosti

Z tabulky č. 24 byl pro názornost sestrojen graf. č. 1.



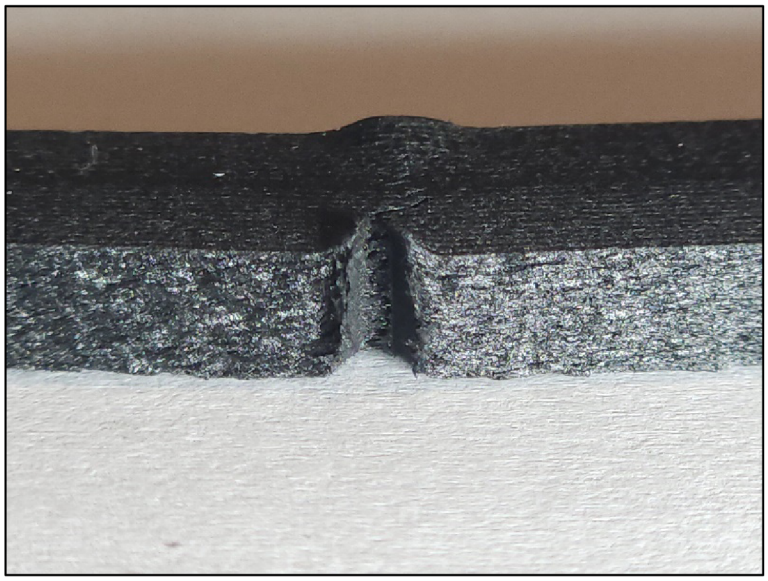
Graf 1 - Závislost vrubové houževnatosti materiálů PLA a PA12+CF15 na teplotě testovaného vzorku

Všechny testovací vzorky byly po provedení zkoušky vrubové houževnatosti uzavřeny do těsnících uzavíratelných sáčků, ve kterých se nacházely i po vyndání z klimatické komory. Přeražené vzorky po degradaci po dobu 2 měsíců se nachází na obrázku č. 32.



Obrázek 32 - Vzorky s dobou degradace 2 měsíce

Jak již bylo zmíněno, při teplotě 70 °C se nepodařilo přerazit vzorky PLA. Nylon CF15 Carbon bez degradace se nepodařilo přerazit při teplotách 80 a 90 °C a došlo pouze k deformaci povrchu. Vzorek nylonu č. 16, testovaný při 80 °C, se nachází na obrázku č. 33.

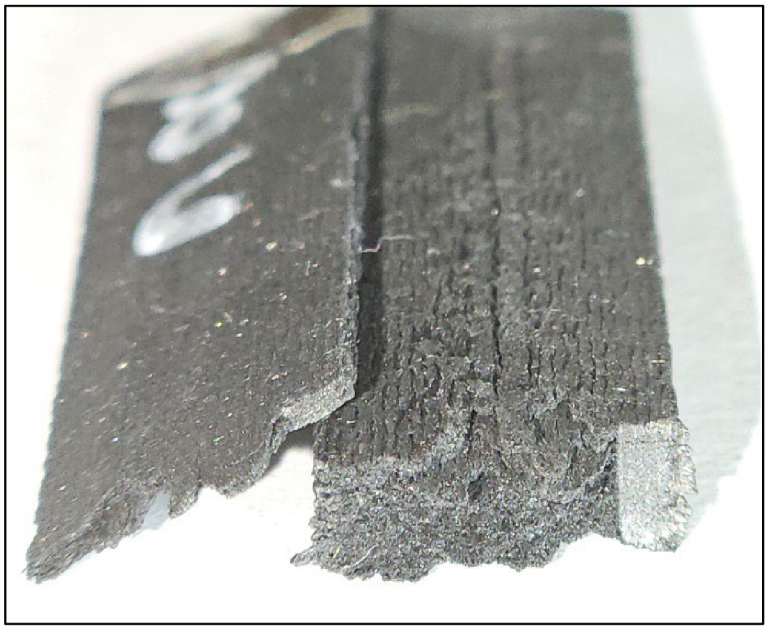


Obrázek 33 - Vzorek nylonu č. 16 nepřeražený při teplotě 80 °C

Z naměřených dat a znázorněných průběhů je patrné, že hodnoty vrubové houževnatosti nylonu s uhlíkem převyšují hodnoty polyesteru PLA takřka v celém

rozsahu, a to až několikanásobně. Z naměřených dat je také patrné, že se u námi testovaného materiálu PLA nachází teplota jeho skelného přechodu někde mezi 60 a 70 °C. Ta je u čerstvého nylonu vyšší a pohybuje se někde mezi 70 a 80 °C. Teplota skelného přechodu vyjadřuje teplotu, při které plast ztrácí tvrdou charakteristiku a přechází do měkčí a ohebné formy.

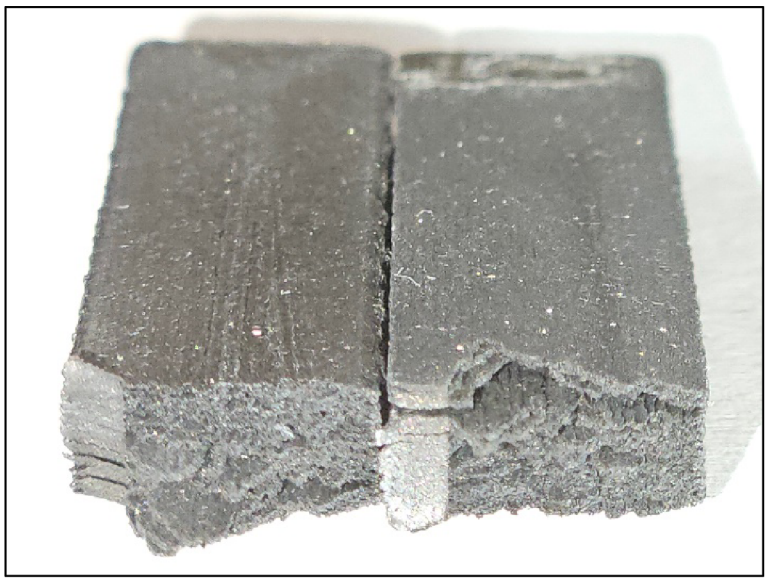
Vystavení vzorků podmínkám klimatické komory na 1 měsíc posunulo teplotu skelného přechodu až někam nad hodnotu 110 °C a nepodařilo se tak přesně zjistit, kde se nachází. To samé platí i pro vzorky, které byly vystaveny působení klimatické komory 2 měsíce. Lze tedy usoudit, že při vystavení venkovním podmínkám vykazuje tento materiál konzistentnější vlastnosti houževnatosti ve větším rozsahu teplot, než je tomu u materiálu nově zpracovaného. Testovací vzorek či vyrobený díl zkrátka začne měknout až při vyšší teplotě a déle si drží pevnou charakteristiku materiálu. Vzorky z klimatické komory, které degradovaly 1 měsíc, také vykazují vyšší houževnatost v intervalu 30–70 °C, mírně vyšší houževnatost v intervalu od -70 do -50 °C a lehce nižší houževnatost od -40 do 0 °C v porovnání se vzorky čerstvými. Jinak tomu je u vzorků, které se v komoře nacházely 2 měsíce. Zde je patrný pokles vrubové houževnatosti v celém rozsahu a hodnoty se začínají blížit materiálu PLA. Tyto vzorky navíc během měření vykazovaly delaminaci. Při teplotách 0, 60, 70 a 100 °C se při každé teplotě oddělilo od jednoho vzorku několik vrchních vrstev. Při teplotě 110 °C došlo k delaminaci hned u 2 vzorků ze 3. U testovacích vzorků s dobou degradace 2 měsíce tedy roste delaminace se zvyšující se teplotou. Zvětšený delaminovaný vzorek, na kterém je patrná špatná soudržnost vrstev, se nachází na obrázku č. 34. Všechny delaminované vzorky jsou na obrázku č. 35.



Obrázek 34 - Zvětšený vzorek č. 86

Obrázek 35 - Všechny delaminované vzorky

Menší soudržnost mezi jednotlivými vrstvami je patrná i vzorků, u kterých přímo k delaminaci nedošlo, jak je znázorněno na obrázku č. 36.



Obrázek 36 – Přeražený, skoro delaminovaný vzorek po degradaci (2 měsíce)

Studie [77] realizovaná na Moskevské státní technické univerzitě, která zkoumá vlastnosti tištěných polymerů PA6 a PA12, popisuje vytváření delaminačních mikrotrhlin při namáhání materiálu. Mechanická zátěž by tedy negativně přispěla k další delaminaci.

Již zmíněná studie provedená na Polytechnické univerzitě v Turíně uvádí hodnotu vrubové houževnatosti testovaného materiálu PA612 s 20% výztuží z uhlíkových vláken při výplni 100 % okolo 2,5 kJ/m^2. Hodnota vrubové houževnatosti materiálu Nylon CF15

Carbon po přepočtení na plochu vzorku při teplotě 30 °C činí 10,91 kJ/m2 u vzorku bez degradace, 15,75 kJ/m2 u vzorku s dobou degradace 1 měsíc a 6,78 kJ/m2 pro testovací vzorek s degradací po dobu 2 měsíců. Zkoumaná varianta PA12 s 15% podílem uhlíkových trubiček tak vykazuje násobně vyšší hodnoty vrubové houževnatosti než uhlíkem vyztužený PA612, který byl ve studii testován. Zvolený materiál se tedy zdá být vhodný pro výrobu náhradních dílů vojenské techniky. Studie také popisuje minimální vliv hustoty vnitřní výplně na vrubovou houževnatost vzorku. Pro další zkoumání by tedy bylo vhodné otestovat houževnatost při různých teplotách i pro vzorky s různou hustotou a různými typy vnitřní výplně.

5.5 Měření na elektronovém mikroskopu

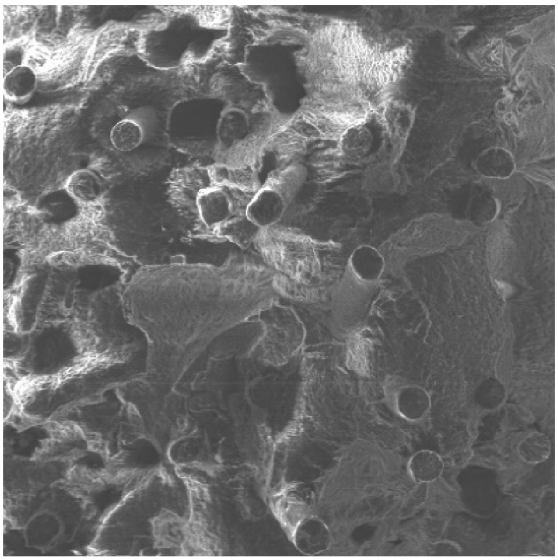
Prostřednictvím ústavu Fyziky na fakultě elektrotechniky a komunikačních technologií byla provedena série měření na elektronovém mikroskopu za účelem zjištění rozdílů mezi čerstvými vzorky a vzorky s degradací z klimatické komory. Měření bylo provedeno panem doktorem Nikolou Papežem z Ústavu fyziky na rastrovacím elektronovém mikroskopu Tescan Lyra3. Jelikož se jedná o polymer, který se chová jako izolant a docházelo ke svodu náboje ze vzorku, bylo potřeba všechny testovací vzorky před měřením pouhličit. K tomu posloužilo vakuové nanášecí zařízení Leica EM ACE600, které se nachází na obrázku č. 37. Tloušťka nanesené vrstvy činí 15 nm.

Obrázek 37 - Leica EM ACE600

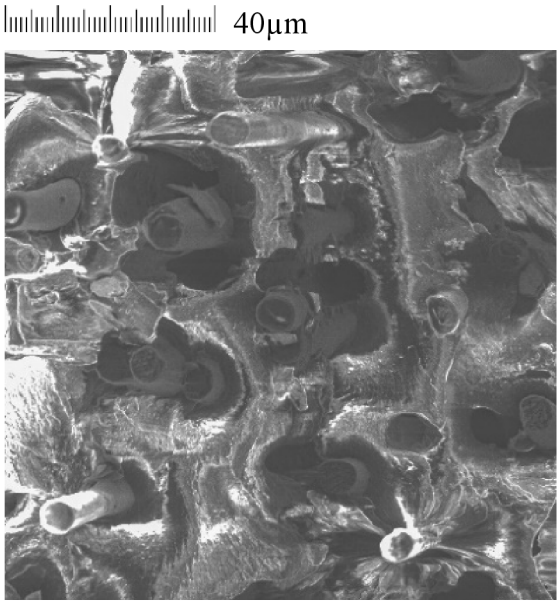
Prozkoumány byly vzorky krajních teplot -80 a 70 °C, u kterých došlo k přelomení, a také vzorky pro teploty 0 a 30 °. U vzorků, které byly v klimatické komoře 1 měsíc,

došlo při 40 °C k nečekanému vzrůstu vrubové houževnatosti a měření proběhlo až do hodnoty 110 °C. Vzorky pro tyto teploty tedy byly zkoumány také. Urychlovací napětí mikroskopu činilo 5 kV a pro každý vzorek byly použity 2 velikosti zorného pole: 104 a 692 µm. Na následujících stranách se nachází získané snímky. Pozice značí místo, kde v mikroskopu byl vzorek umístěn.

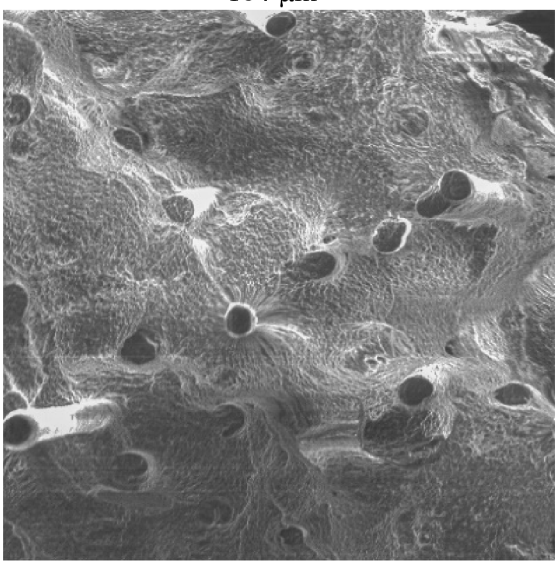
Zorné pole: 104 μm



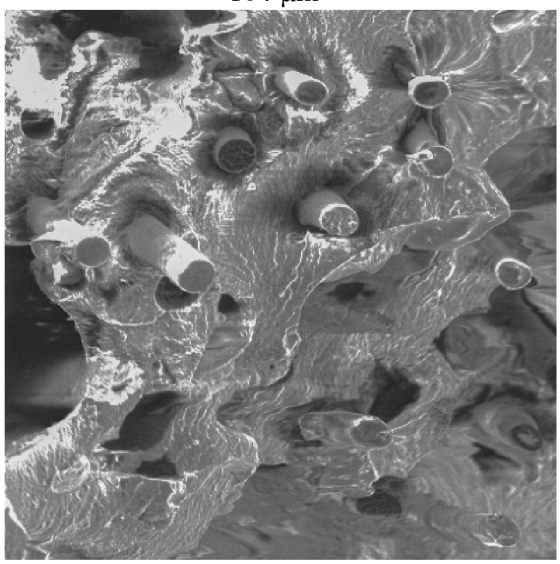
Obrázek 38 - Pozice K, vzorek 27, bez degradace, přeražen při -80 °C, zorné pole 104 μm



Obrázek 39 - Pozice D, vzorek 26D, 1 měsíc degradace, přeražen při -80 °C, zorné pole 104 μm



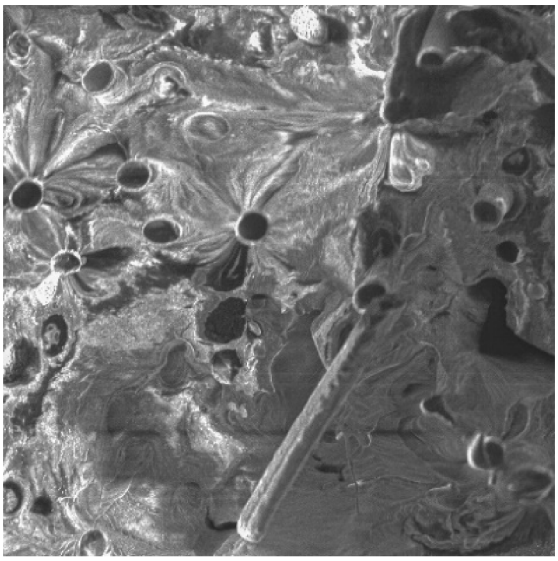
Obrázek 40 - Pozice B, vzorek 1, bez degradace, přeražen při 0 °C, zorné pole 104 μm



Obrázek 41 - Pozice F, vzorek 1D, 1 měsíc degradace, přeražen při 0 °C, zorné pole 104 μm

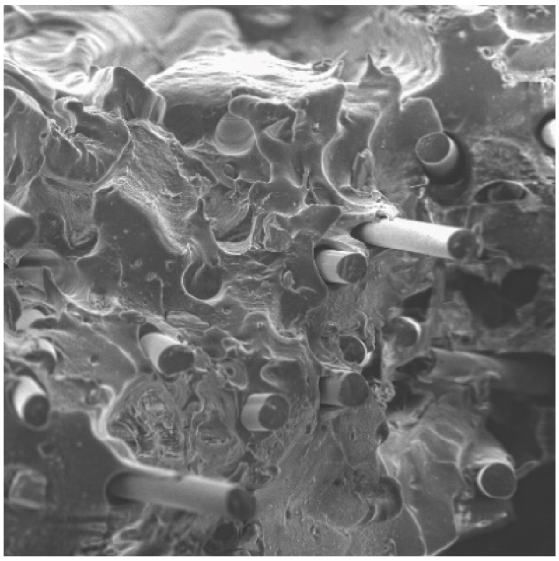
Ze snímků je na první pohled patrná výztuha ve formě uhlíkových tyčinek. Průměr trubiček činí zhruba 6 μm. Vzorky 27, 26D, 1 a 1D, které byly otestovány pod bodem mrazu, mají, ve srovnání s těmi testovanými při kladných teplotách, hrubý povrch. S nejvyšší pravděpodobností došlo k narušení struktury povrchu při rozpínání vstřebané vlhkosti při poklesu teploty pod bod mrazu po změně skupenství, jelikož se jedná o hygroskopický materiál, jak již bylo popsáno v jedné z předchozích kapitol. Zkušební vzorky po degradaci měřené v záporných teplotách obsahují na povrchu nylonu výraznější mikrotrhliny, než je tomu v případě vzorků bez degradace. Toto narušení materiálu odpovídá snížené vrubové houževnatosti, trhliny činí vzorky křehčí.

Zorné pole: 104 μm

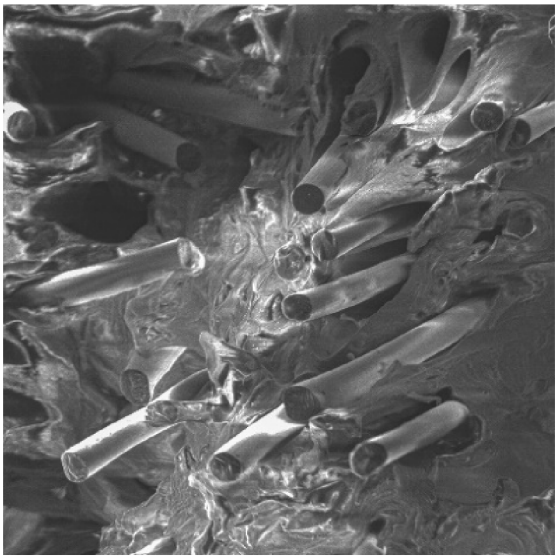


Obrázek 42 - Pozice H, vzorek 3, bez degradace, přeražen při 30 °C, zorné pole 104 μm

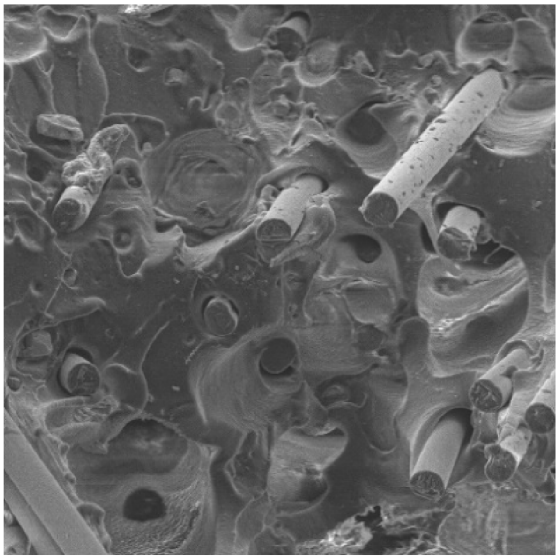
40μm



Obrázek 43 - Pozice G, vzorek 30D, 1 měsíc degradace, přeražen při 30 °C, zorné pole 104 μm



Obrázek 44 - Pozice C, vzorek 17, bez degradace, přeražen při 70 °C, zorné pole 104 μm

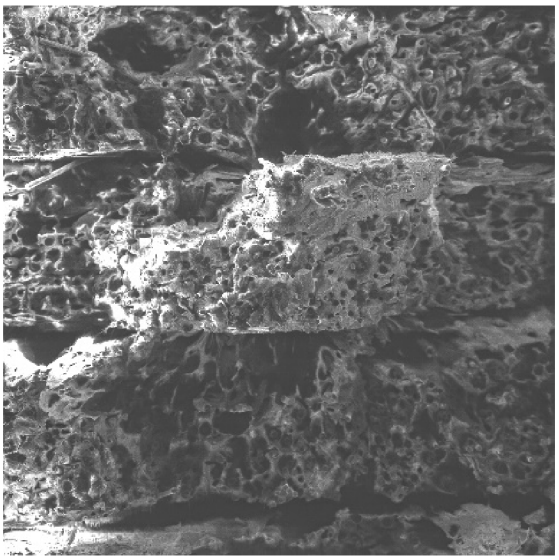


Obrázek 45 - Pozice J, vzorek 44D, 1 měsíc degradace, přeražen při 70 °C, zorné pole 104 μm

Na obrázcích lze vidět, že i přes nanesenou vrstvu uhlíku docházelo ke svodu náboje. Nejvíce je to patrné na snímcích vzorků 26D a 3, které jsou zdeformované poblíž uhlíkových trubiček. U vzorků, které byly přeražené za kladných teplot, jsou mikrotrhliny méně výrazné a jejich povrch je hladší, vrubová houževnatost je proto vyšší. Ze snímků, které byly pořízeny při zorném poli 104 μm, je patrné, že po degradaci polyamid méně přiléhá na uhlíkové tyčinky a tvoří se mezera mezi materiály, to je opět zapříčiněno vlhkostí. Se snižující se teplotou jsou rozdíly patrnější. U vzorků testovaných při 70 °C (14 a 44D) se toto oddělení materiálů vyskytuje jak před degradací, tak po ní. Rozdíly u vzorků měřených při teplotách 30 a 70 °C jsou jinak spíše minimální, povrch materiálu

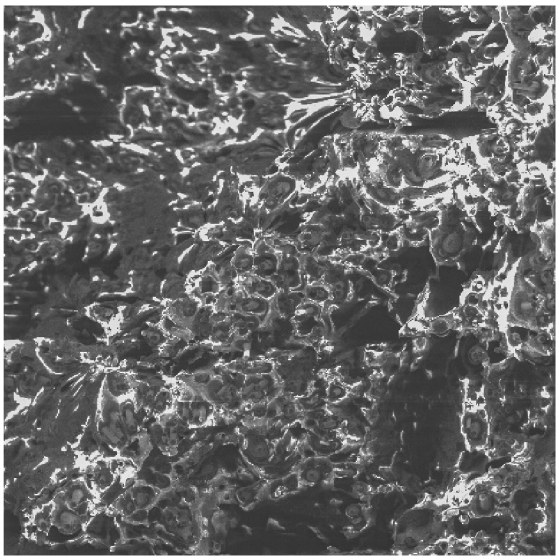
nevykazuje takové změny, jako tomu bylo při záporných teplotách. To odpovídá skutečnosti, že je houževnatost materiálu nejvyšší právě při kladných teplotách, a to jak u vzorků čerstvých, tak u těch s degradací. Dle již zmíněné studie [78] provedené na univerzitě v Alabamě roste s podílem uhlíkových vláken ve filamentu i četnost výskytu dutin mezi trubičkami a polymerem. Studie zkoumala materiál PLA, ale dá se předpokládat, že vliv na nylon bude podobný.

Zorné pole: 692 μm

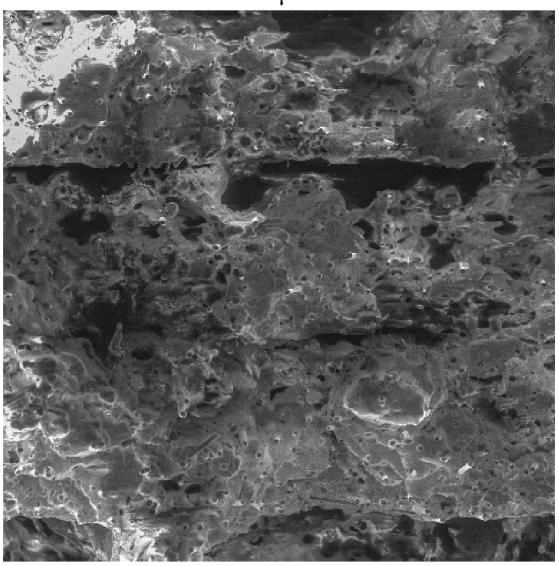


Obrázek 46 - Pozice K, vzorek 27, bez degradace, přeražen při -80 °C, zorné pole 692 μm

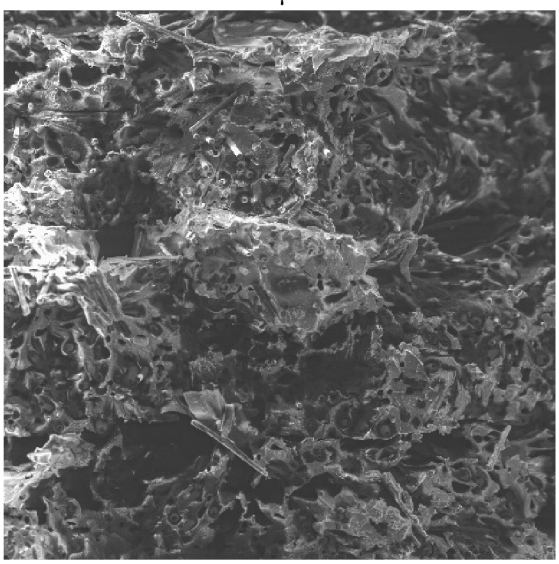
300 μm



Obrázek 47 - Pozice D, vzorek 26D, 1 měsíc degradace, přeražen při -80 °C, zorné pole 692 μm

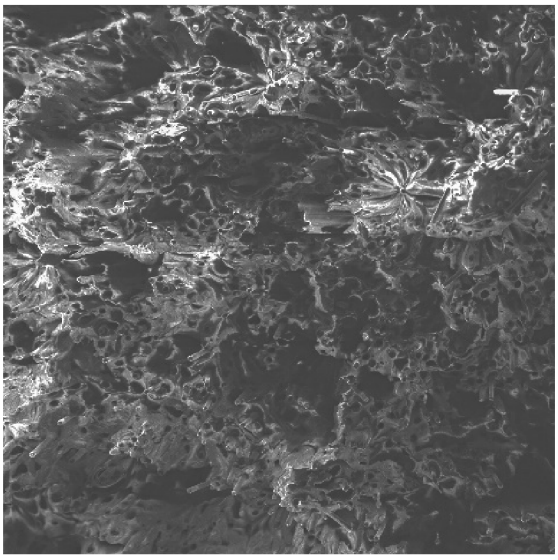


Obrázek 48 - Pozice B, vzorek 1, bez degradace, přeražen při 0 °C, zorné pole 692 μm



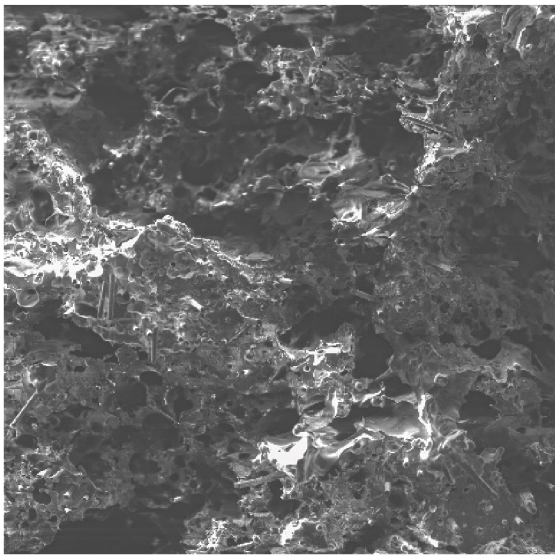
Obrázek 49 - Pozice F, vzorek 1D, 1 měsíc degradace, přeražen při 0 °C, zorné pole 692 μm

Zorné pole: 692 μm

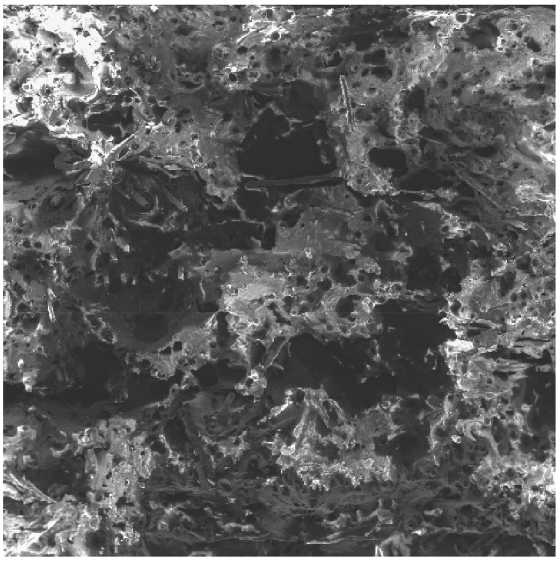


Obrázek 50 - Pozice H, vzorek 3, bez degradace, přeražen při 30 °C, zorné pole 692 μm

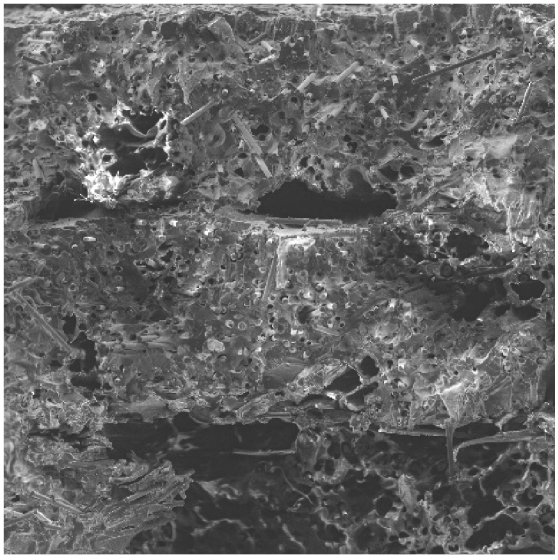
300 μm



Obrázek 51 - Pozice G, vzorek 30D, 1 měsíc degradace, přeražen při 30 °C, zorné pole 692 μm



Obrázek 52 - Pozice C, vzorek 17, bez degradace, přeražen při 70 °C, zorné pole 692 μm

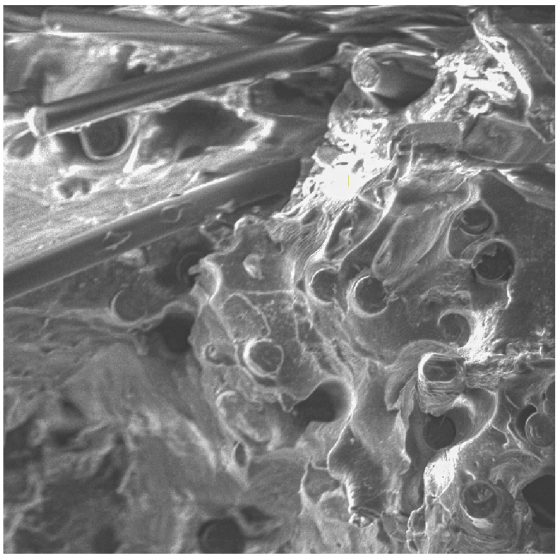


Obrázek 53 - Pozice J, vzorek 44D, 1 měsíc degradace, přeražen při 70 °C, zorné pole 692 μm

Na snímcích o zorném poli 692 μm je vidět tloušťka vrstvy tisku 0,2 mm. Při zkoumání snímků s menším zvětšením, tedy o zorném poli 692 μm, lze pozorovat výrazně ohraničené vrstvy u vzorků bez degradace. Vrstvy vzorků po pobytu v klimatické komoře jsou na první pohled méně patrné a u vzorků 26D, 1D a 30D takřka nerozeznatelné od sebe. Degradace tedy s největší pravděpodobností způsobila rozpad materiálu na rozhraní vrstev. To odpovídá i poznatku ze zkoušky vrubové houževnatosti, kdy u některých vzorků došlo k delaminaci vrstev. Slévání vrstev je ale patrné i u vzorku číslo 3, který klimatickou komorou neprošel. Může se tedy také jednat o vliv přesnosti

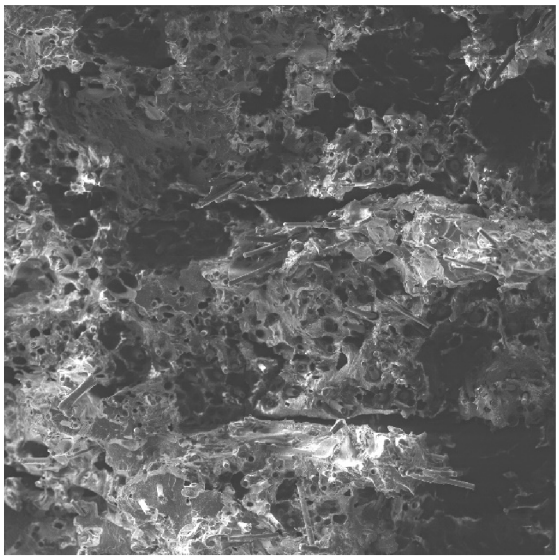
tisku a pro potvrzení této hypotézy by bylo potřeba pod mikroskopem prozkoumat více vzorků.

Zorné pole: 104 μm

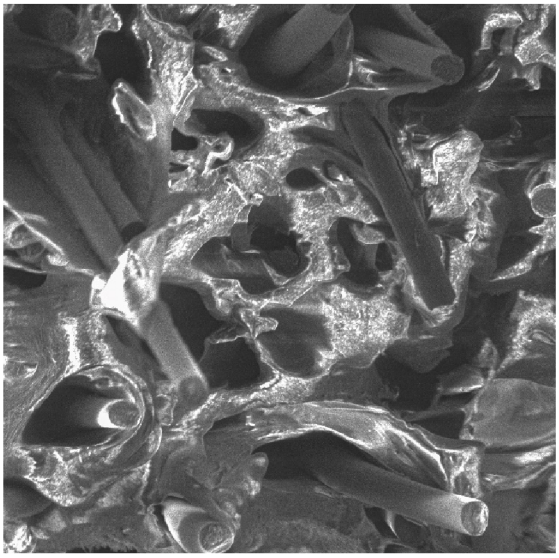


Obrázek 54 - Pozice E, vzorek 32D, 1 měsíc degradace, přeražen při 40 °C, zorné pole 104 μm

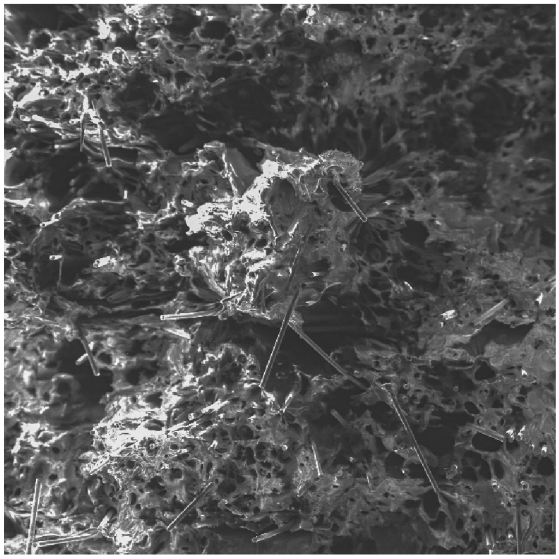
Zorné pole: 692 μm



Obrázek 55 - Pozice E, vzorek 32D, 1 měsíc degradace, přeražen při 40 °C, zorné pole 692 μm



Obrázek 56 - Pozice I, vzorek 55D, 1 měsíc degradace, přeražen při 110 °C, zorné pole 104 μm



Obrázek 57 - Pozice I, vzorek 55D, 1 měsíc degradace, přeražen při 110 °C, zorné pole 692 μm

I na vzorcích přeražených při 40 a 110 °C je patrné oddělení uhlíkových trubiček od nylonu. Na testovacím vzorku 55D otestovaném při 110 °C je toto oddělení zjevné nejvíce ze všech nasnímaných vzorků. Na obrázcích o zorném poli 692 μm jsou také patrné špatně rozeznatelné vrstvy. Na vzorku 55D uhlíkové výztuhy více vyčnívají z nylonu, než je tomu u ostatních snímků. S největší pravděpodobností je to důsledek oddělení uhlíkových tyčinek od polymeru.

6. KONSTRUKCE NÁHRADNÍCH DÍLŮ

V předchozích kapitolách byl vytipován materiál vhodný pro realizaci náhradních dílů, byl proveden výzkum hodnotící jeho mechanické vlastnosti jako pevnost v tahu a tvrdost, především byla prozkoumána vrubová houževnatost. Materiál Nylon CF15 Carbon byl také vystaven degradaci v klimatické komoře po dobu 1 a 2 měsíce. Na základě provedeného výzkumu lze potvrdit, že jde o materiál vhodný i pro výrobu náhradních dílů pro vojenskou techniku. Náhradní díly, které budou zkonstruovány, se nachází v interiéru vozidla a nebudou tedy vystaveny zvýšené vlhkosti ani záření a nehrozí tak rychlá degradace materiálu.

6.1 Zvýšení odolnosti zvoleného materiálu

Z vybraného materiálu budou navrženy a vyrobeny náhradní díly pro společnost TATRA DEFENCE VEHICLE a.s. Výběr materiálu musel odpovídat požadavkům takovým způsobem, aby byla pro danou aplikaci mechanická a teplotní odolnost dostatečná. Zároveň byl kladen důraz na ekonomickou efektivitu. Použití odolného, ale drahého materiálu v aplikacích, které zvýšenou odolnost nevyžadují, sníží výhodnost použití aditivního procesu výroby. Zvolený materiál Nylon CF15 Carbon je z materiálů, které byly zkoumány v předchozích kapitolách, nejvhodnější pro použití ke konstrukci zmíněných dílů. Pro běžné díly v automobilu by bylo možné zvolit například polymer ASA, nebo nějakou levnější variantu polyamidu. Lze ale předpokládat, že díl bude více namáhán mechanicky i tepelně.

V případě potřeby dalšího zvýšení odolnosti dílu by bylo možné výtisk podrobit žíhání, popřípadě použít metodu přetavení v soli, která nabízí lepší zachování původního tvaru. Dle studie [79] provedené na Univerzitě vědy a technologie ve Vratislavi lze žíháním materiálu PLA dosáhnout nárůstu pevnosti o 24 %. Metoda přetavení v soli u materiálu PET-G zvýšila jeho pevnost v tahu o 13 %, navíc materiál takřka ztratil anizotropní vlastnosti a jeho pevnost v ose Z vzrostla o 306 %. Deformace plastu při přetavení v soli je nižší než při žíhání. Zlepšení mechanických vlastností žíháním u toho konkrétního materiálu potvrzuje i studie [80] provedená na univerzitě v Portu v Portugalsku. Materiál Nylon CF15 Carbon vykazoval zlepšení pevnosti v tahu a pevnosti v ohybu o 10–15 %. Dalším způsobem, jak zvýšit odolnost výtisku, je správné nastavení tiskových parametrů. Dostupná studie [81] popisuje vliv nastavení rastru tisku a teploty na únavu materiálu. Jako nejlepší se jeví tisk rastru pod úhlem 45° a stabilní zvýšené teploty okolí. Chyby tisku, jako jsou dutiny a praskliny, odolnost vůči únavě snižují. Odladění tiskových parametrů se jeví pro potřeby tisku náhradních dílů do vojenské techniky jako lepší možnost zlepšování mechanických parametrů, jelikož nezvyšuje cenu dílu, nedeformuje vytištěný polymer a neprodlužuje tolik dobu výrobního

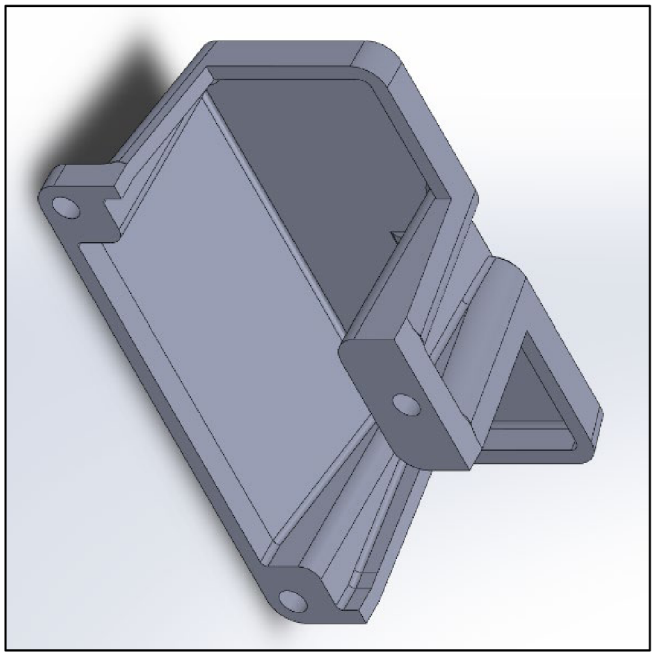
procesu. Žíhání vyžaduje další techniku, a tak by byla ztížena například výroba dílu v polních podmínkách.

Úprava parametrů tisku zároveň může zmírnit nebo úplně eliminovat problém s delaminací po degradaci, který byl popsán v kapitole o zkoušce vrubové houževnatosti. Zlepšení adheze jednotlivých vrstev lze dosáhnout snížením tloušťky vrstvy, zpomalením tisku, snížením intenzity chlazení a vhodnou úpravou teploty tisku. Náhradní díly tedy bude vhodné tisknout s tloušťkou nanášené vrstvy v rozmezí 0,1–0,2 mm (za předpokladu, že bude použita tryska s průměrem 0,4 mm). Rychlost 60 mm/s je dostatečně pomalá. Intenzitu chlazení je třeba volit v závislosti na použité tiskárně, určitě je však vhodné použít intenzitu někde při spodní hranici možností chladicího systému.

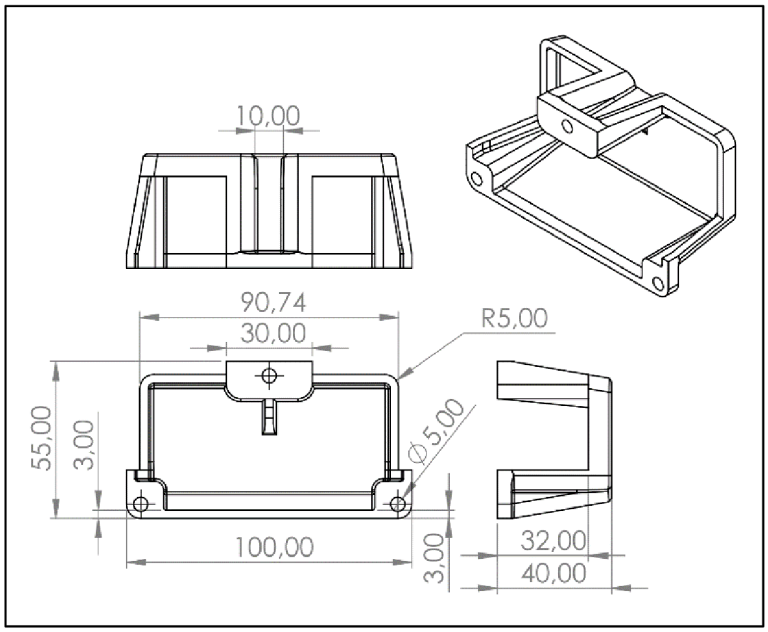
6.2 Vzorky pro společnost TATRA DEFENSE a.s.

Náhradní díly, na které poskytla výkresy společnost TATRA DEFENCE a.s., jsou součástí krytu elektroinstalace vozidla v kabině a jedná se o pouzdro pojistky. Sestava je tvořena dvěma díly, krytem pojistky a základnou krytu pojistky. K dispozici byly výkresy pro obě části.

Oba díly byly podle dat z výkresů vymodelovány v programu SolidWorks, soubory objektů ve formátech „.stl“ a „.SLDPRT“ se nachází v příloze této práce. Snímek krytu pojistky z prostředí programu SolidWorks se nachází na obrázku č. 58. Technický výkres tohoto dílu je na obrázku č. 59.

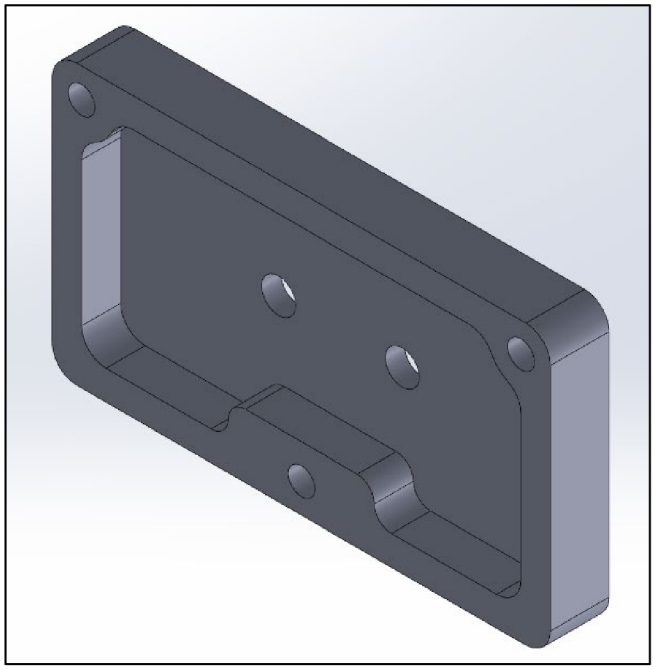


Obrázek 58 - Kryt pojistky Tatra

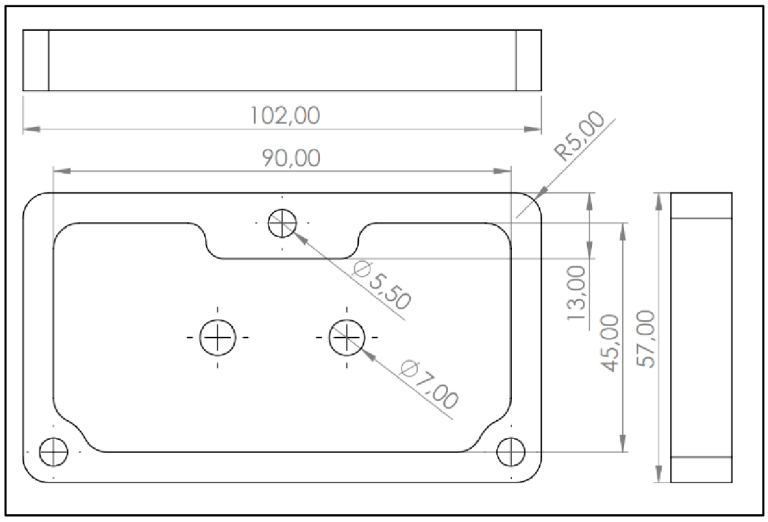


Obrázek 59 - Výkres krytu pojistky Tatra

Kryt pojistky bude mít podle programu hmotnost 37,67 g. Model základny krytu pojistky z prostředí SolidWorks je znázorněn na obrázku č. 60, výkres se nachází na obrázku č. 61. Program ukazoval hmotnost dílu 41,43 g.



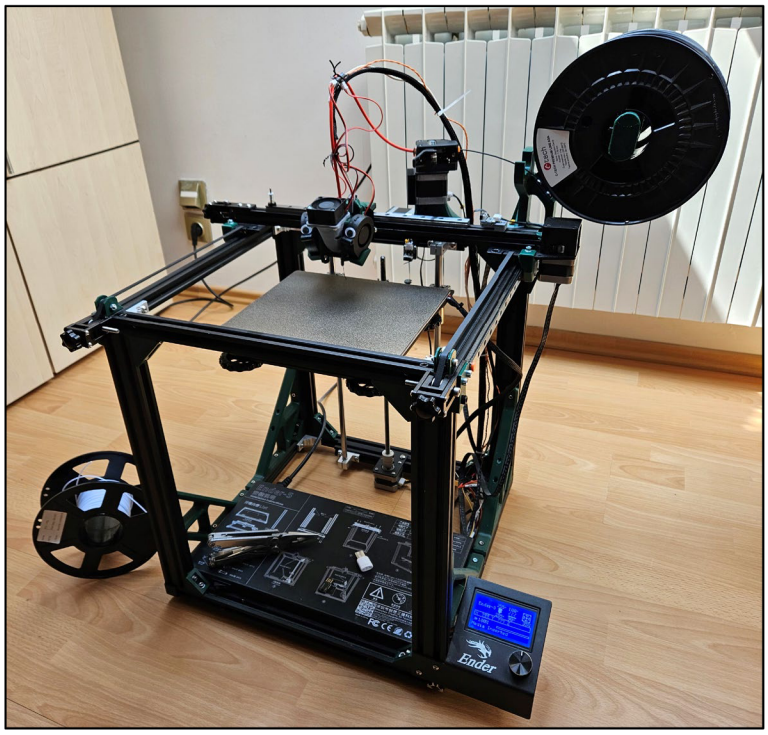
Obrázek 60 - Základna krytu pojistky



Obrázek 61 - Výkres základny krytu pojistky

V průběhu realizace této práce byl zvažován návrh alternativní sestavy dílů, které by snížily hmotnost a ušetřily materiál a tudíž i výrobní náklady. Oběma dílům byl ubrán materiál na plochách a vzniklý prostor byl vyplněn čtverečnou mříží. Tato úprava snížila hmotnost celé sestavy o zhruba o 5 %, prodloužila se ovšem doba tisku kvůli neustálým změnám směru pohybu tiskové hlavy. Tato varianta dílů byla tedy zavrhnuta, jelikož lze snížení hmotnosti bez výrazného omezení strukturální pevnosti dosáhnout i vhodnou volbou tloušťky stěn a výplně. To podporují i data z již zmíněné studie [76] provedené na Turínské polytechnické univerzitě v Itálii, která ukazují, že je vliv vnitřní výplně na vrubovou houževnatost relativně malý. Výtisk s výplní 100 % vykazoval pouze o 4 % vyšší hodnotu vrubové houževnatosti v porovnání s výplní 15 %. Doba tisku bude také rychlejší.

Kryt pojistky i základna krytu byly vytištěny na výrazně upravené FDM 3D tiskárně Ender 5 od firmy Creality, která se nachází na obrázku č. 62.



Obrázek 62 - Upravená tiskárna Creality Ender 5

Tisk probíhal při teplotě trysky 260 °C a podložky 100 °C s intenzitou chlazení 35 %. Rychlost tisku činila 60 mm/s. Použita byla tryska s průměrem 0,4 mm, výška vrstvy byla 0,2 mm. Pro tisk bylo použito 5 perimetrů a tri-hexagonální výplň (hvězdičky) s hustotou 20 %. V souladu s informacemi z kapitoly „6.1 Zvýšení odolnosti zvoleného materiálu“ byl volen úhel rastru plné výplně spodních a vrchních vrstev 45°. Díly byly vytištěny na podložku pokrytou polymerem PEI. Hmotnost krytu pojistky po vytisknutí činí 32 g, podložka krytu pojistky váží 29 g. Slicer ukazoval konečné hmotnosti výtisků 33 g a 30 g, reálné díly jsou tedy každý o jeden gram lehčí. Při nastavení tisku pouze perimetry (100 % koncentrická výplň) by kryt pojistky vážil 36 g a podložka krytu 40 g. Tiskem s řidší výplní byla tedy ušetřena hmotnost a sestava je lehčí zhruba o 20 %. Na obrázcích č. 63 a 64 se nacházejí vytištěné díly.

Obrázek 63 - Vytištěný kryt pojistky

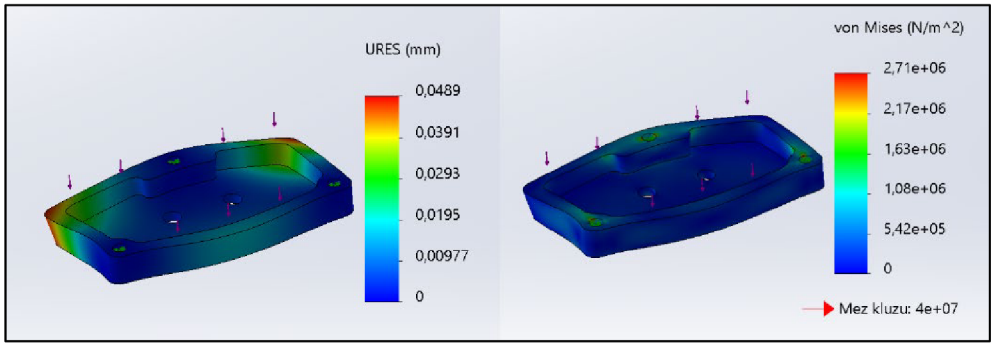
Obrázek 64 - Vytištěná základna krytu pojistky

6.3 Simulace zatížení dílů

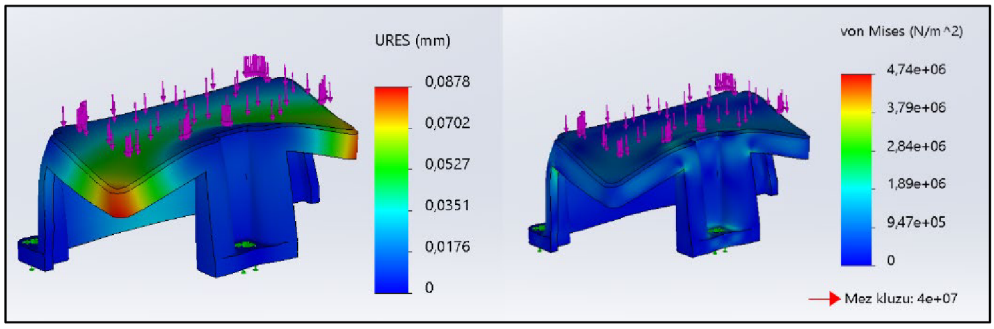
Pro rozšíření povědomí o chování dílu při působení vnějších sil byla provedena simulace zatížení v programu Solidworks, konkrétně byla vytvořena statická analýza v plug-in modulu Simulation.

Knihovna programu obsahuje několik typů nylonu, materiál s uhlíkovými vlákny však chybí. Pomocí hodnot z datasheetu výrobce Fillamentum byl pro simulaci nakonfigurován materiál, který vlastnostmi odpovídá nylonu s uhlíkem. Díl byl uchycen v místech, kde se nachází otvory pro šrouby. Byla zvolena velmi jemná geometrická síť objektu pro výpočet. Oba díly byly vystaveny působení sil z několika směrů. Hodnoty

použitých sil jsou pro účely simulace nadhodnocené. Sestava není při normálním provozu určena pro extrémní fyzickou zátěž, v případě například zásahu vozidla či kolize ale bude vyvíjená síla vysoko nad hodnotami sil, které na díl působí při běžném provozu. První scénář zahrnuje působení síly 100 N shora a druhý obsahoval 5 sil, každá o hodnotě 100 N, tlačících na objekty ze všech stran, kromě spodní strany. Na obrázcích č. 65 a 66 se nachází simulace zatížení shora.

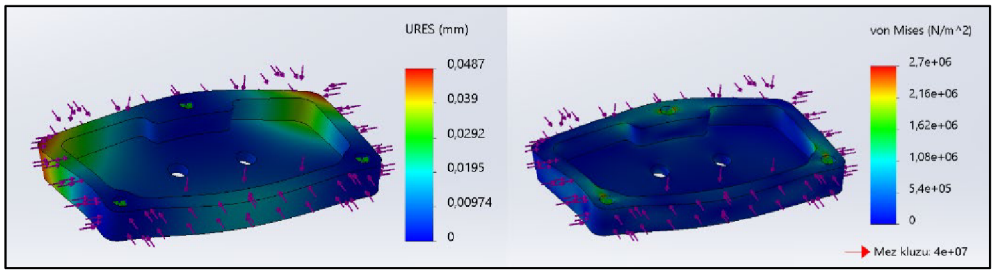


Obrázek 65 – Vizualizace simulace zatížení shora na základnu krytu pojistky

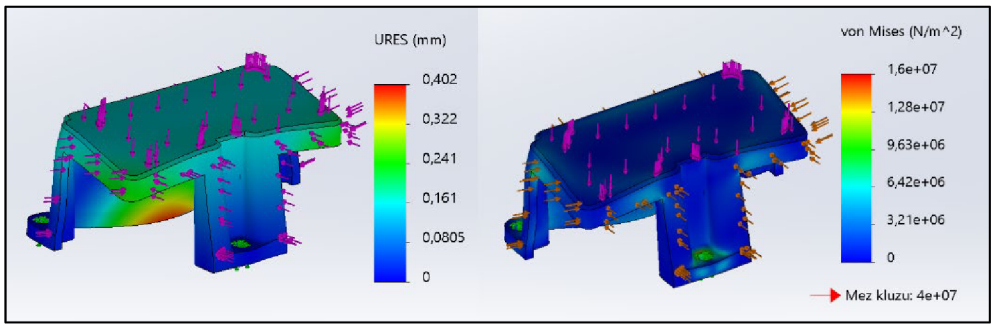


Obrázek 66 – Vizualizace simulace zatížení shora na kryt pojistky

Simulace zatížení shora má napodobit působení sil na díl při skladování do věže, kdy jsou jednotlivé díly položeny na sobě. Deformace dílů při zatížení je minimální. Maximální deformace základny krytu se pohybuje pod hranicí 0,05 mm a pod hranicí 0,09 mm u krytu pojistky. Mez kluzu se u obou dílů nachází vysoko nad hranicí maximálního napětí na díl při simulaci. Oba díly by tak vydrželi mnohem vyšší zatížení shora, než je síla 100 N, což odpovídá působení hmotnosti 10 kg. Vzhledem k hmotnosti dílů je nepravděpodobné, že by byla někdy síla zatížení při skladování vyšší. Vizualizace simulace působení sil ze všech stran se nachází na obrázcích č. 67 a 68.



Obrázek 67 - Vizualizace simulace zatížení ze všech stran na základnu krytu pojistky



Obrázek 68 - Vizualizace simulace zatížení ze všech stran na kryt pojistky

Simulace zatížení ze všech stran má za cíl napodobit mimořádnou situaci při kolizi či zásahu vozidla, kdy na díl může působit tlaková vlna nebo deformující se okolí. Deformace základny krytu je velmi podobná jako při zatížení shora, deformace krytu pojistky je ovšem znatelně vyšší. Deformace v nejvíce zasaženém místě činí 0,402 mm. I když je v případě krytu pojistky hodnota maximálního napětí 3x vyšší než při zatížení pouze shora, tak se napětí stále nachází bezpečně pod mezí kluzu. Oba díly tedy neztratí svou integritu, jak při skladování se zatížením 10 kg shora, tak i při působení síly o hodnotě 100 N ze všech stran.

7. PŘÍPADOVÁ STUDIE

V této kapitole práce je vypracována případová studie pro navržený a vytištěný náhradní díl od společnosti TATRA DEFENSE a.s. Studie porovnává ekonomickou stránku použité technologie FDM s tradičním vstřikováním a zkoumá, zda je 3D tisk vůbec výhodné použít. Také srovnává časovou náročnost tohoto typu aditivní výroby se vstřikováním.

7.1 Sestava krytu pojistky TATRA DEFENSE a.s.

Porovnány jsou 3 různě pokročilé stroje. Hobby tiskárna Sovol SV06 Plus, poloprofesionální stroj Bambu Lab X1 Carbon a profesionální 3D tiskárna BCN3D Epsilon W50. Hobby tiskárna Sovol SV06 Plus stojí zhruba 9.000 Kč [82] a nabízí rychlost tisku až 150 mm/s. Stroj nemá uzavřenou konstrukci, a tak na něm může být tisk materiálů ABS, ASA a nylon obtížnější. V této cenové kategorii mají otevřenou konstrukci takřka všechny modely. Poloprofesionální stroj Bambu Lab X1 Carbon [83] lze pořídit za 37.999 Kč. Jedná se o tiskárnu s typem kinematiky Core XY, takže je to velmi rychlý stroj, má uzavřenou konstrukci. Stejně tak má krytou konstrukci i profesionální 3D tiskárna BCN3D Epsilon W50 [84] s cenovkou 226.754 Kč, která má 2 tiskové hlavy, a tak lze v případě potřeby tisknout podpěry levnějším materiálem.

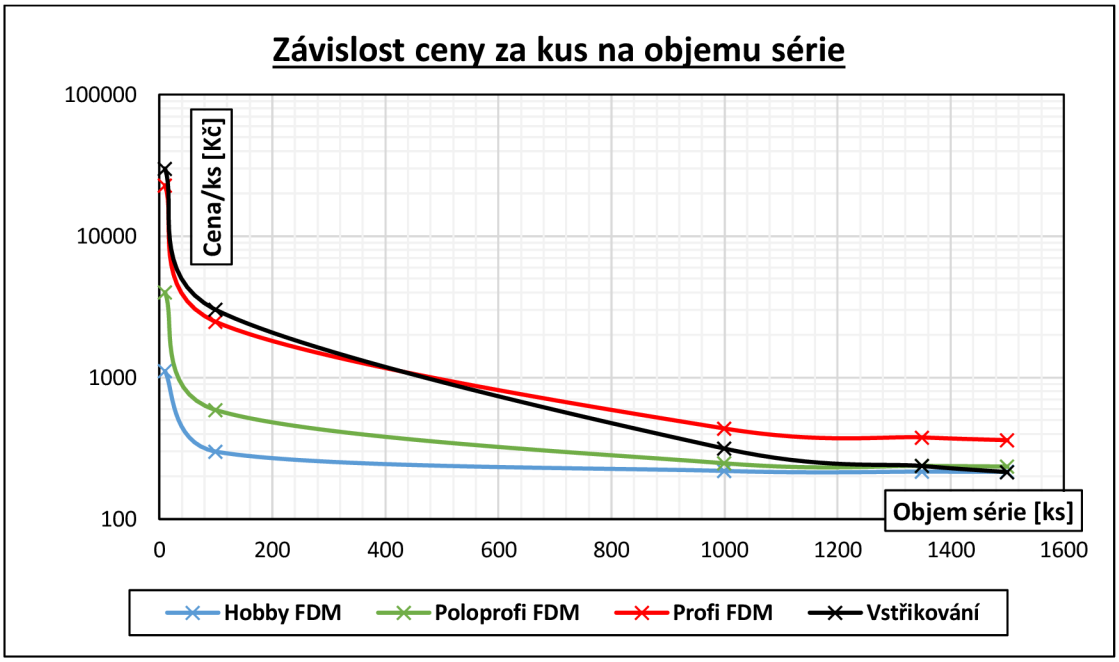
Výroba vstřikováním by probíhala externě u firmy. Cena formy pro automatický lis se pohybuje okolo 50.000 Kč [85] u malé jednoduché součástky o délce 50 mm. Náklady na větší součástku by tedy byly vyšší a navíc se jedná o 2 díly, pro účely této studie lze tedy počítat s cenou 300.000 Kč.

Cena za 1 roli materiálu Nylon CF15 Carbon o váze 600 g je 1660 Kč, při váze sestavy 76 g to dělá 210 Kč za jeden kus. Cena za výrobu malého dílu dlouhého 50 mm vstřikováním je 0,3 Kč. Vzhledem k výrobě více dílů, použití dražšího materiálu a mnohem větším rozměrům a vyšší hmotnosti sestavy byla odhadnuta cena za 1 výlisek na 15 Kč. Tisk sestavy na stroji Sovol SV06 Plus rychlostí 120 mm/s by trval 3 hodiny a 33 minut. Tiskárna Bambu Lab X1 Carbon je schopná vytisknout sestavu za 3 hodiny a 14 minut při rychlosti tisku 200 mm/s. Výrobce BCN3D neudává nastavení rychlosti tisku u svého modelu Epsilon W50, lze předpokládat, že by rychlost byla velmi podobná rychlosti stroje od Bambu Lab. Data s cenami a náklady byla vynesena do tabulky č. 25.

Náklady	Hobby FDM	Poloprofi FDM	Profi FDM	Vstřikování
Cena stroje	9000	37999	226754	-
Cena formy	-			300000
Cena materiálu	1660	1660	1660	-
Materiál na kus	210			-
Cena 1 výlisku	-			15
Doba výroby kusu	3,5	3,25		-
Náklady na 1 ks	9210	38209	226964	300015
Náklady na 10 ks	11100	40099	228854	300150
Náklady/ks (10 ks)	1110	4010	22885	30015
Náklady na 100 ks	30000	58999	247754	301500
Náklady/ks (100 ks)	300	590	2478	3015
Náklady na 1000 ks	219000	247999	436754	315000
Náklady/ks (1000 ks)	219	248	437	315

Tabulka 25 – Ceny a náklady na výrobu

Z dat je zřejmé, že vstřikování není vhodné pro malosériovou výrobu. Při výrobě jednoho, deseti i sta kusů je vystřikování nejdražší. Při velikosti série 1350 kusů začíná být výroba metodou vstřikování výhodnější, než je tisk na poloprofesionálním modelu 3D tiskárny. Při použití levnějšího hobby stroje začíná být vstřikování levnější při sérii větší než 1500 kusů. Závislost ceny za kus na velikosti vyráběné série se vynesena do grafu č. 2.



Graf 2 - Závislost ceny za kus na objemu série

Lze také předpokládat, že levnější stroj bude vyžadovat častější údržbu a náklady se zvýší. Profesionální 3D tiskárna je velmi drahá a cena za kus není tak výhodná jako u levnějších strojů. Cenu za kus by bylo možné snížit využitím druhé tiskové hlavy pro konstrukci podpěr z levnějšího materiálu. Jako dobré řešení se zdá být kompromis a volba poloprofesionálního stroje, který bude s největší pravděpodobností spolehlivější než levná tiskárna a mnohem levnější než profesionální řešení. Pro výrobu náhradních dílů pro vojenskou techniku v polních podmínkách je také velkou výhodou uzavřená konstrukce stroje.

Investice do 3D tiskárny se vyplatí především, pokud zvažujeme výrobu v menších sériích. Při výrobě velkého počtu kusů začíná být vstřikování výhodnější. 3D tisk bude při použití stroje z jakékoliv zmíněné kategorie mnohem výhodnější, pokud je třeba vyrábět více druhů dílů. Náklady na formy pro vstřikování u 3D tisku z podstaty výrobního procesu zcela odpadají a výroba třeba 5 různých druhů náhradních dílů bude násobně levnější.

ZÁVĚR

Prostřednictvím teoretické části této práce byly prozkoumány technologie 3D tisku a používané materiály. Za nejběžnější technologie 3D tisku byly označeny FDM, SLA, DLP, SLS, DMLS a SLM a principy těchto technologií byly rozebrány. Každá z těchto technologií je v automobilovém průmyslu používaná. Nejpoužívanějšími materiály k 3D tisku technologií FDM jsou PLA, PET a ABS. Liší se od sebe svými vlastnostmi. Byla popsána ještě řada dalších méně používaných materiálů. Technologie SLA a DLP používají k tisku pryskyřici tuhnoucí za působení UV světla. Odlišnosti vlastností jednotlivých fotopolymerů je dosaženo přimícháváním přísad. K 3D tisku technologiemi SLS, DMLS a SLM se používá materiál ve formě prášku. Některé stroje umožňují také tisk z kovového prášku. Dále byl prozkoumán software, který byl v této práci použit. Programy typu CAD se používají pro modelování objektů v průmyslovém prostředí. Dále je třeba pomocí slicing softwaru, jako je třeba Ultimaker Cura, převést objekt na formát, se kterým pracuje 3D tiskárna. Poslední kapitola teoretické části je věnována konkrétním případům využití 3D tisku v automobilovém průmyslu. 3D tisk lze použít k vytváření prototypů a snížit tím náklady při vývoji. Lze ho aplikovat i přímo při výrobním procesu a díky tomu šetřit suroviny či zrychlit a zlevnit výrobu nástrojů. Tyto technologie lze využít pro rozšíření nabídky možností přizpůsobení v katalozích automobilek. 3D tisk může být odpovědí na nedostupnost starších dílů, které se již nevyrábí. Jeho využitím lze snížit ekologickou stopu při vývoji, výrobě i provozu automobilu.

Na začátku experimentální části byla vytvořena metodika postupu. Byl sestrojen blokový diagram, který obsahuje všechny kroky vedoucí k výběru materiálu, testování mechanických vlastností a konečnou realizaci náhradních dílů. Pro další zkoumání byl zvolen materiál Nylon CF15 Carbon od společnosti Fillamentum. Jedná se o polymer PA12 s 15% obsahem výplně z uhlíkových trubiček.

Byla provedena zkouška pevnosti v tahu, test tvrdosti na stupnici Shore D a zkouška vrubové houževnatosti. Pro srovnání byl použit materiál PLA. Vzorky materiálu byly podrobeny testu v klimatické komoře, kde byly vystaveny simulovanému slunečnímu záření o intenzitě 115 W/m^2. Za 2 měsíce byla v klimatické komoře vyzářena energie srovnatelná s 5,3 dny na letním slunci v Káhiře, nedošlo k žádné zaznamenatelné změně barvy vzorků. Na testovací vzorky také působila vlhkost a ostřik destilovanou vodou. Hmotnost vzorků po měsíci degradace vzrostla o 8,8 %. Po 2 měsících v klimatické komoře klesla o 9,2 % vlivem degradace materiálu a vysušením testovacích vzorků.

Byla provedena série časově a organizačně náročných měření na Fakultě chemie Vysokého učení technického v Brně. Degradovaný materiál byl podroben dalším testům vrubové houževnatosti při různých teplotách, neboť tato zkouška nejlépe odpovídala nárokům na materiál pro výrobu náhradního dílu do vojenské techniky. Tato data navíc nebyla k dispozici. Výsledky byly porovnány se studiemi zkoumajícími směsi nylonu s uhlíkem. Testovaný materiál PA12+CF15 vykazoval násobně vyšší houževnatost

v porovnání s materiálem PA612+CF20. Testovaný nylon také vykazoval několikanásobně vyšší hodnotu vrubové houževnatosti v porovnání s polymerem PLA, a to i po degradaci. Vrubová houževnatost se s dobou degradace snižuje, především pak u vzorků, které v klimatické komoře strávili 2 měsíce. Bylo tedy dosaženo rozšíření dostupných informací o tomto typu materiálu o chování jeho vrubové houževnatosti při různých teplotách.

Bylo provedeno měření na elektronovém mikroskopu, zde byl nasnímán lom testovacích vzorků pro různé teploty. Data získaná při měření vrubové houževnatosti byla dána do kontextu se získanými snímky. Při záporných teplotách materiál vykazuje deformaci povrchu vlivem rozpínání vlhkosti při změně skupenství. Se stoupající teplotou vzorků dochází k oddělení uhlíkových trubiček od nylonu. Degradace má vliv na mikrotrhliny v materiálu a také na soudržnost vrstev. Po degradaci s rostoucí teplotou docházelo k delaminaci testovaných vzorků.

Na základě získaných dat byl ze zvoleného materiálu zkonstruován náhradní díl. Jedná se o sestavu krytu pojistky a základny krytu pojistky od společnosti TATRA DEFENSE a.s. V programu SolidWorks byly pomocí dokumentace vymodelovány modely pro oba díly. Oba díly byly podrobeny simulaci, která zkoumala zatížení dílu při skladování a zatížení dílu při zásahu či kolizi vozidla. Náhradní díly se ukázaly jako dostatečně pevné. Kryt pojistky byl vytištěn na upravené tiskárně Ender 5, stejně tak základna krytu. Ekonomická stránka věci byla rozebrána v případové studii. Ta porovnává náklady na výrobu zmíněné sestavy pomocí 3D tisku na strojích třech různých kategorií s náklady na výrobu pomocí vstřikování. Využití 3D tisku se vyplatí při objemu vyráběné série pod 1350–1500 kusů. Pokud je třeba vyrábět více druhů dílů v menších sériích, vyplatí se 3D vždy.

Aditivní postup výroby s využitím 3D tisku je tedy vhodný pro použití v automobilovém průmyslu, to platí i pro výrobu dílů pro vojenskou techniku. Experimentální část dokazuje, že takto vyrobený díl může být dostatečně odolný. Případová studie pak poukazuje na ekonomickou výhodnost při výrobě náhradních dílů v menším počtu kusů.

LITERATURA

[1] TEN KATE, Jelle, Gerwin SMIT a Paul BREEDVELD. 3D-printed upper limb prostheses: a review. *Disability and Rehabilitation: Assistive Technology* [online]. 2017, **12**(3), 300–314 [vid. 2022-05-01]. ISSN 1748-3107. Dostupné z: doi:10.1080/17483107.2016.1253117

[2] CORBEL, Serge, Olivier DUFAUD a Thibault ROQUES-CARMES. Materials for Stereolithography. In: Paulo Jorge BÁRTOLO, ed. *Stereolithography: Materials, Processes and Applications* [online]. Boston, MA: Springer US, 2011 [vid. 2022-04-29], s. 141–159. ISBN 978-0-387-92904-0. Dostupné z: doi:10.1007/978-0-387-92904-0_6

[3] SAVINI, A. a G.G. SAVINI. A short history of 3D printing, a technological revolution just started. In: *2015 ICOHTEC/IEEE International History of High-Technologies and their Socio-Cultural Contexts Conference (HIS^{TEL}CON)*: *2015 ICOHTEC/IEEE International History of High-Technologies and their Socio-Cultural Contexts Conference (HIS^{TEL}CON)* [online]. 2015, s. 1–8. Dostupné z: doi:10.1109/HIS^{TEL}CON.2015.7307314

[4] *Přehled technologií 3D tisku | dkmp Nový Jičín, Ostrava* [online]. [vid. 2022-04-27]. Dostupné z: http://www.dkmp.cz/o-nas/detail/prehled-technologii-3d-tisku

[5] Anatomy of BCN 3D Sigma & Sigmax R19 extrusion system. *BCN3D Technologies* [online]. 15. leden 2019 [vid. 2022-04-27]. Dostupné z: https://www.bcn3d.com/bcn3d-sigma-sigmax-r19-extrusion-e3d-bondtech-3d-printer/

[6] FDM 3D Printing for Automotive Applications: Are you losing the race with archaic support removal? *The Javelin Blog* [online]. 31. leden 2020 [vid. 2022-05-07]. Dostupné z: https://www.javelin-tech.com/blog/2020/01/fdm-post-processing-for-automotive-applications/

[7] ASIF, Muhammad, Joo Hyun LEE, Mikyla J. LIN-YIP, Simone CHIANG, Alexis LEVASLOT, Tim GIFFNEY, Maziar RAMEZANI a Kean Chin AW. A new photopolymer extrusion 5-axis 3D printer. *Additive Manufacturing* [online]. 2018, **23**, 355–361 [vid. 2022-05-01]. ISSN 2214-8604. Dostupné z: doi:10.1016/j.addma.2018.08.026

[8] BARONE, Sandro, Paolo NERI, Alessandro PAOLI, Armando V. RAZIONALE a Francesco TAMBURRINO. Development of a DLP 3D printer for orthodontic applications. *Procedia Manufacturing* [online]. 2019, **38**, 29th International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing (FAIM 2019), June 24-28, 2019, Limerick, Ireland, Beyond Industry 4.0: Industrial Advances, Engineering Education and Intelligent Manufacturing, 1017–1025 [vid. 2022-04-30]. ISSN 2351-9789. Dostupné z: doi:10.1016/j.promfg.2020.01.187

[9] What Is a DLP 3D Printer? – Simply Explained. *All3DP* [online]. 1. září 2018 [vid. 2022-05-01]. Dostupné z: https://all3dp.com/2/what-is-a-dlp-3d-printer-3d-printing-simply-explained/

[10] *3D Printing in Automotive Application | Magforms* [online]. [vid. 2022-05-07]. Dostupné z: http://www.magforms.com/SLA-3D-Printing-Automotive

[11] LEKURWALE, Srushti, Tukaram KARANWAD a Subham BANERJEE. Selective laser sintering (SLS) of 3D printlets using a 3D printer comprised of IR/red-diode laser. *Annals of 3D Printed Medicine* [online]. 2022, **6**, 100054 [vid. 2022-04-29]. ISSN 2666-9641. Dostupné z: doi:10.1016/j.stlm.2022.100054

[12] FOLTÝNEK, Jaroslav. Prášková metalurgie a základy procesu slinování [online]. nedatováno [vid. 2022-05-01]. Dostupné z: http://dspace.vutbr.cz/handle/11012/18924

[13] What's the Difference Between SLS and SLM? *Online 3D Printing Service | Fast & Affordable | FDM, MJF, SLS +* [online]. [vid. 2022-05-01]. Dostupné z: https://www.rapidmade.com/rapidmade-blog/2014/6/30/ycjnxytvpt8n85gqutk5wj67cmx4t7

[14] *SLS 3D tisk z práškových termoplastů s využitím laseru* [online]. 29. leden 2021 [vid. 2022-05-05]. Dostupné z: https://3dwiser.com/produkty/3d-tiskarny/termoplasty-sls/

[15] Global Automotive Supplier Brose Turns to SLS 3D Printing to Produce End-Use Car Parts. *Formlabs* [online]. [vid. 2022-05-07]. Dostupné z: https://formlabs.com/uk/blog/automotive-supplier-brose-sls-3d-printing-fuse-1/

[16] MATERIALPRO3D.CZ. PLA tisková struna zelená metalická 1,75 mm 1 kg Filament PM. *materialpro3d.cz* [online]. [vid. 2022-05-05]. Dostupné z: https://www.materialpro3d.cz/pla-1-75/pla-tiskova-struna-zelena-metalicka-1-75-mm-1-kg-filament-pm/

[17] KHAN, Saifuddin, Ketan JOSHI a Samadhan DESHMUKH. A comprehensive review on effect of printing parameters on mechanical properties of FDM printed parts. *Materials Today: Proceedings* [online]. 2022, **50**, 2nd International Conference on Functional Material, Manufacturing and Performances (ICFMMP-2021), 2119–2127 [vid. 2022-04-29]. ISSN 2214-7853. Dostupné z: doi:10.1016/j.matpr.2021.09.433

[18] MATERIALPRO3D.CZ. PLA filamenty FDM tisk materialpro3d.cz. *materialpro3d.cz* [online]. 1. říjen 2016 [vid. 2022-05-03]. Dostupné z: https://www.materialpro3d.cz/materialovy-slovnik/pla/

[19] MATERIALPRO3D.CZ. ABS tiskový materiál a jeho další varianty. *materialpro3d.cz* [online]. 17. červenec 2018 [vid. 2022-05-03]. Dostupné z: https://www.materialpro3d.cz/materialovy-slovnik/abs/

[20] MATERIALPRO3D.CZ. PET-G filamenty pro 3D tisk. *materialpro3d.cz* [online]. 11. říjen 2016 [vid. 2021-05-18]. Dostupné z: https://www.materialpro3d.cz/materialovy-slovnik/pet-g/

[21] MATERIALPRO3D.CZ. Nylon (PA) materiál pro 3D tisk. *materialpro3d.cz* [online]. 3. srpen 2016 [vid. 2022-05-03]. Dostupné z: https://www.materialpro3d.cz/materialovy-slovnik/nylon/

[22] MATERIALPRO3D.CZ. TPU tisková struna. *materialpro3d.cz* [online]. 4. srpen 2016 [vid. 2022-05-03]. Dostupné z: https://www.materialpro3d.cz/materialovy-slovnik/tpu/

[23] MATERIALPRO3D.CZ. super odolný 3D tiskový materiál. *materialpro3d.cz* [online]. 20. září 2018 [vid. 2022-05-03]. Dostupné z: https://www.materialpro3d.cz/materialovy-slovnik/pc/

[24] MATERIALPRO3D.CZ. PEEK filament FDM tisk materialpro3d.cz. *materialpro3d.cz* [online]. 23. leden 2018 [vid. 2022-05-03]. Dostupné z: https://www.materialpro3d.cz/materialovy-slovnik/peek/

[25] MATERIALPRO3D.CZ. Polypropylenová tisková struna. *materialpro3d.cz* [online]. 4. srpen 2016 [vid. 2022-05-07]. Dostupné z: https://www.materialpro3d.cz/materialovy-slovnik/pp/

[26] SARICAM, Canan a Nazan OKUR. *Polyester Usage for Automotive Applications* [online]. B.m.: IntechOpen, 2018 [vid. 2022-05-07]. ISBN 978-953-51-3882-2. Dostupné z: doi:10.5772/intechopen.74206

[27] NOTTA-CUVIER, Delphine, Jérémy ODENT, Remi DELILLE, Marius MURARIU, Franck LAURO, Jean-Marie RAQUEZ, Bruno BENNANI a Philippe DUBOIS. Tailoring polylactide (PLA) properties for automotive applications: Effect of addition of designed additives on main mechanical properties. *Polymer Testing* [online]. 2014, **36**, 1–9. Dostupné z: doi:10.1016/j.polymertesting.2014.03.007

[28] *Car Plastic — 4 Varieties Used In The Automotive Industry* [online]. [vid. 2022-05-07]. Dostupné z: https://www.acplasticsinc.com:443/informationcenter/r/plastic-used-in-cars

[29] *ATTBLIME r3sin fotopolymerní pryskyřice pro 3D tiskárny | šedá | 1 litr* [online]. [vid. 2022-05-05]. Dostupné z: https://www.3dees.cz/e-shop/29-attblime-r3sin-fotopolymerni-pryskyrice-pro-3d-tiskarny-seda-1-litr

[30] MATERIALPRO3D.CZ. Průvodce Resiny. *materialpro3d.cz* [online]. 3. březen 2021 [vid. 2022-05-05]. Dostupné z: https://www.materialpro3d.cz/blog/resiny/

[31] Guide to 3D Printing Materials: Types, Applications, and Properties. *Formlabs* [online]. [vid. 2022-05-05]. Dostupné z: https://formlabs.com/blog/3d-printing-materials/

[32] SLS Powder Buyer's Guide 2022. *All3DP Pro* [online]. 23. březen 2022 [vid. 2022-05-05]. Dostupné z: https://all3dp.com/1/sls-powder-buyers-guide/

[33] Direct Metal Laser Sintering (DMLS) – Simply Explained. *All3DP* [online]. 15. duben 2021 [vid. 2022-05-05]. Dostupné z: https://all3dp.com/2/direct-metal-laser-sintering-dmls-simply-explained/

[34] Selective Laser Sintering in details. *Sinterit – Manufacturer of compact and industrial SLS 3D printers* [online]. [vid. 2023-05-19]. Dostupné z: https://sinterit.com

[35] *Computer-aided design* [online]. 2022 [vid. 2022-04-29]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Computer-aided_design&oldid=1085227224

[36] What File Formats Are Used In 3D Printing? *Additive- X* [online]. 8. září 2021 [vid. 2022-04-29]. Dostupné z: https://www.additive-x.com/blog/file-formats-used-3d-printing/

[37] *G-code* [online]. 2022 [vid. 2022-04-29]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=G-code&oldid=1081518945

[38] S.R.O, Siran 3D Evolution. Základy Gcode pro 3D tisk. *www.vsepro3dtisk.cz* [online]. [vid. 2022-04-29]. Dostupné z: https://www.vsepro3dtisk.cz/s/gcode1

[39] *Technologie zpracování plastů* [online]. [vid. 2022-04-27]. Dostupné z: https://publi.cz/books/183/Cover.html

[40] PETCH, Michael. AUDI gives update on use of SLM metal 3D printing for the automotive industry. *3D Printing Industry* [online]. 22. únor 2018 [vid. 2023-05-19]. Dostupné z: https://3dprintingindustry.com/news/audi-gives-update-use-slm-metal-3d-printing-automotive-industry-129376/

[41] COLUMBUS, Louis. The State Of 3D Printing, 2019. *Forbes* [online]. [vid. 2023-05-19]. Dostupné z: https://www.forbes.com/sites/louiscolumbus/2019/05/27/the-state-of-3d-printing-2019/

[42] NICHOLS, Megan R. How does the automotive industry benefit from 3D metal printing? *Metal Powder Report* [online]. 2019, **74**(5), 257–258 [vid. 2022-05-06]. ISSN 0026-0657. Dostupné z: doi:10.1016/j.mprp.2019.07.002

[43] ROMERO, Pablo E., Jose ARRIBAS-BARRIOS, Oscar RODRIGUEZ-ALABANDA, Ramón GONZÁLEZ-MERINO a Guillermo GUERRERO-VACA. Manufacture of polyurethane foam parts for automotive industry using FDM 3D printed molds. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* [online]. 2021, **32**, 396–404 [vid. 2022-05-06]. ISSN 1755-5817. Dostupné z: doi:10.1016/j.cirpj.2021.01.019

[44] *Ford is Saving Millions through 3D Printing (But Maybe Not How You Think)* [online]. 7. březen 2023 [vid. 2023-05-20]. Dostupné z: https://www.additivemanufacturing.media/articles/ford-is-saving-millions-through-3d-printing-but-maybe-not-how-you-think

[45] BOYLE, Alan. Boeing 777X trim tool wins Guinness record for biggest 3-D-printed object. *GeekWire* [online]. 30. srpen 2016 [vid. 2023-05-20]. Dostupné z: https://www.geekwire.com/2016/boeing-777x-3-d-printed-tool-oak-ridge/

[46] *3D METAL PRINT – METELTERA* [online]. [vid. 2022-05-07]. Dostupné z: http://www.meteltera.lt/3d-metal-printing/

[47] GRANDY, Rhonda. 3D Printed Custom Car Parts. *MatterHackers* [online]. [vid. 2023-05-20]. Dostupné z: https://www.matterhackers.com/news/3d-printed-custom-car-parts

[48] ProtoCycler+. *ReDeTec* [online]. [vid. 2023-05-20]. Dostupné z: https://redetec.com/products/protocycler

[49] *Technical-Data-Sheet_ABS-Extrafill_03012019-1.pdf* [online]. [vid. 2023-05-14]. Dostupné z: http://www.fillamentumautomotive.com/wp-content/uploads/2020/10/Technical-Data-Sheet_ABS-Extrafill_03012019-1.pdf

[50] MATERIALPRO3D.CZ. ASA 3D tiskový materiál. *materialpro3d.cz* [online]. 3. srpen 2016 [vid. 2023-01-02]. Dostupné z: https://www.materialpro3d.cz/materialovy-slovnik/asa/

[51] GUESSASMA, Sofiane, Sofiane BELHABIB a Hedi NOURI. Microstructure, Thermal and Mechanical Behavior of 3D Printed Acrylonitrile Styrene Acrylate. *Macromolecular Materials and Engineering* [online]. 2019, **304**(7), 1800793 [vid. 2022-10-27]. ISSN 1438-7492. Dostupné z: doi:10.1002/mame.201800793

[52] *Technical-Data-Sheet_ASA-Extrafill_03012019.pdf* [online]. [vid. 2023-01-02]. Dostupné z: http://www.fillamentumautomotive.com/wp-content/uploads/2020/10/Technical-Data-Sheet_ASA-Extrafill_03012019.pdf

[53] *Technical-Data-Sheet_PETG_EN_06052020_FE.pdf* [online]. [vid. 2023-01-02]. Dostupné z: http://www.fillamentumautomotive.com/wp-content/uploads/2020/10/Technical-Data-Sheet_PETG_EN_06052020_FE.pdf

[54] *Technical-Data-Sheet_Nylon-FX256.pdf* [online]. [vid. 2023-01-02]. Dostupné z: http://www.fillamentumautomotive.com/wp-content/uploads/2020/10/Technical-Data-Sheet_Nylon-FX256.pdf

[55] *technical_data_sheet_nylon_cf15_carbon_03012019.pdf* [online]. [vid. 2023-01-02]. Dostupné z: https://www.materialpro3d.cz/user/related_files/technical_data_sheet_nylon_cf15_carbon_03012019.pdf

[56] *Onyx - Composite 3D Printing Material* [online]. [vid. 2023-01-02]. Dostupné z: https://markforged.com/materials/plastics/onyx

[57] *TDS_Vinyl-303_FI.pdf* [online]. [vid. 2023-01-02]. Dostupné z: http://www.fillamentumautomotive.com/wp-content/uploads/2020/10/TDS_Vinyl-303_FI.pdf

[58] MATERIALPRO3D.CZ. CPE 3D tisková struna. *materialpro3d.cz* [online]. 30. prosinec 2017 [vid. 2023-01-02]. Dostupné z: https://www.materialpro3d.cz/materialovy-slovnik/cpe/

[59] *Technical-Data-Sheet_CPE-HG100_03012019.pdf* [online]. [vid. 2023-01-02]. Dostupné z: http://www.fillamentumautomotive.com/wp-content/uploads/2020/10/Technical-Data-Sheet_CPE-HG100_03012019.pdf

[60] MATERIALPRO3D.CZ. HIPS 3D tiskový materiál. *materialpro3d.cz* [online]. 3. srpen 2016 [vid. 2023-01-02]. Dostupné z: https://www.materialpro3d.cz/materialovy-slovnik/hips/

[61] *Technical-Data-Sheet_HIPS-Extrafill_03012019.pdf* [online]. [vid. 2023-01-02]. Dostupné z: http://www.fillamentumautomotive.com/wp-content/uploads/2020/10/Technical-Data-Sheet_HIPS-Extrafill_03012019.pdf

[62] HOMOLA, Jan. Teplota tvarové stálosti (HDT). *3D-tisk.cz* [online]. 21. květen 2016 [vid. 2022-12-30]. Dostupné z: https://www.3d-tisk.cz/teplota-tvarove-stalosti-hdt/

[63] PÉTER, Tamás, Katalin LITAUSZKI a Ákos KMETTY. Improving the heat deflection temperature of poly(lactic acid) foams by annealing. *Polymer Degradation and Stability* [online]. 2021, **190**, 109646 [vid. 2022-12-30]. ISSN 0141-3910. Dostupné z: doi:10.1016/j.polymdegradstab.2021.109646

[64] 3DWISER. UltiMaker 2+ Connect 3D tiskárna - 3Dwiser. *eshop.3dwiser.com* [online]. [vid. 2023-05-14]. Dostupné z: https://eshop.3dwiser.com/fff-fdm/ultimaker-2-plus-connect/

[65] *Pevnost v tahu* [online]. 2021 [vid. 2023-01-02]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Pevnost_v_tahu&oldid=19642419

[66] *Mechanické vlastnosti polymerů – statické namáhání* [online]. [vid. 2023-01-03]. Dostupné z: https://publi.cz/books/180/09.html

[67] LIAO, Guangxin, Zhixiang LI, Yuchuan CHENG, Dingding XU, Dingchun ZHU, Shenglong JIANG, Jianjun GUO, Xinde CHEN, Gaojie XU a Yuejin ZHU. Properties of oriented carbon fiber/polyamide 12 composite parts fabricated by fused deposition modeling. *Materials & Design* [online]. 2018, **139**, 283–292 [vid. 2023-05-21]. ISSN 0264-1275. Dostupné z: doi:10.1016/j.matdes.2017.11.027

[68] INSIZE. Tvrdoměr Shore D na tvrdé materiály ISH-SDM INSIZE - INSIZE. *insz.eu* [online]. [vid. 2023-05-20]. Dostupné z: https://www.insz.eu/tvrdomery-prenosne/tvrdomer-shore-d-ish-sdm-insize/

[69] BAHRAMI, Mohsen, Juana ABENOJAR a Miguel ANGEL MARTINEZ. Comparative Characterization of Hot-Pressed Polyamide 11 and 12: Mechanical, Thermal and Durability Properties. *Polymers* [online]. 2021, **13**(20), 3553 [vid. 2023-05-21]. Dostupné z: doi:10.3390/polym13203553

[70] *Zkouška vrubové houževnatosti* [online]. 2021 [vid. 2023-01-03]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Zkou%C5%A1ka_vrubov%C3%A9_hou%C5%BEevnatosti&oldid=20357265

[71] ZOLFAGHARIAN, Ali, Mohammad Reza KHOSRAVANI a Akif KAYNAK. Fracture Resistance Analysis of 3D-Printed Polymers. *Polymers* [online]. 2020, **12**(2), 302 [vid. 2023-01-03]. Dostupné z: doi:10.3390/polym12020302

[72] *Weathering Tester - Q-SUN Xe-3 || Q-Lab* [online]. [vid. 2023-01-03]. Dostupné z: https://www.q-lab.com/en-gb/products/q-sun-xenon-arc-test-chambers/q-sun-xe-3

[73] *Solcast | Solar Api and Solar Weather Forecasting Tool* [online]. [vid. 2023-05-16]. Dostupné z: https://solcast.com.au

[74] PILLAY, Selvum, Uday K. VAIDYA a Gregg M. JANOWSKI. Effects of moisture and UV exposure on liquid molded carbon fabric reinforced nylon 6 composite laminates. *Composites Science and Technology* [online]. 2009, **69**(6), ONR - Dynamic Failure and Durability, 839–846 [vid. 2023-05-17]. ISSN 0266-3538. Dostupné z: doi:10.1016/j.compscitech.2008.03.021

[75] WAN, X. F., Y. L. WANG, F. G. ZHOU a Y. Z. WAN. Moisture absorption behavior of carbon fiber-reinforced monomer casting nylon composites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites* [online]. 2004, **23**(10), 1031–1040 [vid. 2023-05-17]. ISSN 0731-6844. Dostupné z: doi:10.1177/0731684404033961

[76] CALIGNANO, Flaviana, Massimo LORUSSO, Ignanio ROPPOLO a Paolo MINETOLA. Investigation of the Mechanical Properties of a Carbon Fibre-Reinforced Nylon Filament for 3D Printing. *Machines* [online]. 2020, **8**(3), 52 [vid. 2023-05-18]. Dostupné z: doi:10.3390/machines8030052

[77] SVETLANA, Terekhina, Tarasova TATIANA, Egorov SERGEI, Skornyakov INNOKENTIY, Guillaumat LAURENT a Hattali LAMINE. Flexural quasi-static and fatigue behaviours of fused filament deposited PA6 and PA12 polymers. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. 2021, **117**(7–8), 2041–2048 [vid. 2023-05-18]. ISSN 0268-3768. Dostupné z: doi:10.1007/s00170-021-07223-y

[78] PAPON, Easir Arafat a Anwarul HAQUE. Fracture toughness of additively manufactured carbon fiber reinforced composites. *Additive Manufacturing* [online]. 2019, **26**, 41–52 [vid. 2023-05-18]. ISSN 2214-8604. Dostupné z: doi:10.1016/j.addma.2018.12.010

[79] SZUST, Agnieszka a Grzegorz ADAMSKI. Using thermal annealing and salt remelting to increase tensile properties of 3D FDM prints. *Engineering Failure Analysis* [online]. 2022, **132**, 105932 [vid. 2022-10-26]. ISSN 1350-6307. Dostupné z: doi:10.1016/j.engfailanal.2021.105932

[80] FERREIRA, Isaac, Carolina MELO, Rui NETO, Margarida MACHADO, Jorge Lino ALVES a Sacha MOULD. Study of the annealing influence on the mechanical performance of PA12 and PA12 fibre reinforced FFF printed specimens. *Rapid Prototyping Journal* [online]. 2020, **26**(10), 1761–1770 [vid. 2023-05-21]. ISSN 1355-2546. Dostupné z: doi:10.1108/RPJ-10-2019-0278

[81] SHANMUGAM, Vigneshwaran, Oisik DAS, Karthik BABU, Uthayakumar MARIMUTHU, Arumugaprabu VEERASIMMAN, Deepak Joel JOHNSON, Rasoul Esmaeely NEISIANY, Mikael S. HEDENQVIST, Seeram RAMAKRISHNA a Filippo BERTO. Fatigue behaviour of FDM-3D printed polymers, polymeric composites and architected cellular materials. *International Journal of Fatigue* [online]. 2021, **143**, 106007 [vid. 2022-10-26]. ISSN 0142-1123. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijfatigue.2020.106007

[82] SV06 Plus 1 ks. *3DJake Česká republika* [online]. [vid. 2023-05-21]. Dostupné z: https://www.3djake.cz/sovol/sv06-plus

[83] S.R.O, Majkl3D-Technology. Bambu Lab X1C - Carbon - Majkl3D. *www.majkl3d.cz* [online]. [vid. 2023-05-21]. Dostupné z: https://www.majkl3d.cz/p/bambu-lab-x1c-carbon

[84] 3DWISER. BCN3D Epsilon W50 (2. generace) 3D tiskárna - 3Dwiser. *eshop.3dwiser.com* [online]. [vid. 2023-05-21]. Dostupné z: https://eshop.3dwiser.com/fff-fdm/bcn3d-epsilon-w50-gen-2/

[85] *Ceny vstřikování plastů a forem na plasty* [online]. [vid. 2023-05-21]. Dostupné z: http://www.plastove-vylisky-formy.cz/ceny-vyroba-forem-plasty

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratky:

ABS	Akrylonitrilbutadienstyren
ASA	Akrylonitril-styren-akryl
PET-G	Polyetylénterefталát-glykol
PA	Polyamid
PVC	Polyvinylchlorid
HIPS	High Impact Polystyrene
CPE	Kopolyester
TPU	Thermoplastic polyurethane
PEEK	Polyether-ether-keton
UV	Ultraviolet
FDM	Fused Deposition Modeling
FFF	Fused Filament Fabrication
SLA	Stereolithography Apparatus
SLS	Selective Laser Sintering
SLM	Selective Laser Melting
CAD	Computer Aided Design

Symboly:

σ_M	Pevnost v tahu
KCV	Vrubová houževnatost
σ	Směrodatná odchylka
D (X)	Rozptyl