



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

POKROČILÉ MATERIÁLY PRO FDM/FFF 3D TISK

ADVANCED MATERIALS FOR FDM/FFF 3D PRINT

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Michal Rygl

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Tomáš Koutecký, Ph.D.

BRNO 2020

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav konstruování
Student: **Michal Rygl**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Tomáš Koutecký, Ph.D.**
Akademický rok: 2019/20

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Pokročilé materiály pro FDM/FFF 3D tisk

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Nabídka materiálů používaných pro FDM/FFF tiskárny se neustále rozšiřuje. Mezi materiály, o které byla nabídka v posledních letech rozšířena, patří i materiály s výztužnými vlákny, nejčastěji skelnými nebo uhlíkovými. Tato vlákna se přidávají do jinak běžně používaných materiálů pro 3D tisk, jako jsou například PET–G nebo Nylon. Přidáním vláken by mělo dojít ke zlepšení mechanických vlastností, případně tisknutelnosti dílů, kde by mohly snižovat důsledky smrštění v průběhu tisku.

Typ práce: výzkumná

Cíle bakalářské práce:

Hlavním cílem práce je posoudit vliv výztužných vláken u materiálů PET–G, PA a CPE používaných u technologie FFF na mechanické vlastnosti a tisknutelnost dílů takto vyráběných v porovnání s materiály bez výztužných vláken.

Dílní cíle bakalářské práce:

- identifikace stěžejních parametrů ovlivňujících výsledné vlastnosti dílů,
- návrh vzorků pro výrobu a návrh experimentů,
- výroba vzorků a realizace experimentů,
- analýza získaných výsledků, jejich vyhodnocení a vyvození závěrů.

Požadované výstupy: průvodní zpráva.

Rozsah práce: cca 27 000 znaků (15 – 20 stran textu bez obrázků). Časový plán, struktura práce a šablona průvodní zprávy jsou závazné:

<http://ustavkonstruovani.cz/texty/bakalarske-studium-konceni/>

Seznam doporučené literatury:

GEBHARDT, Andreas a Jan-Steffen HÖTTER. Additive manufacturing: 3D printing for prototyping and manufacturing. Cincinnati: Hanser Publications, [2016]. ISBN 978-1-56990-582-1.

JIANG, Delin a Douglas E. SMITH. Anisotropic mechanical properties of oriented carbon fiber filled polymer composites produced with fused filament fabrication. Additive Manufacturing [online]. 2017, 18(December 2017), 84-94 [cit. 2019-10-25]. DOI: 10.1016/j.addma.2017.08.006. ISSN 22148604. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2214860417300015>

NING, Fuda, Weilong CONG, Jingjing QIU, Junhua WEI a Shiren WANG. Additive manufacturing of carbon fiber reinforced thermoplastic composites using fused deposition modeling. Composites Part B: Engineering [online]. 2015, 80(October 2015), 369-378 [cit. 2019-10-25]. DOI: 10.1016/j.compositesb.2015.06.013. ISSN 13598368. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1359836815003777>

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2019/20

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Předložená práce pojednává o problematice FDM/FFF 3D tisku se zaměřením na materiály s přidanými uhlíkovými vlákny. Cílem práce je experimentálně analyzovat vliv karbonového aditiva na tištěné dílce pomocí mechanických a termomechanických zkoušek. Testování vybraných materiálů prokázalo, že vliv karbonové příměsi se liší podle použitého základního materiálu. Například karbon v materiálu PET-G snížil rázovou houževnatost až o 64 %. Avšak uhlíkem naplněné CPE projevilo schopnost absorbovat rázovou energii až o 28,5 % vyšší. Rozdílný vliv uhlíku byl měřen u materiálu CPE při zkoušce tahem, kde při zatěžování vzorků za pokojové teploty došlo ke snížení meze pevnosti, avšak ke zvýšení modulu pružnosti. Absolutně pozitivní vliv karbonu byl měřen u všech pozorovaných materiálů při termomechanické zkoušce 3-bodovým ohybem, kdy uhlíkové verze filamentů dosahovaly lepších výsledků. Naměřená data přináší v oblasti výzkumu rozšíření možnosti porovnání výsledků s dalšími typy materiálů vhodných k 3D tisku. Z praktického hlediska lze výsledky testů použít také k samotné volbě materiálu při tisku modelů se specifickými podmínkami využití. Dalším praktickým využitím analyzovaných dat je využití výsledků tisknutelnosti pokročilých materiálů k tvorbě tiskových profilů pro další stolní 3D tiskárny typu FDM/FFF.

KLÍČOVÁ SLOVA

Aditivní technologie, FDM, 3D tisk, Delta tiskárna, Uhlíková vlákna, Termomechanické vlastnosti

ABSTRACT

The presented work deals with the issue of FDM / FFF 3D printing with a focus on materials with added carbon fiber. The aim of this work is to experimentally analyze the effect of carbon additive on printed parts using mechanical and thermomechanical tests. Testing of selected materials has shown that the effect of carbon additive varies according to the used base material. For example, carbon in PET-G has reduced impact strength by up to 64%. However, carbon filled CPE has demonstrated the ability to absorb impact energy up to by 28.5%. The different effect of carbon fiber was measured on the CPE material in a tensile test, where the yield strength was reduced during the stretching of the samples at room temperature, but the modulus of elasticity was increased. The absolutely positive effect of carbon was measured on all observed polymer filaments in the thermomechanical 3-point bending test, when the carbon versions of the materials achieved better results. The measured data brings an extension of the possibility of comparing the results with other types of materials suitable for 3D printing in the field of research. From a practical point of view the test results can be used for the actual choice of material when printing models has specific conditions of use. Another practical use of the analyzed data is the use of printable results of advanced materials for the creation of print profiles for other desktop 3D printers of the FDM/FFF type.

KEYWORDS

Additive manufacturing, FDM, 3D printing, Delta printer, Carbon fiber, Thermomechanical properties

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

RYGL, Michal. Pokročilé materiály pro FDM/FFF 3D tisk [online]. Brno, 2020 [cit. 2020-06-22]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/124904>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování. Vedoucí práce Ing. Tomáš Koutecký, PhD.

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Tomáši Kouteckému, PhD. za cenné rady, odborné vedení a profesionální přístup. Děkuji také Ing. Jiřímu Kľofáčovi, PhD. z firmy Fillamentum za poskytnutí cenných informací, konzultací a materiálů k testování. Velké díky patří i mé rodině, přátelům a kolegům za podporu během celého studia a vytvoření přátelského a produktivního prostředí.

PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE

Prohlašuji, že bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně, pod odborným vedením Ing. Tomáše Kouteckého, PhD. Současně prohlašuji, že všechny zdroje obrazových a textových informací, ze kterých jsem čerpal, jsou řádně citovány v seznamu použitých zdrojů.

.....

Podpis autora

OBSAH

1	ÚVOD	15
2	PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ	16
2.1	Aditivní výroba	16
2.1.1	Digitální data 3D modelu	16
2.1.2	Dělení 3D tisku podle technologie	17
2.2	Metody 3D tisku	18
2.2.1	Materiály na bázi fotopolymerů	18
2.2.2	Materiály na bázi práškových materiálů	20
2.2.3	Materiály na bázi tuhých materiálů	21
2.3	Metoda FDM	21
2.3.1	Druhy konstrukcí FDM tiskáren	22
2.4	Materiály určené pro FDM/FFF 3D tisk	26
2.4.1	PET / PET-G	27
2.4.2	CPE HG100	28
2.4.3	Nylon	29
2.5	Karbonová složka ve filamentech	30
2.5.1	Uhlíková vlákna	30
2.5.2	Postup výroby uhlíkových vláken	31
2.5.3	Vliv karbonových vláken na 3D tisk	34
2.5.4	Výsledky dosavadních studií	37
3	ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE	38
3.1	Analýza problému	38
3.2	Cíl práce	38
4	MATERIÁL A METODY	39
4.1	3D tiskárna	39
4.1.1	FDM/FFF Tiskárna	39
4.1.2	Tryska	40
4.1.3	Extruder	40
4.1.4	Podložka	41
4.1.5	Chlazení	42
4.1.6	Slicer	42
4.2	Testované materiály	43

Teplota trysky [°C]	44
Teplota podložky [°C]	44
Adhezní aplikátory	44
Rychlost tisku [mm/s]	44
Chlazení [%]	44
4.2.1 PET–G	45
4.2.2 PET–G CF Jet	45
4.2.3 CPE HG100	45
4.2.4 CPE CF112 Carbon	45
4.2.5 Nylon FX256	46
4.2.6 Nylon CF15 Carbon	46
4.3 Tvorba a optimalizace tiskových profilů	47
4.3.1 Stanovení ideální teploty tisku	48
4.3.2 Stanovení parametrů retrakcí	48
4.3.3 Kontrola kvality povrchů	49
4.3.4 Komplexní test tiskových parametrů	49
4.4 Mechanické a termomechanické zkoušky	50
4.4.1 Tahová zkouška ČSN EN ISO 527-1	50
4.4.2 Zkouška rázové a vrubové houževnatosti ČSN EN ISO 179-1	53
4.4.3 Stanovení teploty průhybu při zatížení	57
5 VÝSLEDKY	58
5.1 Testování tisknutelnosti	58
5.1.1 PET–G a PET–G CF Jet	59
5.1.2 CPE HG100 a CPE CF112	60
5.1.3 Nylon FX256 a Nylon CF15	61
5.2 Testování mechanických a termomechanických vlastností	63
5.2.1 Výsledky tahové zkoušky	63
5.2.2 Výsledky zkoušky rázové a vrubové houževnatosti	71
5.2.3 Výsledky z termomechanické zkoušky teploty průhybu	76
6 DISKUZE	78
7 ZÁVĚR	83
8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	85
9 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN	89
9.1 Seznam použitých zkratk	89
9.2 Seznam použitých veličin	90

10	SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ	91
11	SEZNAM TABULEK	94
12	SEZNAM PŘÍLOH	95

1 ÚVOD

Mezi moderní trendy na poli aditivních technologií bezesporu patří technologie FDM 3D tisku. S její rostoucí popularitou a dostupností roste i počet výrobců samotných 3D tiskáren a producentů plastových strun, ze kterých je model tištěn. Díky nízké pořizovací ceně stolních 3D tiskáren a přiblížení technologie laické veřejnosti tak vznikla velká komunita nadšených techniků využívající tyto výrobní stroje po celém světě.

Spolu s vývojem výroby tohoto typu postupuje i samotné navrhování součástí a jejich optimalizace. Tvorba modelů určená k následné výrobě probíhá dnes, již velice často, z velké části generováním pomocí specializovaných softwarů. Tento způsob navrhování je označován jako topologická optimalizace, resp. generativní navrhování, jejíž výsledkem je tvarově velice složitá součást, kterou je pomocí standartních konvenčních metod relativně složitě vyrobit. Důvodem využití těchto postupů je redukce váhy jednotlivých komponentů se zachováním mechanických vlastností. Zásadní je tato problematika v odvětvích jako je letectví, kosmonautika, energetika či automobilový průmysl. Snížení hmotnosti lze docílit i využitím kompozitních materiálů, jako je například kompozit s příměsí uhlíkových vláken, které mají nízkou hustotu a velmi vysokou mez pevnosti. Právě tato složka je přidávána do dnes již hojně využívaných materiálů v oboru FDM tisku, díky čemuž jsou vyvíjeny materiály, které by měly z tištěných dílců dělat plně funkční součásti využitelné ve výše zmíněných oborech.

Předložená práce se proto zabývá vlivem karbonového vlákna na tisknutelnost, mechanické a na termomechanické vlastnosti komerčních kompozitních materiálů s přidanými uhlíkovými vlákny. Po identifikaci stěžejních parametrů a provedení experimentů byly jednotlivé materiály porovnány s materiály základními (tedy bez přidaných aditiv). Výsledkem je výčet detailních parametrů tisku pro každý z materiálů, zanalyzované výsledky všech mechanických a termomechanických zkoušek a hodnocení vlivu karbonové příměsi.

2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

Trendem na poli aditivní výroby se za posledních několik let stal FDM/FFF 3D tisk, jehož popularita rok od roku rapidně roste. Je to způsobeno především zvýšením dostupnosti stolních 3D tiskáren, šířením povědomí o této technologii a rychlým rozvojem materiálů určených pro 3D tisk.

Pozadu nezůstává ani vývoj stolních 3D tiskáren. Tento výrobní stroj je specifické zařízení, které přetváří model z digitální podoby do podoby reálné pomocí postupného vrstvení stavebního materiálu. Použitými materiály jsou zejména plasty, elastomery, kovy ve formě prášku, ale i kompozity na bázi dřeva, vosku, karbonu či kevlaru [1].

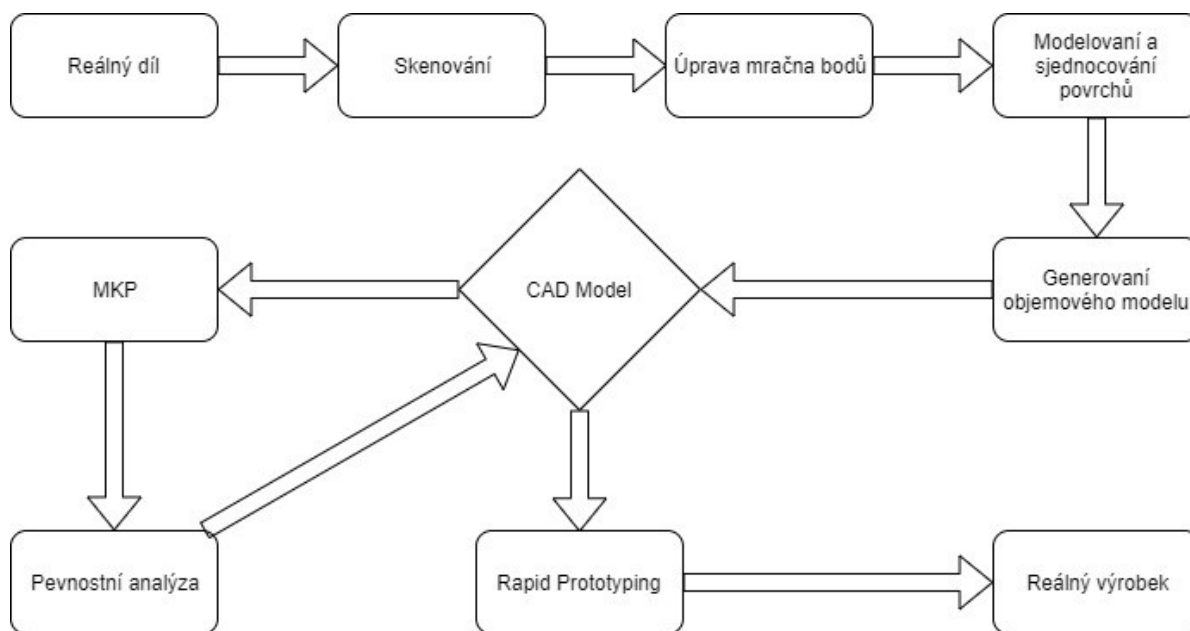
2.1 Aditivní výroba

Aditivní výroba (Additive Manufacturing, AM) spočívá v postupném nanášení tenkých vrstev roztaveného materiálu o konstantní (i proměnné) tloušťce na tiskovou podložku, resp. samotný model, a tím dochází ke stavbě výtisku. Opačným typem výroby je tzv. subtraktivní metoda, která je založena na postupném odebrání materiálu z polotovaru. Na tomto principu je založeno například CNC obrábění [2].

Díky rychlosti výroby pomocí AM dostal tento technologický proces název Rapid Prototyping (RP). Čas potřebný pro výrobu požadovaného modelu je výrazně snížen, čímž klesají i výrobní náklady. Další výhodou je i vyrobiteľnosť složitých tvarů, na které nejsou třeba specializované konvenční stroje, a to s dostatečnou mechanickou pevností. To je také důvodem poklesu dominance využívání 3D tisku pouze k prototypování v leteckém, automobilovém či vojenském průmyslu a zakomponování této technologie do průmyslu potravinářského, kosmického nebo obuvnického, ale i zdravotnictví, architektury, módy a designu [2].

2.1.1 Digitální data 3D modelu

Při využívání této technologie odpadá potřeba tvorby 2D výkresové dokumentace, protože základem pro výrobu tohoto typu je samotný 3D model [2]. Obor zabývající se problematikou zpětnou tvorbou 3D modelu a jeho optimalizací se nazývá Reverzní inženýrství. Jedná se o proces, kdy data naměřená například pomocí 3D skenu pomáhají zkrátit konstrukční a optimalizační část vývoje z týdnů na hodiny. S rostoucí tvarovou složitostí skenovaného modelu je však vyžadován vyšší výpočetní výkon počítače, který získaná mračna bodů (statisíce až milióny bodů z 3D skenu) zpracovává. Celý proces reverzního inženýrství má několik kroků (Obr. 2-1), které vedou k výrobě duplikátu či optimalizovaného dílu.



Obr. 2-1) Vývoj a proces reverzního inženýrství

Další metodou získání 3D dat je samotné modelování. Díl, či digitální dvojče výrobku je v zásadě tvořen v libovolném 3D CAD systému, podporující objemové či plošné modelování. Export z takového softwaru do další fáze výroby (tvorby strojových instrukcí) probíhá pomocí aproximace tvarových ploch na jednotlivé trojúhelníky (či méně používané polygony), kterých může model v konečném důsledku obsahovat desetitisíce. Výsledkem je binární výměnný soubor .STL, který v sobě nese informace o tvaru a rozměrech modelu, avšak informace o materiálu či hustotě soubor postrádá. Jedná se tedy o dutý model, který lze po exportu obtížně upravovat [3].

2.1.2 Dělení 3D tisku podle technologie

Rapid prototyping neboli 3D tisk lze charakterizovat jako postup výroby, při kterém je součást tvořena postupným nanášením jednotlivých vrstev materiálu za současného působení fyzikální či chemické interakce. Nejčastěji se jedná o působení tepla, vytvrzování UV světlem nebo nanášení lepidla. Na základě použitého principu lze dle normy ISO/ASTM 52900:2015 rozdělit technologie do 7 kategorií [4].

- Vat photopolymerization (Vytvrzování fotopolymeru) – principem této metody je použití fotopolymeru umístěného v nádrži, který je postupně vytvrzován světlem aktivovanou fotopolymerizací.
- Material extrusion (Vytlačování materiálu) – metoda, při které je materiál protlačován přes nahřátou trysku či otvor.
- Material jetting (Tryskání materiálu) – technologie, využívající selektivního ukládání kapek fotopolymeru či vosku, jakožto stavebního materiálu.

- Binder jetting (Tryskání plnidla) – tento způsob funguje na principu ukládání kapalného pojiva tak, aby pojilo materiály ve formě prášku.
- Powder bed fusion (Tavení prášku) – jedná se o metodu, kdy termální energie taví stavební materiál (prášek) na předem definované oblasti.
- Direct energy deposition (Přímé působení energie) – způsob, při němž je využíváno soustředění termální energie vzniklé pomocí laseru či plazmového oblouku k tavení materiálu při jeho ukládání.
- Sheet lamination (Laminování listů) – metoda fungující na principu pokládání jednotlivých listů na sebe s následným slepením každé vrstvy.

2.2 Metody 3D tisku

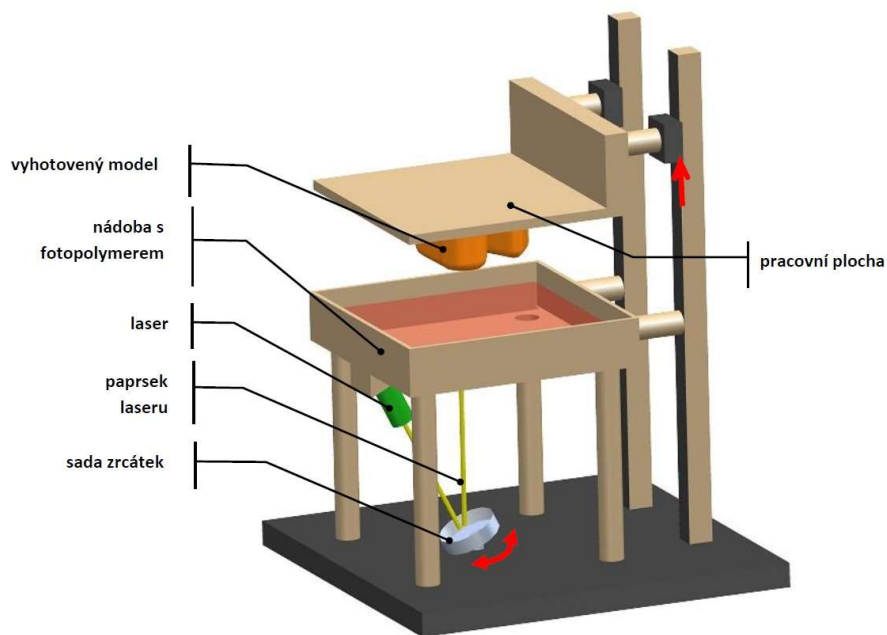
Rapid prototyping neboli 3D tisk má několik forem využívající například slinování kovových prášků laserem, tlačení speciálních kapslí či strun do rozeřtuté trysky či spojování jednotlivě nařezaných listů k sobě. Princip ale stále spočívá v postupném vrstvení materiálu. Aditivní výrobu pomocí 3D tisku tak můžeme rozdělit do skupin i podle fyzikálního stavu použitých stavebních materiálů.

2.2.1 Materiály na bázi fotopolymerů

Modely tvořené z fotopolymerů jsou většinou stavěny v nádobě s kapalnou pryskyřicí (resin), která je pod hladinou postupně vytvrzována zdrojem světla po jednotlivých vrstvách. Po dokončení jedné vrstvy následuje posun modelu ve směru osy Z (vertikální směr), srovnání hladiny epoxidové pryskyřice v nádobě a opakování procesu vytvrzování. Velikost jedné vrstvy se pohybuje mezi 0,01 až 0,15 mm. Výrobci rozlišují jednotlivé výrobní stroje podle typu laseru, metody skenování, zvedacího mechanismu a optické sestavy [2].

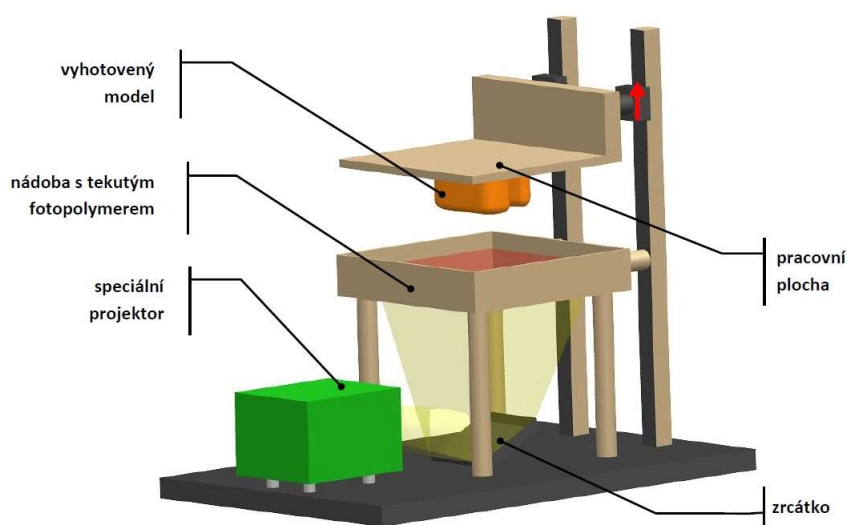
Mezi metody využívající tyto materiály patří:

- Stereolitografie (SLA) – spočívající ve vytvrzování jedné 2D vrstvy postupně pomocí plynového nebo pevnolátkového laseru. Podpory tisknutého modelu jsou tvořeny ze stejného materiálu, jako model samotný. Zařízení se skládá ze tří hlavních částí (pracovní komora, počítač s řídicím softwarem a opticko-laserový systém). (Obr. 2-2) Po dokončení tisku je potřeba následně model vytvrdit pod UV lampou, čímž je docílena požadovaná integrita povrchu, barva i tvrdost výtisku. Výhodou této metody je v jeho přesnosti, plynulosti průběhu procesu či širokém výběru materiálů. Naopak nevýhodou je toxicita stavebního materiálu a nutnost post-processingu [2] [3].



Obr. 2-2 Schéma principu fungování tiskárny SLA [5]

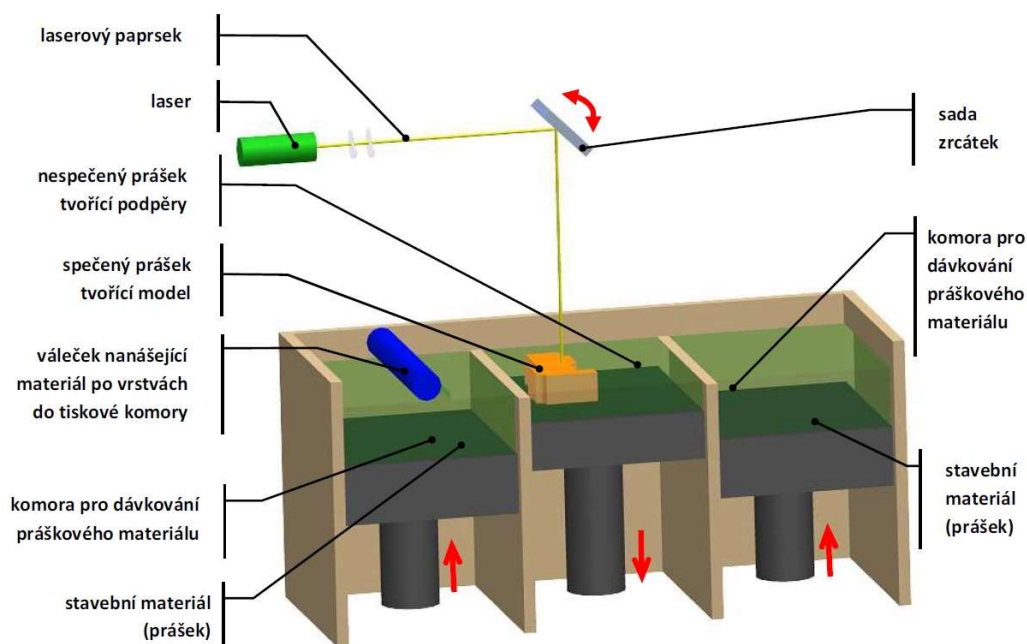
- Digital light processing (DLP) – patent této metody byl zapsán v roce 2012. Základní princip této metody je podobný jako tomu je u SLA, avšak je zde využito výkonného projektoru a UV lampy namísto laseru. (Obr. 2-3) Energie, vzniká UV zářením, vytvrzuje celou jednu vrstvu fotopolymeru najednou do požadovaného tvaru a výrazně tak zrychluje proces stavby modelu. Výhodou je i méně nákladná výroba, kde většinu výrobních nákladů na model tvoří cena fotopolymerická pryskyřice. Minimální velikost vrstvy se pohybuje okolo 0,01 mm, podobně jako u metody SLA. Mezi negativa lze zařadit nutnost vytvrzování po samotném tisku, což celý proces opět prodlužuje [2] [5].



Obr. 2-3) Metoda DLP [5]

2.2.2 Materiály na bázi práškových materiálů

3D tiskárny využívající materiály ve formě prášku fungují na principu spékání jednotlivých zrn o velikosti 20 až 100 μm výkonným CO_2 laserem. Mezi nejpoužívanější materiály patří plast, pryž, kov, keramika, a dokonce i speciální písek. Základním princip této metody spočívá ve slinování/tavení prášku na předem definovaném místě v tiskové komoře, která je rozdělena do tří sekcí (Obr. 2-4). Rameno či váleček nanášející stavební materiál po vrstvách připraví celý prostor stavěcí komory ke spékání či tavení prášku a laser zcelí jednotlivá zrna do požadovaného tvaru v rámci jedné vrstvy. Poté se model posune o výšku jedné vrstvy směrem dolů a proces se opakuje. Podpory v tomto případě nejsou nutné, protože je tvoří samotný neslinitý prášek. Na hotovou součást je naneseno několik centimetrů prášku, čímž je docíleno rovnoměrného chladnutí celého výtisku. Výsledkem je výrobek, který je však nutné podrobit dokončovacím operacím jako je například tryskání, broušení, leštění či dodatečné obrobení, avšak jen za předpokladu, že je to technologicky vyžadováno. Výhodou této metody je mechanická pevnost dílů, která může převyšovat pevnost naměřenou na odlitcích či výkovicích. Dále i velké možnosti nastavení parametrů tisku, pomocí kterých lze určit i pórovitost výtisku pro filtraci či chlazení modelu [2]. Mezi tyto technologie patří například metoda Selective Laser Sintering (SLS) nebo Direct Metal Laser Sintering (DMLS), dále pak Electron Beam Melting (EBM), Selective Laser Melting (SLM), Ultrasonic Additive Manufacturing (UAM) a další.



Obr. 2-4) Metoda SLS a DMLS [5]

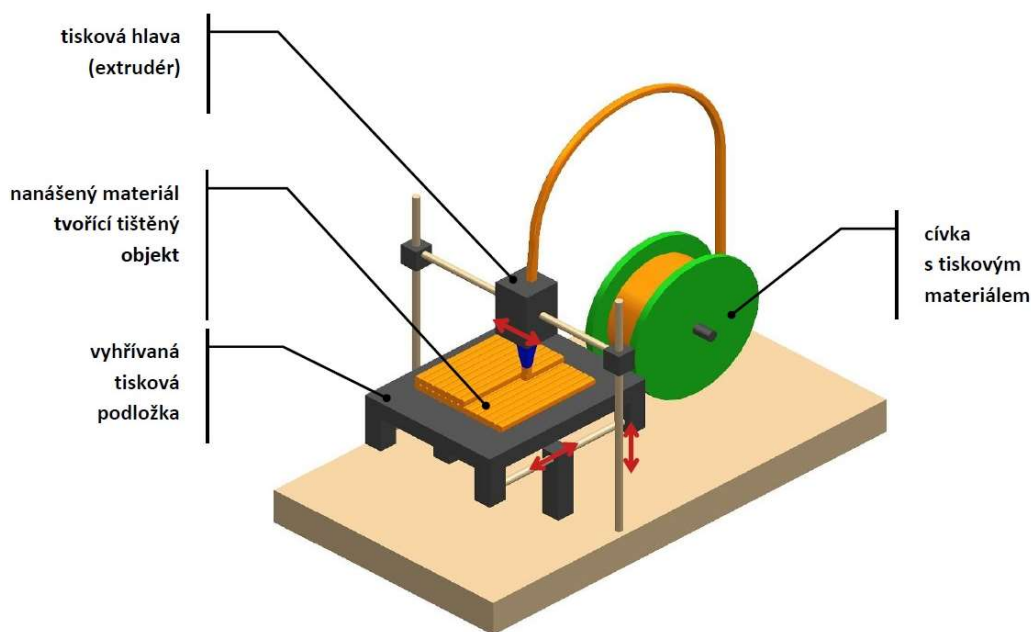
2.2.3 Materiály na bázi tuhých materiálů

Patrně nejrozšířenější skupinou jsou však metody založené na používání materiálu v tuhém stavu. Tato skupina je však nejpestřejší, co se metodiky týče. Ačkoli není tak detailní a přesná jako jsou metody založené na principu kapalně fáze, patří k nejoblíbenějším způsobům výroby prototypů i koncových produktů. Do skupiny využívající materiály v tuhém stavu patří například metoda Laminated Object Manufacturing (LOM), Multi Jet Modeling či Robocasting [2]. Nejvyžívanější a nejznámější je však metoda Fused Deposition Modeling neboli FDM, která byla využita v praktické části této práce.

2.3 Metoda FDM

FDM (Fused Deposition Modeling) je metoda 3D tisku patentovaná firmou Stratasys od roku 1989, což je v dnešní době jeden z největších výrobců a distributorů profesionálních průmyslových 3D tiskáren na světě. Po roce 2009, kdy vypršel patent na tuto technologii, si firma Stratasys nechala její název FDM registrovat jako ochrannou známku, což ale další výrobce 3D tiskáren neodradilo a své stroje prodávají pod označením FFF neboli Fused Filament Fabrication. Základ těchto tiskáren je postaven na komunitním projektu s názvem RepRap. Replicating Rapid Prototyper je veřejný projekt, sdružující globální komunitu lidí, zajímající se o moderní technologie, a tak vytváří a optimalizuje volně dostupné návrhy tiskáren ať už jejich konstrukci, tak i hardware a software [3] [6].

Principem této metody je natavování termoplastu ve formě drátu s kruhovým průřezem navinutým na cívce. Stále tuhý plast je pak extruderem (dávkočím) vtlačován do trysky, rozehráté na vyšší teplotu, než je teplota tavení jednotlivých materiálů, odkud je následně v předdefinovaném množství dávkován na vyhřívanou pracovní podložku. Po vytlačení materiálu z trysky je horký materiál chlazen okolním prostředím, či přidávkami ventilátory. Tento teplotní ráz je příčinou nemalé smrštivosti mnoha materiálů, proto je nutné po volbě filamentu chlazení optimalizovat. Pohyby tiskové hlavy se liší podle typu konstrukce výrobního stroje. Z uvedené vizualizace pohybů FDM tiskárny (Obr. 2-5) je zřejmé, že se tisková hlava v tomto případě pohybuje v rovině XZ, zatímco podložka jen v ose Y. Po nanesení jedné vrstvy se tisková hlava zvedne o výšku jedné vrstvy (0,1 až 0,3 mm) a celý proces se opakuje [2] [3].



Obr. 2-5) Princip FDM tiskárny [5]

Touto technologií je možné vyrábět nejen funkční prototypy, ale i modely určené pro výrobu forem či vizualizací při návrhu budov. Díky kinematice 3D tiskárny a způsobu nanášení vrstev je možné vyrobit téměř jakkoliv složitý tvar i funkční nerozebíratelné sestavy.

2.3.1 Druhy konstrukcí FDM tiskáren

Na základě použité kinematiky a konstrukce dělíme tiskárny do čtyř druhů. Každý z nich má specifické pohyby a využití, avšak nejčastěji jsou používány první 2.

Kartézská

Tento typ je jedním z nejznámějších typů konstrukce, a to i díky českému konstruktérovi Josefu Průšovi, jehož design tiskáren řady MK je dnes téměř ikonický (Obr. 2-6). Aktuálně jeho výroba vyprodukuje a odešle přes 6000 tiskáren měsíčně, čímž se firma Prusa Research a. s. stala nejrychleji rostoucí technologickou firmou ve střední Evropě s růstem 17118 % za 4 roky [7].

Kinematika pohybu zde spočívá v lineárním pohybu tiskové hlavy v rovině XZ a podložky ve směru Y nebo jak je to například u systému CoreXY, kde se tisková hlava pohybuje v rovině XY a vertikální posun zde vykonává podložka. Extruder je implementován přímo do tiskové hlavy, což přidává tiskárně na univerzálnosti, co se volby materiálu týče. Tisková podložka je zde vyhřívána a je výhradně čtvercového či obdélníkového tvaru.

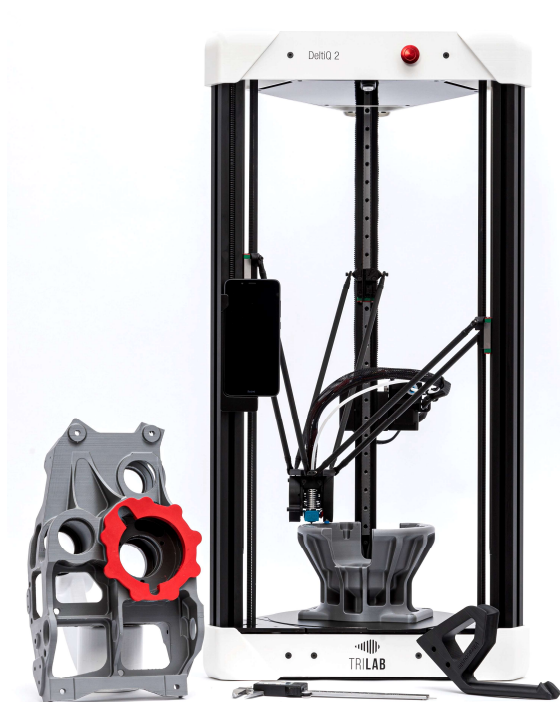


Obr. 2-6) Prusa i3 MK3S [7]

Delta

Tiskárny s delta kinematikou na první dojem zaujmou svou výškou. Tento typ konstrukce využívá třech staticky uložených věží po 120° , což dodává tiskárně dostatečnou tuhost a stabilitu. Díky složitosti kinematiky je vyžadována vysoká přesnost montáže a kalibrace. Veškeré pohyby zde vykonává tisková hlava, umístěná na třech ramenech, za pomoci trojice krokových motorků. Řízení všech 3 motorů zároveň je poměrně složité, proto je nutné použít speciální řídicí software. Vyhřívaná podložka kruhového tvaru je statická, díky čemuž při tisku nevzniká takové množství vibrací jako u předešlého typu.

Další výhodou konstrukce typu Delta je rychlost tisku, kterou umožňuje odlehčená tisková hlava o extrudovací motor umístěn na jedné z nosných věží, čímž je redukován moment setrvačnosti hybných komponent. Materiál je extruderem přiváděn do nahřáté trysky pomocí speciální trubičky tzv. „bowdenu“. To s sebou však nese nevýhodu v podobě zvýšení obtížnosti tisku flexibilních materiálů vyžadující „Direct extruder“ (extruder umístěn na tiskové hlavě). Ten se však dá nahradit sekundárním extruderem vyvinutým právě pro tyto účely. Konkrétní aplikace obou systémů je znázorněna na (Obr. 2-7). Tento extruder přenáší kroučící moment pomocí zkrutného drátu přímo do tiskové hlavy, vzniká však v motoru uloženým rovněž na rámové konstrukci [8].

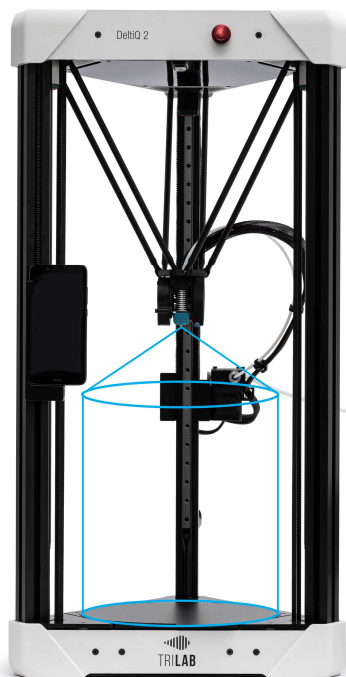


Obr. 2-7 a) TriLab DeltiQ2 s extruderem Titan



b) Trilab DeltiQ2 s Direct extruderem [8]

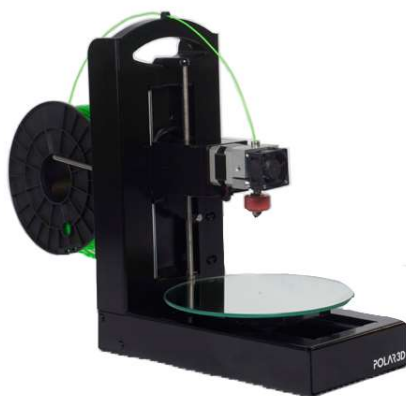
Velký tiskový prostor Delta tiskáren však omezuje samotná konstrukce, a to při tisku vysokých modelů. Tiskové limity jsou ve směru osy Z značně omezeny díky ramenům, které tiskovou hlavu podpírají. Důsledkem je tiskový prostor ve tvaru kužele, který tryska ve svých koncových pozicích opisuje. (Obr. 2-8) Ve spolupráci s firmou Trilab, předním českým výrobcem Delta tiskáren, je řešena i tato práce [3] [8].



Obr. 2-8) Tiskový prostor Delta tiskáren [8]

Polar

Firma Polar vyvinula velice netradiční konstrukci 3D tiskárny, využívající pro veškeré pohyby pouze 3 motory. Jeden jakožto extruder, druhý umístěný pod kruhovou pracovní podložkou, který ji neustále natáčí pod tryskou a třetí pohybující se pouze v ose Z. Výsledkem je jednodušší, a tak i ekonomicky méně nákladná tiskárna než ty výše zmíněné. (Obr. 2-9) Nevýhodou této konstrukce je však absence vyhřívání podložky, které není možné z důvodu neustálé rotace, a tak brzké „ukroucení“ napájecích kabelů. Díky tomu je úspěšnost tisku smrštivých materiálů relativně nízká [9].



Obr. 2-9) Tiskárna Polar3DScara [9]

Scara

Poslední typ konstrukce spadá spíše do okrajově využívané kategorie, avšak jeho princip může být také velice užitečný. Spočívá v pohybu dvou mechanických paží svírající tiskovou hlavu nebo jedno dvoukloubové rameno, čímž může být tiskový prostor výrazně větší. (Obr. 2-10) Pohyb ve svislém směru mohou vykonávat i ramena, preferovanější variantou je však ta, ve které se ve směru osy Z pohybuje podložka [9].

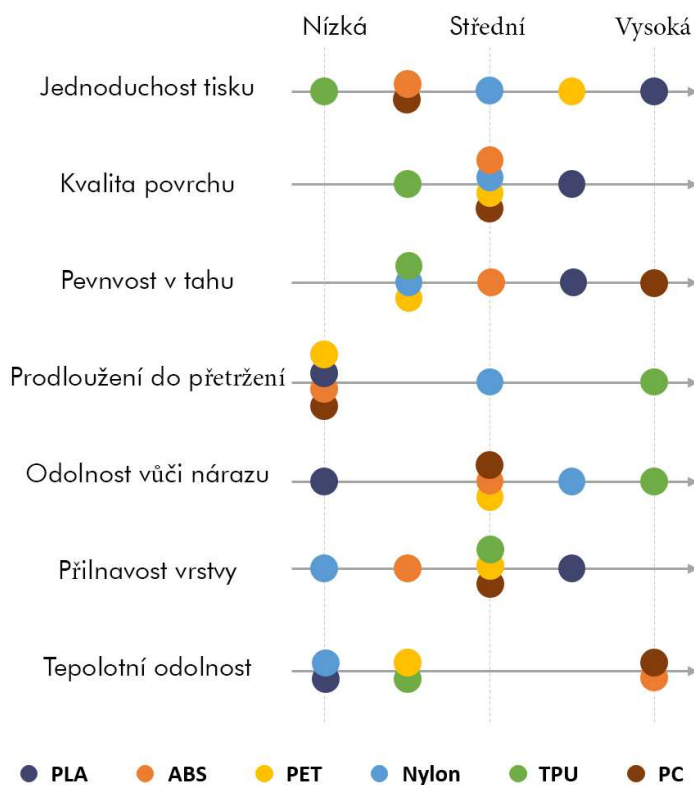


Obr. 2-10) Tiskárna s konstrukcí Scara [9]

2.4 Materiály určené pro FDM/FFF 3D tisk

Správná volba tiskové struny pro tisk na stolní FDM/FFF tiskárně je klíčovým faktorem ovlivňující tisknutelnost modelů, ale také mechanickou a termomechanickou odolnost či životnost samotného výtisku. Nejčastěji používaným materiálem je polylaktid (označovaný zkratkou PLA z anglického „polyactid acid“). Jedná se o nejedlý sacharid získávaný převážně z kukuřičného klasu v kombinaci s kyselinou polymléčnou. Tento materiál disponuje skvělou tisknutelností díky malé smrštivosti během tisku, vysokou tvrdostí či poměrně velkou pevností v tahu [10]. Tradiční ABS (Akrylonitrilbutadienstyren), hojně využívané pro technologii vstřikování plastů, překonává materiál PLA vyšší houževnatostí a tepelnou odolností, jak je patrné ze souhrnného porovnání vlastností běžně používaných materiálů (Obr. 2-11), avšak velká nevýhoda ABS je ve velké smrštivosti a produkci potenciálně nebezpečných látek během tisku [3].

Dalším používaným materiálem je termoplastický elastomer neboli TPE. Jedná se o pružný materiál, který se po deformaci obnoví do původního tvaru. Filament tohoto druhu je však nutné kvůli jeho elasticitě protlačovat do trysky skrze „direct extruder“, čímž komplikuje tisk při volbě tiskárny typu Delta. Dalšími typy materiálů jsou například HIPS (impakťový polystyren) nebo PVA (polyvinylalkohol), které jsou využívány pro tvorbu podpor. Zajímavostí materiálu PVA je, že je zcela rozpustný ve vodě, což je využíváno při tisku složitých geometrických tvarů, odkud by se klasické podpory velice obtížně vyjímaly [3] [10].

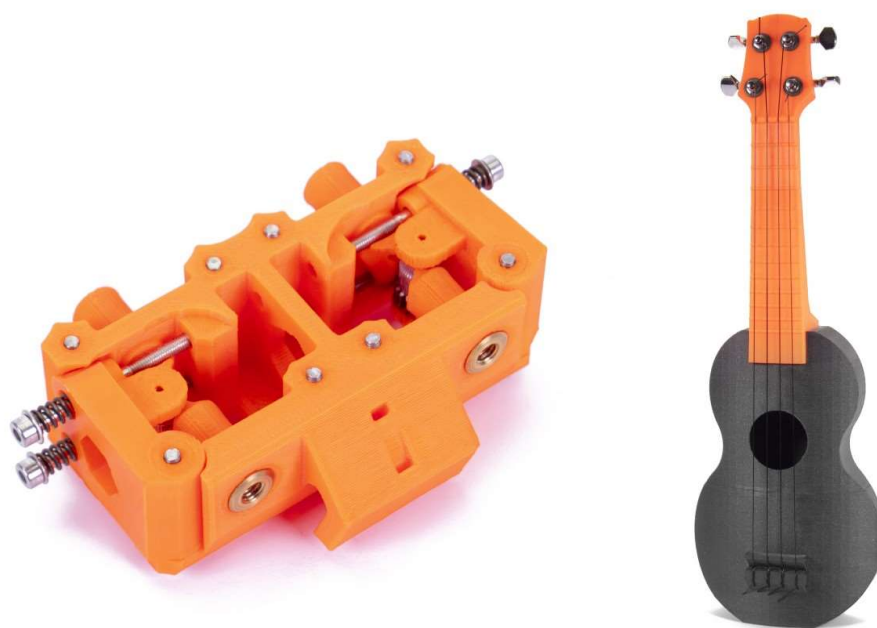


Obr. 2-11) Porovnání vlastností standardních materiálů [10]

V současné době se na poli moderních technologií 3D tisk objevuje značné množství nových materiálů, které nabízejí v oblasti aditivní výroby originální řešení napříč obory. Zvláště zajímavé jsou jejich kombinace, vytvářející velkou škálu možností využití 3D tisku. Jednou z nich je kombinace relativně snadno tisknutelných materiálů jako je PET-G nebo Nylon s uhlíkovými vlákny, přinášející vytisknutým modelům zajímavé mechanické vlastnosti.

2.4.1 PET / PET-G

Polyethyltereftalát neboli PET je jeden z nejpoužívanějších plastů na světě, co se výroby obalů týče. Vyrábí se z něj například lahve, jednorázové obaly, nádoby i textilní vlákna. Z důvodu větší křehkosti, a ne příliš optimální tisknutelnosti, byl vyvinut materiál založený na klasickém PET, avšak s přidáním modifikovaného glykolu, a to ve fázi polymerace. Molekulární struktura je nepravidelná a teplota skelného přechodu se pohybuje okolo 80 °C. Vláknem z tohoto termoplastu kombinuje mechanické vlastnosti materiálu ABS (odolnost proti vyšším i nižším teplotám, houževnatost) a tisknutelnost PLA, čímž je u uživatelů velice oblíbený. Výsledkem je vlákno, ze kterého lze tisknout plně funkční mechanické díly a sestavy, a to hned v několika různých vizuálních kombinacích. (Obr. 2-12) Na základě přidání aditiv výrobci PET-G produkují širokou paletu barev nejen neprůsvitných, ale i transparentních [11] [12] [13].



Obr. 2-12) Příklady vytištěných modelů z materiálu PET-G [13]

Adheze mezi samotnými vrstvami během tisku je velice dobrá a riziko zkroucení či výrazného smrštění je minimální. PET-G je na rozdíl od jiných materiálů odolnější vůči kyselinám a rozpouštědlům. Po samotném tisku je následně možné výtisk z tohoto materiálu tepelně dotvarovat a optimalizovat rozměrovou přesnost pro konkrétní aplikaci i s nepřesným modelem. Při použití tohoto materiálu pro účely prezentace či představení designu lze model vyleštit, a to jak mechanicky, tak například i ohnivým plamenem. Nevýhodou lesku je však velká náchylnost na poškrábání. Další nevýhodou je intolerance UV světla, díky které modely vystavené tomuto záření rychle měknou. Ekologicky je PET-G velice nenáročný materiál a je snadno recyklovatelný. Mezi přední české výrobce těchto materiálů patří firma Filament PM (spolupracující na této práci) či PrusaResearch a.s. [11] [12] [13] [14].

2.4.2 CPE HG100

Materiál CPE (co-polyester) je speciální modifikací materiálu PET (PET-G) na bázi kyseliny tereftalové. Tento filament disponuje výbornou houževnatostí, vyšší tvrdostí oproti původnímu PETG a vysokou odolností vůči chemikáliím a teplotám do 70 °C. Teplota skelného přechodu je přibližně 80 °C. Filament CPE HG100 vyroben českou firmou Fillamentum, rovněž spolupracující na této práci, byl dokonce schválen Úřadem pro kontrolu potravin a léčiv pro využívání v této oblasti. Díky působivým mechanickým vlastnostem je velice často využíván i pro tisk funkčních prototypů a mechanických součástí. Při tisku na rozdíl od materiálu ABS nedochází k uvolňování nepříjemného a zdraví škodlivého zápachu. Při tisku tenkých stěn je několik typů tohoto materiálu velice průhledných. Podobně jako materiál PET-G je i CPE 100% recyklovatelné. Nevýhodou tohoto materiálu může být v jeho citlivosti na vlhkost, proto je nutné uchovávat ho v uzavřených boxech společně s množstvím silikagelu. Výtisky z tohoto materiálu mají vysoce kvalitní povrch, dobrou adhezi jednotlivých vrstev a neměnnost barevného odstínu filamentu před a po tisku [15] [16] [17]. (Obr. 2-13)



Obr. 2-13) a) CPE HG100 Design pantu

b) Funkční mechanicky odolný čep se závitem a maticí [15]

2.4.3 Nylon

Nylon neboli Polyamid (PA) je nesmírně mechanicky odolný termoplast, využívaný v aditivní i subtraktivní výrobě. Je velice flexibilní, a to v tenkých, ale i středně tenkých vrstvách o tloušťce cca 10 mm. Polyamid má také velmi nízký koeficient tření a vysokou teplotu tání, díky čemuž se velice hodí k tisku funkčních dílů. Opomenout nelze ani ořezuvzdornost a vysokou adhezi i kohezi mezi vrstvami. Hygroskopicita neboli schopnost materiálu nasávat vlhkost okolí je bohužel u většiny nylonu velice vysoká, proto je skladování v uzavřené komoře zbavené vlhkosti podmínkou úspěšného tisku. Při tisku s vlhkým vláknem polyamidu dochází na výstupu trysky k prudkému vypaření nasáté vlhkosti, a tím k tvorbě nežádoucích dutin ve výtisku. Tato vlastnost je zásadní i pro adhezi první vrstvy tisku, proto je nutné před tiskem řádně odmastit tiskovou podložku a nanést na ní složky zvyšující adhezi jako lepidlo či 3DLac.

Tiskových strun založených na polyamidu je na trhu hned několik. Nejpoužívanější je Nylon 618, který má přirozenou bílou barvu a má velice působivou texturu povrchů. PA618 je při tisku netoxický a vytištěné modely mají dobrou mechanickou pevnost a ořezuvzdornost. Dalším velice používaným nylonem je PA6. Tento polyamid je velice odolný materiál vhodný k použití u extrémně robustních a těžkých dílů. Vlákná PA6 mají vysokou hustotu a díky tomu i výbornou pevnost v tahu. Díky své vysoké trvanlivosti je tento materiál široce využíván v automobilovém průmyslu. Mezi často tištěné modely patří například ozubená kola, ložiska či výztužné prvky. (Obr. 2-14) Všestrannost materiálu vede vývojáře filamentů k výrobě speciálních vláken složených například z aramidových či karbonových vláken dodávající materiálům vyšší tvrdost a mechanickou odolnost i v nízkých teplotách. Mezi hlavní české vývojáře a producenty tohoto druhu materiálu patří opět firma Fillamentum [18] [19] [20].



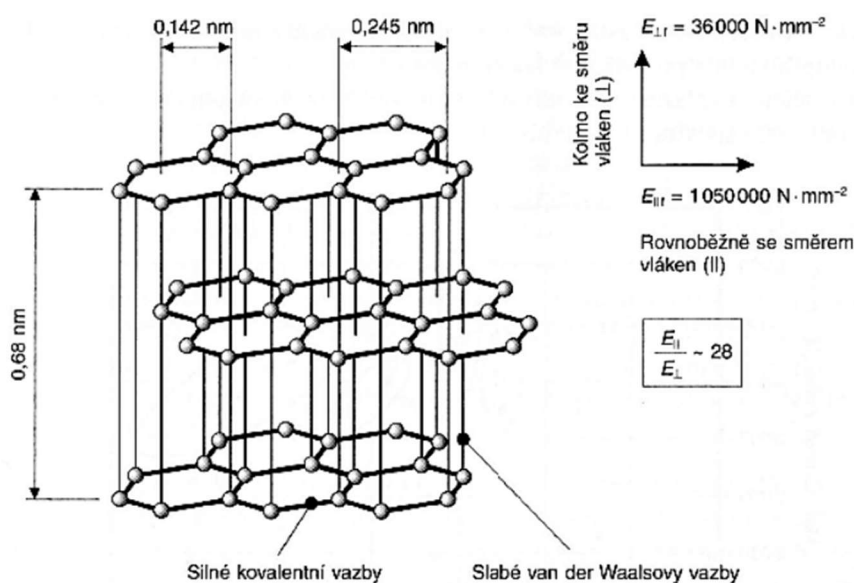
Obr. 2-14) Mechanicky namáhané díly z polyamidu [18]

2.5 Karbonová složka ve filamentech

Výrazné zvýšení pevnosti a tuhosti, chemická a tepelná odolnost, redukce hmotnosti, elektrická vodivost – toto všechno jsou atributy technologie 3D tisku z materiálů vyztužených uhlíkovými vlákny (Carbon Fiber Reinforced Plastic, CFRP). Toto aditivum lze přidat i do běžně využívaných materiálů určených pro 3D tisk, jako je například PLA, PET-G či ABS [21].

2.5.1 Uhlíková vlákna

Skvělé specifické vlastnosti uhlíkových vláken jsou výsledkem silné meziatomární vazby. Atomy uhlíku totiž vytváří velmi silné vazby v rovinách s hexagonální sítí, například grafit (Obr 2-15). V uhlíkových vláknech jsou grafénové vrstvy uspořádány paralelně s jejich osou, což vysvětluje skvělé mechanické vlastnosti v daném směru zatěžování. Naopak, protože je tento materiál anizotropický, odolnost vůči mechanickému namáhání v kolmém směru působení na osu vláken bude výrazně menší. Silná anizotropie se projevuje i na tepelné roztažnosti, která ve směru osy vláken dosahuje dokonce mírně záporných hodnot [22].

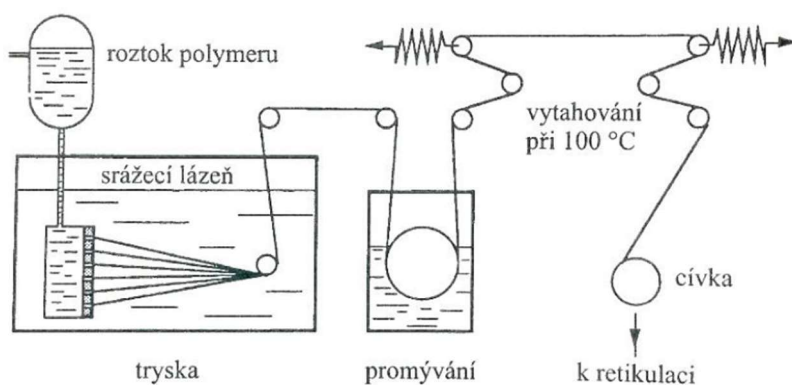


Obr. 2-15) Ideální grafitová struktura uhlíkového vlákna [22]

Vlákna z karbonu nemohou být vyrobena stejným způsobem jako ta kovová, skelná, či křemenná, protože uhlík netaje, není tažný a je dokonale odolný vůči rozpouštědlům. Výchozími surovinami pro výrobu karbonových vláken jsou 3 materiály. Celulóza, používaná převážně jako izolační složka pro vyšší teploty, polyakrylonitril (PAN) využíván jako základní stavební vlákno, a smola na bázi kamenouhelného dehtu nebo dehtů získaných například destilací ropy [22] [23].

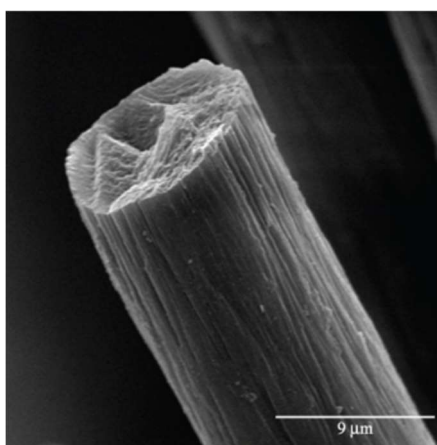
2.5.2 Postup výroby uhlíkových vláken

První operací výroby uhlíkových vláken je příprava prekurzoru. V této operaci dochází k úpravě výchozího materiálu buď tavným zvlákňováním nebo zvlákňováním z roztoku. Jedním z příkladů je tzv. proces spřádání (Obr. 2-16). Výchozí roztok polymeru je nejprve vtlačěn do trysky, která může být složena z 1 000 až 300 000 otvorů o průměru několika desetin milimetru. Jednotlivá vlákna vznikají při průchodu srážecí lázni nebo v proudu vzduchu o pokojové teplotě. Po procesu promývání je následně vlákno protahováno v atmosféře vodní páry, což vede k dosažení maximální orientace lamel ve směru osy vlákna. Získané nitě jsou složeny z 3 000 až 12 000 vláken o průměru okolo deseti mikrometrů a následně jsou navinuty na cívky, odkud putují k dalšímu procesu [23] [24].



Obr. 2-16) Schéma procesu spřádání [23]

Dalším krokem je stabilizace, respektive retikulace. Při této operaci je prekurzor převeden na vlákno s termálně stabilní strukturou, které lze následně karbonizovat s vysokou výnosností uhlíku bez poškození vlákna. Proces probíhá přibližně při teplotách 200–450 °C, kdy v jeho průběhu dojde k transformaci atomové struktury vlákna. Jakmile je exotermní reakce ukončena, vlákno se stává netavitelným a po přibližně 2 hodinách stabilizovaným. Dostane typickou černou barvu a podobá se vláknu textilnímu. (Obr. 2-17) Protože odolá přímému kontaktu s plamenem, je možné materiál využít i jako náhradu za azbest [23] [24].



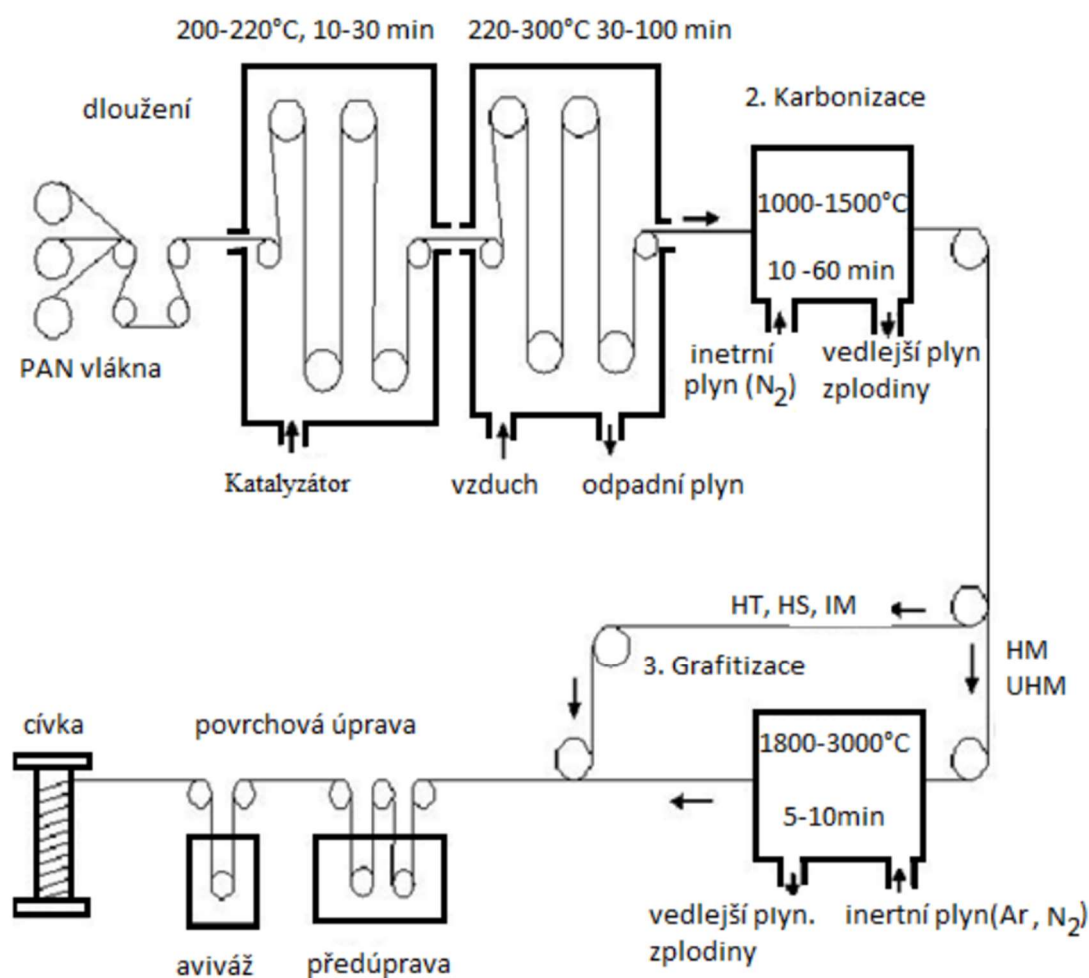
Obr. 2-17) Snímek komerčního zoxidovaného vlákna [25]

Operací převádějící prekurzor na uhlíkové vlákno je karbonizace, při které se vlivem vysoké teploty a rozkmitání neuhlíkových atomů většina prvků odštěpí, a zbyde vlákno o přibližném 90% obsahu uhlíku. Tento proces je prováděn v inertní atmosféře při teplotách 1 000 až 1 400 °C. Pro získání vláken s vysokou pevností v tahu je teplota 1 400 °C hraniční, protože při jejím překonání už se odolnost dále nezvyšuje [23] [24].

Pokud je uhlík dále zahříván, dochází ke tzv. grafitizaci. Důsledek tohoto procesu je kýžené zlepšení modulu pružnosti v tahu. Při teplotě mezi 2 000–3 000 °C po dobu až 30 minut je grafitizace ukončena, a je tak docíleno pevnostního maxima [22] [23].

Posledním krokem je povrchová úprava, jejíž cílem je zvýšení adheze povrchu vláken a docílení tak lepších výsledků při kombinování uhlíkových vláken s ostatními materiály jako je například sklo, pryskyřice či řada polymerů [23].

Celý proces výroby je shrnut na Obr. 2-18, kde jsou zobrazeny i použité inertní plyny či konkrétní teploty jednotlivých procesů.

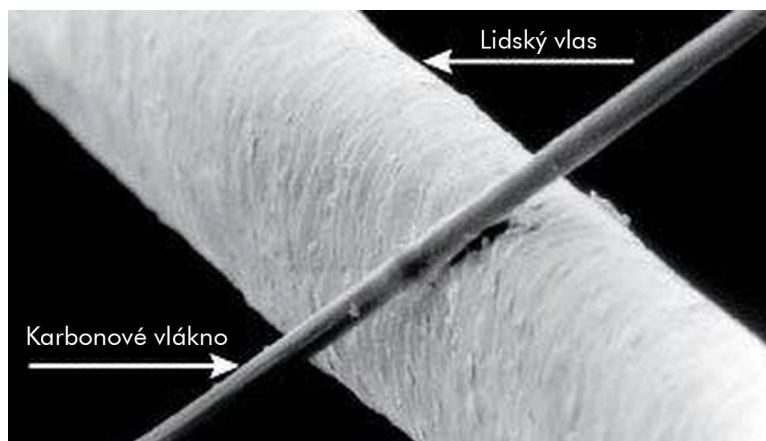


Obr. 2-18) Schéma výroby uhlíkových PAN-vláken [22]

HT – standartní, IM – středně-, HM – vysoko-, UHM – ultravysokomodulová vlákna

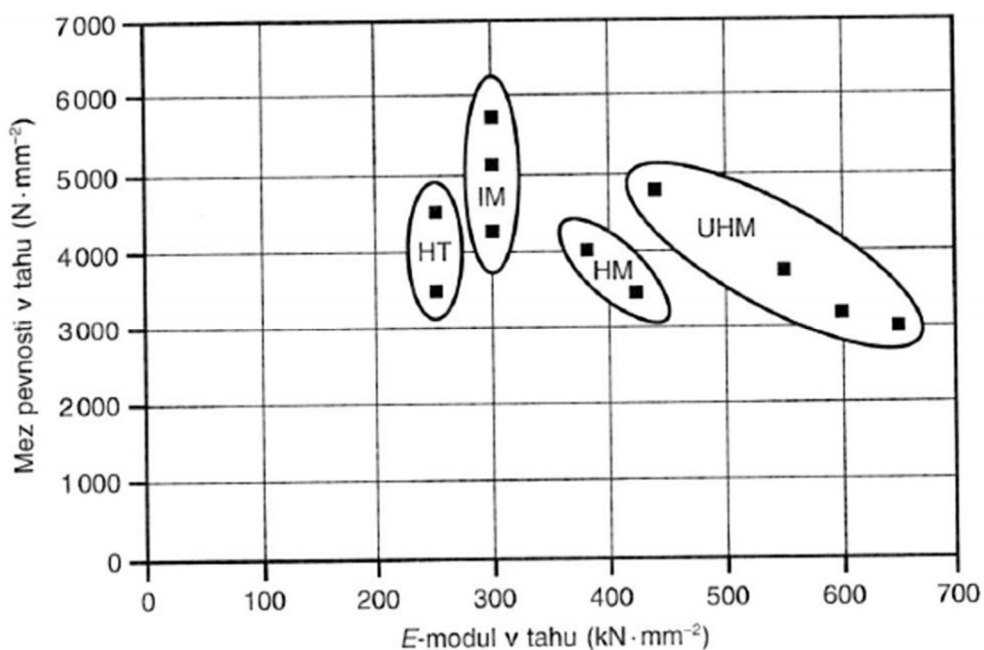
Sekundárním produktem výroby jsou i uhlíkové tkaniny, plsti a izotropní vlákna, které mají průměrné mechanické vlastnosti, avšak jejich využití je taktéž velice rozmanité [22].

Primárním produktem výroby jsou zmíněná uhlíková vlákna (Obr. 2-19) s vysokými mechanickými parametry. Jejich mechanická odolnost dosahuje lepších výsledků než nejkvalitnější oceli, přičemž jejich hustota je přibližně čtyřikrát nižší. Hlavními výhodami těchto tuhých a odolných vláken je vysoký modul pružnosti a mez pevnosti v tahu. Charakteristický je i vysoký stupeň anizotropie, tedy závislost na orientaci vláken [23].



Obr. 2-19) Porovnání karbonového vlákna s lidským vlasem [25]

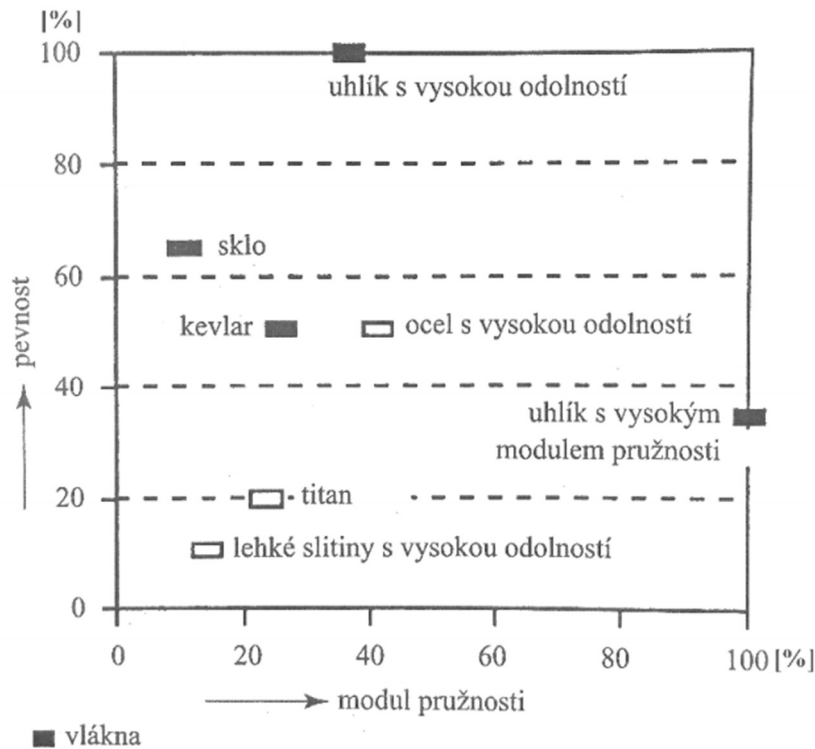
Jednotlivé druhy uhlíkových vláken lze rozdělit podle jejich mechanických parametrů, konkrétně podle meze pevnosti v tahu a E-modulu v tahu. Srovnání vysokopevnostních a vysokomodulových uhlíkových vláken je znázorněno na (Obr. 2-20).



Obr. 2-20) Srovnání uhlíkových vláken dle mechanických vlastností bezprostředně po výrobě [22]

HT – standartní, IM – středně-, HM – vysoko-, UHM – ultravysokomodulová vlákna

Na Obr. 2-21 je zaznamenána pevnost uhlíkových vláken v závislosti na modulu pružnosti v porovnání s materiály disponujícími podobnými mechanickými vlastnostmi. Hodnota 100 je přiřazena uhlíkovým vláknům jakožto hlavnímu prvku vizualizace a další materiály podobného charakteru byly umístěny s relativní hodnotou. Výchozím bodem grafu je pozice o hodnotách 100 %, odpovídající 5 000 MPa jako mez pevnosti a 500 GPa jako modulu pružnosti materiálu [23].



Obr. 2-21) Srovnání mechanických vlastností nejpoužívanějších materiálů [23]

Z vizualizace je patrné, že karbonová vlákna s vysokou odolností jsou například 5x pevnější a mají přibližně 2x větší modul pružnosti než titan, nebo dokonce až 2x pevnější než vysokopevnostní oceli [23].

2.5.3 Vliv karbonových vláken na 3D tisk

FDM tisk kompozitních materiálů s příměsí karbonových vláken disponuje širokou škálou využití a je součástí mnoha oborů. Vojenský, automobilový, letecký i kosmický průmysl, ale i robotika či energetika – zde je profesionální 3D tisk karbonových vláken využit. Extrémně tenká karbonová vlákna o průměru 5 až 10 mikrometrů dodávají vytištěným modelům vyšší poměr pevnosti k hmotnosti než téměř jakýkoliv jiný materiál určený pro tyto účely. To znamená, že modely vytištěné z tohoto materiálu mohou mít velmi vysokou pevnost v tahu jako například ocel, avšak hustota, a s tím spjatá hmotnost, bude podobná jako u běžných polymerů [21].

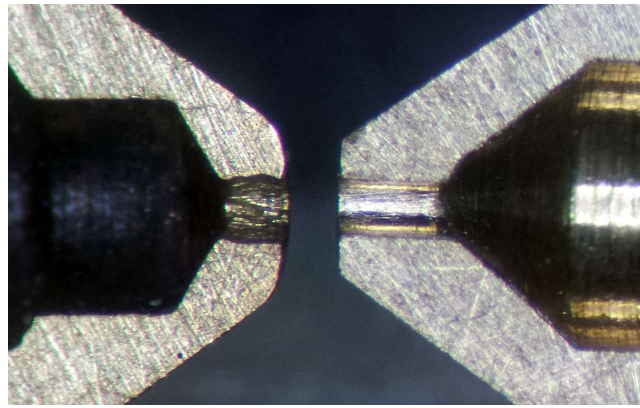
Uhlíková vlákna jsou použita jako vysoce kvalitní aditivum do série nejpoužívanějších materiálů jako je PLA, ABS, PET-G, CPE nebo Nylon z důvodu dostupnosti a ověřené tisknutelnosti. Vývojáři polymerů určených k 3D tisku si od přidání této složky slibují velké množství benefitů. Uhlíková vlákna, tvořící přibližně 20 % objemu filamentu, dodávají tak modelům mimo velice zajímavého a matného vzhledu (Obr. 2-22) i více než dvojnásobné zvýšení rázové houževnatosti [26] [27].



Obr. 2-22) Vytisknuté modely z běžně používaných materiálů s příměsí uhlíkových vláken [27] [28]

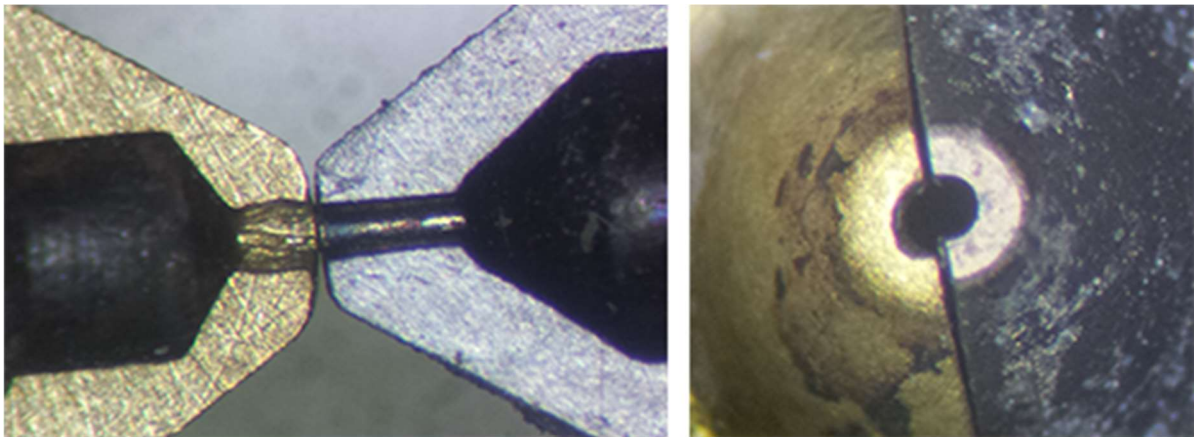
Mezi další výhody, které aditivum přináší, patří i snížení křehkosti, a to i při teplotách okolo $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Stejně tak i zvýšení otěruvzdornosti, což dělá z filamentu vhodného kandidáta při použití na funkční prototypy nebo výrobu ozubených kol. V případě kombinace s polyamidem snižuje toto aditivum hygroskopicitu materiálu, a tím snižuje nároky na jeho skladování. Ovšem i v tomto případě výrobci doporučují filament skladovat s látkami pohlcující vlhkost jako je například silikagel [26] [27].

Díky finančním nákladům na výrobu uhlíkových vláken se zákonitě musí zvýšit i cena filamentu, a to až 3x v porovnání se stejným materiálem bez aditiva. Produkce s použitím tohoto materiálu s sebou nese i další výdaje spojené s provozem. Roztavené vlákno je stejně jako další materiály s přidanými aditivy podobného charakteru (bronz, dřevěné piliny, ocel ve formě prášku) vysoce abrazivní. Při průchodu rozehrátou mosaznou tryskou ji po relativně krátké době dokáže opotřebit natolik, že není schopna dále plnit svoji funkci. Touto problematikou se zabírala Anglická firma E3D, vyrábějící Hotendy FDM tiskáren. Jejich studie uvádí, že po protlačení pouhých 250 g abrazivního materiálu dojde k rapidnímu obroušení trysky [26] [27] [28]. (Obr.2-23)



Obr. 2-23) Porovnání opotřebované trysky (vlevo) a nepoužité trysky (vpravo) [30]

Jak je z obrázku patrné, obroušená tryska by při dalším použití nenanášela konzistentní vrstvu materiálu a přesnost tisku by tak byla nižší. Řešením tohoto problému je použití trysky z jiného materiálu jako je například tvrzená ocel. Jak lze na Obr. 2-24 vidět, i po krátkém používání je tryska z tvrzené ocele výrazně méně opotřebena, a proto je v této aplikaci mnohem využívanější [28] [29].



Obr. 2-24) Srovnání mosazné trysky (vlevo) a trysky z tvrzené ocele (vpravo) po protlačení 250 g abrazivního materiálu [29]

Další velmi kvalitní tryskou je relativně nově představená tryska od Švédské firmy 3DVerkstan. (Obr. 2-25) Tryska The Olsson Ruby je díky rubínovému hrotu vysoce odolná vůči otěru, avšak její tělo je sestaveno tak, aby si tryska zachovala vynikající tepelnou vodivost [30].



Obr. 2-25) Rubínová tryska The Olsson Ruby společnosti 3DVerkstan [31]

2.5.4 Výsledky dosavadních studií

Testováním mechanických vlastností vytištěných modelů se zabírala řada odborných prací a výzkumů. Ovšem studií popisující porovnání materiálů s přidanými uhlíkovými vlákny a materiálem bez tohoto aditiva příliš mnoho není. Pro rozšíření výzkumu se autor inspiroval poznatky M. Ajay Kumara, který se se svým týmem zabýval vlivem nastavení parametrů tisku při použití materiálu PET–G s uhlíkovými vlákny [31]. Vědecký tým experimentálně měřil mez pevnosti v tahu, pevnost v ohybu a tvrdost podle Brinella. Veškeré testy byly prováděny podle norem ASTM, takže jejich výsledky by mohly sloužit pouze pro přibližnému porovnání s výsledky podle norem ISO. Výrazné rozdíly by nastaly u plastů, které nemají žádnou nebo velmi malou lineární oblast. Avšak díky nutné redukci testovaných materiálů na tahovou zkoušku nebylo možné tyto výsledky porovnat ani přibližně, protože materiál PET–G testován nebyl.

Ve výzkumu amerického vědeckého týmu z roku 2015 [32], kde byly pozorovány různé hmotnostní poměry uhlíkových vláken a jejich vliv na mechanické vlastnosti, je uvedeno, jak se Youngův modul a celková pevnost v tahu se zvyšujícím se hmotnostním poměrem uhlíkových vláken mění. Testován byl materiál ABS s přidanými 0 % hmotnosti uhlíku, dále 3 %, 5 %, 7,5 %, 10 % a nakonec 15 % hmotnosti karbonových vláken v původním materiálu. Maximální střední hodnotu pevnosti v tahu měl vzorek s 5 % karbonu a největší střední hodnota Youngova modulu byla naměřena na vzorku se 7,5 % aditiva.

Nejen výzkum zabývající se porovnáváním různých aditiv přidaných do materiálu PLA [33], ale i řada dalších uvádí, že nejpevnějším testovaným vzorkem v tahu s uhlíkovými vlákny, co se orientace „na plocho“ týče, byl výtisk s vyplňováním od 0° do 90° (tzn. v podélném směru osy vzorku). Avšak v některých případech tomu bylo při orientace -45° až +45°. Tento výsledek je tedy třeba experimentálně ověřit, protože minoritní z výsledků je pro klasický 3D tisk výrazně více využíván.

Dalším z nastudovaných výzkumů vlivu uhlíkových vláken v komerčně dostupných materiálech byla práce z roku 2019 vydaná na technologickém institutu de Desarrollo Regional ve Španělsku. Tým vědců zkoumal vlastnosti karbonem vyztuženého filamentu na bázi nylonu například ve zkoušce tahem či zkoušce rázové houževnatosti typu Charpy podle evropské normy ISO [34].

Z důvodu nízké míry zpracování výzkumů tohoto tématu budou výsledky mechanických zkoušek naměřené v této práci porovnány s daty, které uvádí výrobci filamentů ve svých technických listech jednotlivých materiálů (viz příloha 1-6). Další porovnání výsledků bude případně provedeno s výše zmíněnými studiemi vědeckých týmů, pokud by bylo srovnání relevantní.

3 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

3.1 Analýza problému

Dosavadní výzkum vlivu uhlíkových vláken přidaných do filamentů pro FDM tisk není příliš detailní, a proto v této práci hodlá autor výzkum rozšířit a obohatit o další druhy materiálu [31] [32] [33] [34]. Konkrétní vlivy karbonu budou experimentálně zkoumány se zaměřením na samotnou tisknutelnost vzorků, mechanické vlastnosti výtisků a v poslední řadě budou pozorovány vlivy uhlíku na termomechanické vlastnosti, které jsou pro průmyslové použití těchto materiálů zásadní.

Nejprve bude nutné vytvořit tiskové profily pro každý jednotlivý materiál, při jejichž optimalizaci bude zkoumána tisknutelnost. Protože FDM tisk hygroskopických materiálů může být problematický, bude třeba zajistit i prvky zvyšující adhezi pro úspěšnou výrobu vzorků.

Po samotné výrobě budou navržené zkušební vzorky podrobeny zkouškám podle normy ISO, a to konkrétně tahové zkoušce za pokojové teploty, avšak i za zvýšených teplot. Dále budou vzorky čelit zkoušce rázové houževnatosti, resp. vrubové houževnatosti a zkoušce stanovení teploty průhybu se statickým zatížením 3-bodovým ohybem.

3.2 Cíl práce

Primárním cílem práce je porovnat tisknutelnost pokročilých materiálů a stanovit jejich základní mechanické vlastnosti pomocí experimentů. Zkoumány budou i teplotní vlivy spojené s mechanickým namáháním, které blíže simulují použití v praxi.

Díličí cíle

- zajištění materiálu od jednotlivých výrobců
- volba speciální trysky
- stanovení tiskových parametrů ovlivňující vlastnosti výtisků
- tvorba tiskových profilů pro vybranou tiskárnu
- návrh vzorků společně s odpovídajícími experimenty
- výroba zkušebních modelů a realizace experimentů
- analýza získaných výsledků s následným vyvozením závěru

4 MATERIÁL A METODY

4.1 3D tiskárna

4.1.1 FDM/FFF Tiskárna

Zvolenou stolní 3D tiskárnou pro účely výroby testovacích vzorku je tiskárna TriLab DeltiQ 2. Jedná se o profesionální 3D tiskárnu mladé, ale rychle rostoucí, brněnské firmy TriLab s.r.o. Představena byla v září 2019 na TCT show v anglickém Birminghamu. Jak je z Obr. 4-1 patrné, jedná se o tiskárnu typu Delta. Robustní konstrukce a výkonný hardware zajišťují vysokou přesnost tisku. Je vybavena technologií splňující parametry Průmyslu 4.0, a je tedy plně ovladatelná vzdáleně.



Obr. 4-1) Tiskárna DeltiQ2 značky TriLab [8]

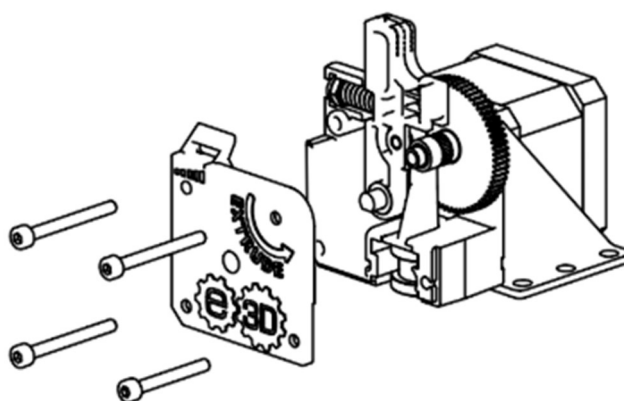
DeltiQ 2 je tiskárnou otevřenou, tudíž teplo, generující nahřátá tryska a tisková podložka, v tiskovém prostoru necirkuluje, ale ihned odchází mimo ni. Tudíž materiály vyžadující konstantní teplotu prostředí o vyšší než pokojové teplotě, se vlivem smrštivosti materiálu krouží a dochází v extrémních případech k deformaci samotného modelu.

4.1.2 Tryska

Z důvodu vysokého opotřebení trysky během tisku materiálu s uhlíkovým vláknem vlivem abraze je nutné zvolit takovou trysku, která bude vykazovat opotřebení minimální. Z výše uvedených průzkumu a studií vyplývá, že ideálním řešením je použití trysky z tvrzené oceli, či trysku s rubínovým hrotem. Z důvodu minimalizace vlivu opotřebení trysky byla pro tisk veškerých modelů zvolena tryska The Olsson Ruby s rubínovým hrotem od společnosti 3DVerkstan. Při prvotní kalibraci je nutné dbát na opatrnost, aby tryska nenarazila do podložky, což by mohlo poškodit trysku i podložku samotnou.

4.1.3 Extruder

Součástí tiskárny DeltiQ 2 je kvalitní extruder Titan od firmy E3D konstrukčně zakomponován ve stylu bowden (extrudovací motor se nachází mimo tiskovou hlavu). Fotografie i montážní schéma lze vidět na Obr. 4-2 a) respektive b). Extruder je převodován poměrem 3:1, čímž nabývá řady výhod. Při jeho využití je zapotřebí extrudovací motor s nižším kroučícím motorem, a díky tomu je tak docíleno snížení celkové hmotnosti a zvýšení kompaktnosti. Další výhodou je i potenciálně velký kroučící moment, který dovoluje extrudovat filament o průměru nejen 1,75 mm, ale i 2,9 mm s nutností minimálních úprav [8] [35].



Obr. 4-2) a) Titan extruder společnosti E3D

b) Motor s montážním schématem extruderu Titan [35]

V případě využití tohoto extruderu v bowdenovém zapojení lze dosáhnout vysokého rozlišení pohybu struny. To má za důsledek eliminaci „pulzování“ toku materiálu oproti řešení Direct drive, kdy jednotlivé pulzy způsobují zvlnění zejména prvních vrstev tisku [35].

4.1.4 Podložka

Originální podložky nesoucí obchodní název TriLab PrintPad poskytují vysokou adhezi většiny materiálů, což je pro tisk z polymeru s vysokou smrštitivostí nezbytné. Základem je ocelový plát magneticky uchycený k rámu tiskárny, potažený speciální PEI fólií (termoplast vyrobený z polyetherimidových vláken nesoucí název Ultem). Podložka je tak snadno odnímatelná a pružná, díky čemuž je oddělování modelu od podložky velice snadné [8].

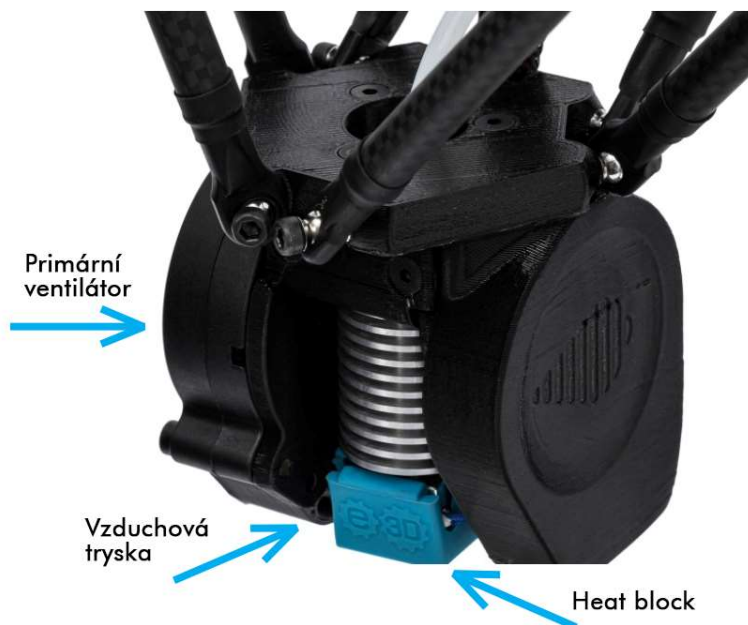


Obr. 4-3) Tisková podložka Trilab PrintPad [8]

Za účelem zvýšení adheze lze použít i podložka se zrnitým práškovým povrchem, díky kterému odpadá nutnost nanášení dalších separačních vrstev. Povrchová vrstva zrnitého PrintPadu je vyrobena ze stejného materiálu jako výše uvedená, avšak liší se technologií výroby. Podložka je výrazně odolnější vůči poškrábání a výtiskům navíc dodává originální vzhled v podobě slité první vrstvy [8] [36].

4.1.5 Chlazení

Efektivní chlazení je nezbytné pro úspěšný 3D tisk mnoha dostupných materiálů. Na Obr. 4-4 je zobrazena tisková hlava tiskárny DeltiQ 2, kde lze v levé části snímku vidět kryt ventilátoru. Vzduchovou tryskou vyrobenou pomocí 3D tisku (Obr. 4-4 v dolní části) proudí vzduch o pokojové teplotě přímo do oblasti trysky, díky čemuž je výtisk chlazen ihned po nanesení vrstvy.



Obr. 4-4) Tisková hlava DeltiQ 2 [8]

Sekundární ventilátor v zadní části tiskové hlavy se stará o chlazení roztaveného materiálu před samotnou extruzí (v tzv. Heat breaku), aby nedošlo ke zpětnému ucpávání v komoře nad Heat blockem (komponenta akumulující teplo z tepelného tělíska).

4.1.6 Slicer

Zvoleným softwarem pro generování g-kodů pro 3D tiskárnu byl slicer společnosti Ultimaker s názvem Cura ve verzi 4.5. Multifunkční slicer dovoluje upravovat velké množství tiskových parametrů, což bude při tvorbě tiskových profilů zajisté doceněno. Ultimaker Cura 4.5 obsahuje v základní verzi i předdefinované tiskové parametry pro určité materiály, avšak databázi českých výrobců Fillamentum ani Filament PM, kteří byli pro účely této práce vybráni, software neobsahuje.

V rozhraní sliceru je možné přepínat ve třech kategoriích. V kartě „Prepare“ je uživateli umožněno nahrát vybraný model, definovat použitý materiál a případně nastavit základní parametry tisku. Po nahrání modelu je tedy třeba optimálně model naorientovat, aby tisk nebyl zbytečně složitý. Poté určit použitý materiál, ze kterého bude součást tištěna, v čemž jsou zahrnuty fyzikální vlastnosti materiálu a teploty tisku společně s chlazením a retrakcemi.

Dalším krokem je nastavení parametrů tisku, zahrnující nastavení výšky vrstvy, šířku extruze či procentuální nastavení výplně a její vzor. Je zde možné také určit, jaký prvek ke zvýšení adheze bude využit. Prvním prvkem je jednoduchý obrys vytvořený okolo tištěného modelu tzv. „Skirt“, soužící k pročištění trysky před stavbou vybraného modelu, ale na adhezi nemá žádný vliv. Další možností je funkce „Brim“, která je značně využívána při tisku materiálu s vysokou smrštitivostí, protože zvyšuje obsah plochy tvořené první vrstvou. Poslední volbou je tzv. „Raft“ sloužící k eliminaci vlivu nerovné podložky a zvětšení plochy pod první vrstvou modelu.

4.2 Testované materiály

Veškeré vybrané materiály jsou vyráběny lokálními firmami s relativně dlouhou působností na trhu a maximálním důrazem na kvalitu svých filamentů. Firma Fillamentum i Filament PM v technických listech jednotlivých strun uvádí fyzikální vlastnosti i základní doporučené tiskové parametry pro úspěšný tisk. Hodnoty jsou pouze orientační a slouží pouze jako výchozí bod k nastavení prvního tisku. Výčet základních parametrů je shrnut v Tab. 4-1, resp. Tab. 4-2. Přesnost výroby filamentů je ve všech případech $\pm 0,05$ mm, což je tolerance zaručující například nemožnost ucpání trysky vlivem nestabilního průměru.

Tab. 4-1) Srovnání vybraných filamentů pro FDM/FFF 3D tisk

Materiál	Výrobce	Cena [Kč/kg]	Průměr [mm]	Hustota [g/cm³]	Teplota T_g [°C]
PET-G	Filament PM	605	1,75	1,27	81
PET-G CF Jet	Filament PM	1718	1,75	1,27	81
CPE HG100	Fillamentum	1213	1,75	1,25	90
CPE CF112	Fillamentum	2248	1,75	1,16	Neuvedeno
Nylon FX256	Fillametnum	1725	1,75	1,01	Neuvedeno
Nylon CF15	Fillametnum	2366	1,75	1,08	Neuvedeno

Kde teplota T_g značí teplotu skelného přechodu, tedy teplotu, při které například modul pružnosti poklesne až o 3 řády a materiál se stává tzv. kaučukovitě pružným. Tato teplota je zásadní při zjišťování teplotních vlivů na zkoušenou součást z důvodu skokové změny mechanických vlastností. Rychlá změna pružnosti je způsobena zvýšenou pohyblivostí částí makromolekul polymeru, které vykonávají rotační či kývavý pohyb, čímž dojde k poklesu mezimolekulárních sil [37].

Tab. 4-2) Srovnání tiskových parametrů materiálů

Materiál	Teplota trysky [°C]	Teplota podložky [°C]	Adhezní aplikátory	Rychlost tisku [mm/s]	Chlazení [%]
PET-G	220-250	80-90	Ne	Neuvedeno	30-50
PET-G CF Jet	220-250	60-80	Ne	Neuvedeno	81
CPE HG100	255-275	70-85	Magigoo	Neuvedeno	90
CPE CF112	250-270	70-85	3DLac	20-40	Neuvedeno
Nylon FX256	235-260	80-105	Lepidlo 3DLac	20-30	Neuvedeno
Nylon CF15	235-260	80-105	Lepidlo 3DLac	Neuvedeno	Neuvedeno

Výše uvedená Tab. 4-2 uvádí základní informace potřebné k prvotnímu nastavení tisku, díky kterému je následně tvořen tiskový profil. Jak je z výčtu patrné, přidaná uhlíková vlákna podle základních informací jednoduchost tisku výrazně neovlivňují, avšak hodnocení bude možné provádět až po samotném tisku. Mírně rozdílné jsou pouze intervaly teplot trysky u materiálu CPE HG100 a CPE CF112 značky Fillamentum, kde se liší i doporučené adhezní aplikátory.

4.2.1 PET–G

Velice oblíbený a snadno dostupný materiál od firmy Filament-PM bude reprezentovat materiály PET–G bez přidaných aditiv. Průměr filamentu je standardních 1,75 mm o celkové váze cívky 1 kg. Vybrané PET–G má základní transparentní barvu, čímž je eliminován vliv přidaných složek jako je například samotné barvivo. Materiál je zdravotně nezávadný, a proto může přijít do kontaktu i s potravinami. Díky své nízké smrštitivosti je tento polymer vhodný k tisku rozměrných modelů se zachováním detailů.

4.2.2 PET–G CF Jet

Je materiálem, jehož základní složkou je PET–G, vyztužením uhlíkovými vlákny o průměru 10 µm a přibližné délce 0,15 mm. Zastoupení uhlíkových vláken ve filamentu je 20 %. Kompozitní materiál se vyznačuje vysokou tuhostí a tepelnou odolností. Díky svým vlastnostem je vhodný pro tisk funkčních modelů, které mohou být případně zatíženy. Povrchové vrstvy výtisků jsou hladké a mají matnou černou barvu, typickou pro materiály s uhlíkovými vlákny.

4.2.3 CPE HG100

Jedná se o materiál, který vznikl modifikací materiálu PET (PET–G), avšak jeho vlastnosti jsou odlišné. Vlákno není tak křehké a má dobrou odolnost v tahu. Velice všestranný materiál má skvělou chemickou odolnost a zároveň může přijít do kontaktu s potravinami. Disponuje velkou tvrdostí, pružností a tepelnou odolností. Je také dobře tisknutelný, avšak je doporučováno využití adhezních prvků pro snadnější odnímání výtisků z tiskové podložky. CPE je vysoce citlivé na vlhkost, proto se musí skladovat společně s pohlcovači vzdušné vlhkosti.

4.2.4 CPE CF112 Carbon

Filament značky Fillamentum s označením CPE CF112 Carbon je materiálem představeným koncem roku 2019 s velkým potenciálem. Hmotnostní poměr i v tomto případě zaujímají ve 20 % uhlíková vlákna. Kombinace snadno tisknutelného, ale i zároveň vysoce odolného materiálu CPE s uhlíkovými vlákny přináší řadu benefitů. Jedním z nich je mimo vysoké pevnosti také odolnost vůči opotřebení, díky čemuž je tento materiál vhodný například k tisku ozubených kol. Má podobně jako základní CPE vysokou tvrdost a je také velice odolný i proti dlouhodobému zatížení. Výhodou je i dobrá chemická odolnost a úplná recyklovatelnost.

4.2.5 Nylon FX256

Polyamid nesoucí označení FX256 Natural je materiál s velkou škálou využití. Při tisku několika mála vrstev je velice flexibilní, avšak s vysokou mezivrstvou přilnavostí. Velká smršťivost spojená se silnou mezivrstvou adhezi dělá tento materiál relativně obtížně tisknutelný. Pro dostatečnou adhezi je nutné upravit povrch tiskové podložky, a to konkrétně nanesením vrstvy lepidla a přestříkem spreje 3DLac. Doporučeno je i využití tzv. Brimu, tedy pomocného okraje tištěného objektu, zvětšující plochu první vrstvy. Nylon FX256 je jako všechny polyamidy hygroskopický, proto je třeba ho před použitím řádně vysušit. Negativní vlastnosti jsou však kompenzovány vysokou chemickou a tepelnou odolností. Díky nízkému koeficientu tření a dobré rozměrové stálosti je materiál velice využíván pro tisk funkčních dílů.

4.2.6 Nylon CF15 Carbon

Posledním zvoleným materiálem je filament na bázi nylonu vyztužený z 20 % uhlíkovými vlákny podobně jako tomu bylo u předešlých materiálů podobného typu. Uhlíková vlákna byla do granulátu polyamidu přimíchána před samotnou extruzí, při jeho výrobě. Výsledkem je materiál vyznačující se vysokou pevností, tepelnou a chemickou odolností, ale také lepší stabilitou zpracování a snížení tak obtížnosti tisku v porovnání například s materiálem Nylon PA12 či Nylon FX256. Karbonová složka dodává materiálu i vynikající odolnost vůči rázům i při nízkých teplotách s nízkou tepelnou smršťivostí, díky čemuž je využíván k tisku často namáhaných součástí (např. ložisek).

4.3 Tvorba a optimalizace tiskových profilů

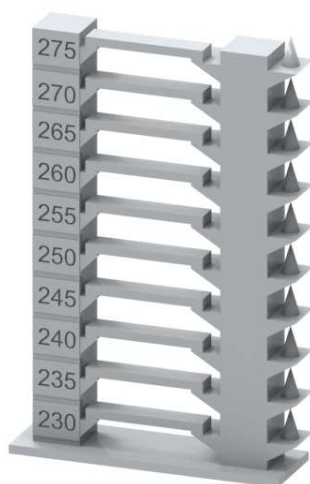
Primárním problémem, který je třeba vyřešit, je vytvoření tzv. tiskových profilů pro zvolené materiály, díky kterým bude možné testovací vzorky vytisknout. Díky tomu, že neexistuje univerzální nastavení tisku, musejí být tyto tiskové profily experimentálně tvořeny téměř pro každou tiskárnu. Mezi hlavní proměnné je možné zařadit například samotný typ konstrukce, tvar a velikost podložky. Stejně tak styl, intenzitu i načasování chlazení, konstrukci použitého extruderu, či hloubku a rychlost retrakcí. Uživatel je běžně odkázán na technické listy od výrobců, kde je uveden interval teplot, ve kterých se materiál dobře taví, při jakých teplotách podložky má první vrstva výtisku nejlepší adhezi nebo zda je nutné využít chlazení případně s jakou intenzitou. [16] Zmíněné parametry však musí uživatel detailně ověřit na vybraném stroji z vlastní iniciativy, pokud tomu tak neučinil výrobce tiskárny.

Pomocí tisku série testovacích modelů, volně dostupných na internetu, lze ve specializovaných softwarech, jakým zvolený slicer Ultimaker Cura 4.5 je, tiskové profily postupně optimalizovat. Tento slicer nabízí nespočet možností úprav parametrů tisku, proto je pro tyto účely ideálním.

Důležitým faktorem ovlivňující kvalitu tisku je výška vrstvy, která je standartně volena 0,2 mm. Tato výška vrstvy byla použita i při tisku všech testovacích modelů díky poznatkům z výše uvedených studií. Dalším parametrem univerzálně použitým pro všechny modely testující tisknutelnost je procentuální výplň jednotlivých vrstev (tzv. infill) a vzor výplně. Pro zrychlení procesu výroby byl zvolen trojúhelníkový tvar výplně vyplňující 20 % celkové plochy vrstvy. Pro nylonové materiály bylo využito funkce Brim pro zvýšení přilnavosti modelu k podložce, avšak u zbylých materiálů postačil pouhý proplach trysky před samotným zahájením tisku pomocí funkce Skirt.

4.3.1 Stanovení ideální teploty tisku

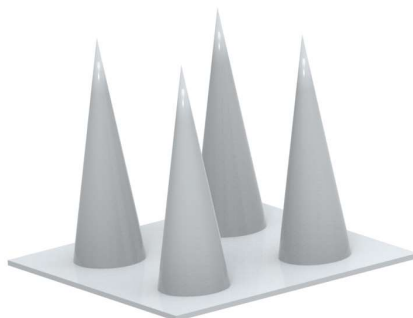
Interval teplot trysky stanovený výrobcem není dostatečně konkrétní, a proto je nutné ideální teplotu stanovit experimentálně. Princip tohoto testu spočívá v tisku modelu (Obr. 4-5) s konstantním zvyšováním teploty trysky. Speciálně navržený model má v levé části stupnici, na které je zobrazena konkrétní teplota v dané sekci, díky čemuž je podle posouzení kvality tisku mostů, stěn a kuželů stanovena ideální hodnota. Stupnice má škálu 230-275 °C odstupňovanou po 5 °C, což je pro veškeré testované materiály dostačující. Tisk tohoto modelu probíhá celkově ve čtyřech iteracích, při kterých je modifikován procentuální výkon chladicího ventilátoru (0, 30, 50 a 80 %).



Obr. 4-5) Vizualizace modelu pro určení ideální teploty trysky (Teplotní věž)

4.3.2 Stanovení parametrů retrakcí

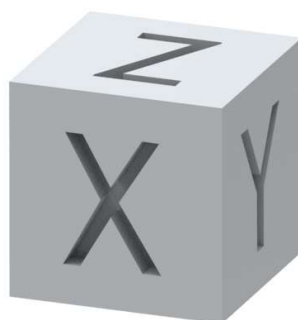
Dalším testem je tzv. retrakční test, díky kterému je testována správná rychlost a hloubka retrakce (zpětný pohyb extrudovacího motoru ve fázi přejezdu trysky). Model pro tento test se skládá z podstavy a 4 kuželů (Obr. 4-6), mezi kterými je pozorováno tažení jemných vláken materiálu (anglicky „Stringing“). Nežádoucí tažení materiálu může být způsobeno i vysokou teplotou tisku či nedostatečným výkonem ventilátoru. Pokud se tedy nedaří model úspěšně vytisknout, lze z předchozího testu zvolit druhý nejlepší výsledek a retrakční test opakovat.



Obr. 4-6) Model určený k testování retrakcí

4.3.3 Kontrola kvality povrchů

Během následujícího testu je sledováno správné vyplňování mezer, vzniklých špatným trasováním trysky, případně malou šířkou extruze. Stejně tak i tzv. Ringing (nežádoucí vlnitý vzor na povrchu modelu), který je většinou způsobený silnými vibracemi samotné tiskárny či tiskové podložky. Vibrace způsobuje příliš velká rychlost pohybu tiskové hlavy, která může vést v extrémních případech k rezonanci prvků konstrukce. Řešením tohoto problému je snížení rychlostí (případně snížení zrychlení) tisku a zvýšení tuhosti tiskárny. Testovacím modelem je krychle o hraně 20 mm, na jejíž třech stěnách je písmeno, reprezentující danou osu, ve které je symbol tištěn. (Obr. 4-7)



Obr. 4-7) Krychle testující kvalitu povrchů

4.3.4 Komplexní test tiskových parametrů

Finálním testem je tisk modelu astronauta (Obr. 4-8), jehož tvar testuje správnost komplexního nastavení tisku. Musí být úspěšně vytištěn bez pomoci podpor, a to i v místech, kde převisy dosahují až 60°. Celková kvalita tisku rozhoduje o další iteraci předešlých testů, případně o považování vývoje tiskového profilu za dokončený. Veškeré testy jsou hodnoceny velice subjektivně, proto výsledek tohoto testu záleží z velké části na náročnosti uživatele.



Obr. 4-8) Model určený k finálnímu testu (postavička astronauta)

4.4 Mechanické a termomechanické zkoušky

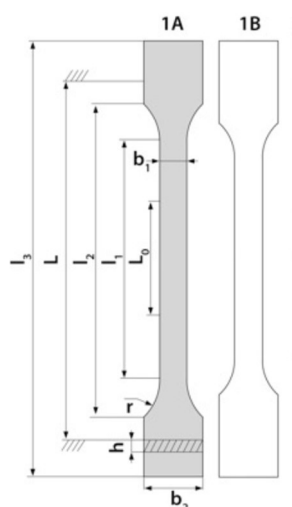
Mechanické vlastnosti polymerů jsou celkem čtyři (pevnost, houževnatost, plasticita a pružnost). O poznání více je však mechanických charakteristik, které popisují důležité informace pro jejich použití. Jedná se o charakteristiky, které jsou do jisté míry závislé na podmínkách testování (příprava a tvar zkušebních těles, podmínky zkoušky a podobně). Jsou stanoveny na základě provedených experimentů, které na testovacích vzorcích testují vliv vnějších sil. Zkušební tělesa jsou při jejich namáhání značně deformována až do jejich porušení. Proto se tyto zkoušky označují jako destruktivní. Pro zjištění mechanických charakteristik byly vybrány následující zkoušky.

4.4.1 Tahová zkouška ČSN EN ISO 527-1

Tahové charakteristiky materiálu jsou těmi nezákladnějšími. Jejich princip spočívá v jednoosém tahovému namáhání zkušebního vzorku, při kterém je sledováno poměrné prodloužení v závislosti na normálovém napětí. Tyto zmíněné veličiny tvoří tzv. deformační křivku, která vyjadřuje důležité informace o vlastnostech testovaného materiálu.

Samotná zkouška se skládá z několika kroků. Nejprve je vzorek uchycen do čelistí zkušebního stroje a na těleso je nasazeno čidlo měřící velikost deformace. Poté je jedna z čelistí uvedena do jednoosého pohybu, čímž se od sebe čelisti vzdalují. To vyvolává na vzorku deformaci měřenou průtahoměrem v závislosti na současně měřeném napětí.

Tvar a rozměry zkušebních těles jsou přesně definovány normou. Protože tištěné vzorky svou normu dosud nedostaly, bude měření prováděno v souladu s normou ČSN EN ISO 527-1, používanou pro obecné testování plastů a plastových kompozitů. Zmíněná norma uvádí, že požadovaným tvarem vzorů je tvar oboustranných lopatek (1A, 1B), který umožňuje dostatečné uchycení v čelistech, přičemž napětí je koncentrováno ve zúžené části vzorku. (Obr. 4-9). Konkrétně definované rozměry jsou uvedené v Tab. 4-3.



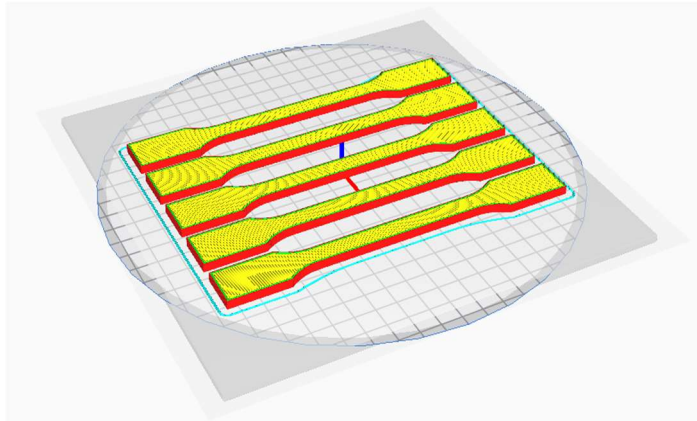
Obr. 4-9)

Schéma rozměrů testovaného tělesa 1A

Tab. 4-3) Rozměry testovaného vzorku

Typ zkoušeného vzorku 1A		
Celková délka	l_3	170 mm
Délka zúžené části s rovnoběžnými hranami	l_1	80±2 mm
Poloměr	r	24±1 mm
Vzdálenost mezi rozšířenými částmi s rovnoběžnými hranami	l_2	109,3±3,2 mm
Šířka konců	b_2	20,0±0,2 mm
Šířka zúžené části	b_1	10,0±0,2 mm
Doporučená tloušťka	h	4,0±0,2 mm
Počáteční měřená délka	L_0	75,0±0,5 mm
Počáteční vzdálenost mezi čelistmi	L	115±1

Pro výrobu vzorků bylo využito tiskových profilů, vyvinutých na sérii zkušebních modelů z předchozí kapitoly 4.3. Velmi důležitým faktorem pro získání relevantních informací o mechanických vlastnostech je i orientace modelu v souladu s uspořádáním uhlíkových vláken, čímž se již zabývala řada výzkumných prací, či diskuzních fór [31] [33] [38]. Anizotropii karbonových vláken je tedy třeba řádně při umisťování modelu na tiskovou podložku zohlednit. Výsledná orientace vzorků je zobrazena na Obr. 4-10, kde je patrné, že bylo využito poznatků, získaných z dostupných studií a zvolenou orientací se stala orientace v osách XY.



Obr. 4-10) Snímek modelů pro tahovou zkoušku ze sliceru Ultimaker Cura 4.5 – orientace modelů

Dalším tiskovým parametrem, který je důležité správně zvolit je výška vrstvy. Ta byla zvolena stejně jako v případě testovacích modelů pro testování tisknutelnosti, tedy 0,2 mm. Razantní rozdíl byl však ve volbě procentuální výplně vrstev, která výrazně ovlivňuje mechanické vlastnosti modelů. Po konzultaci s vývojáři z firmy Fillamentum bylo rozhodnuto o volbě 100% výplně vrstev pro eliminaci zkreslení výsledků. Nejčastější orientací směru výplně je při běžném 3D tisku orientace od -45° do $+45^\circ$, proto byla zvolena i pro účely měření. Důležité je také nastavení počtu perimetrů, tedy krajních vrstev modelu (červeně značené plochy na Obr. 4-10), které bylo voleno počtem 3. Podobně jako u tisku modelů z kapitoly 4.3, i zde bylo u materiálů z nylonu využito funkce Brim, která by neměla mechanické vlastnosti ovlivnit, avšak bez ní by bylo vytisknout tyto materiály bez tvarové deformace téměř nemožné. Posledním krokem přípravy výroby vzorků bylo vygenerování tzv. g-kódu a následného nahrání těchto strojových instrukcí do tiskárny.

Vybraným měřicím přístrojem byl stroj značky Zwick s vyhřívanou komorou (Obr. 4-11), na kterém byly simulovány podmínky provozu (22°C a 80°C). Bohužel bylo z kapacitních důvodů nutné redukovat počet testovaných vzorků a materiálů. Proto byl testován pouze materiál CPE HG100 a jeho karbonová verze CPE CF112. Každý z testů probíhal ve třech iteracích pro každý materiál, tedy 12 vzorků celkem. Maximální rychlost pohybu čelistí byla u obou variant testů stejná, a to 50 mm/s. Cílem těchto testů bylo porovnat jednotlivé materiály v různém prostředí a sledovat vliv přidaných uhlíkových vláken na závislosti normálového napětí na deformaci.



Obr. 4-11) Trhací stroj Zwick s vyhřívanou komorou

4.4.2 Zkouška rázové a vrubové houževnatosti ČSN EN ISO 179-1

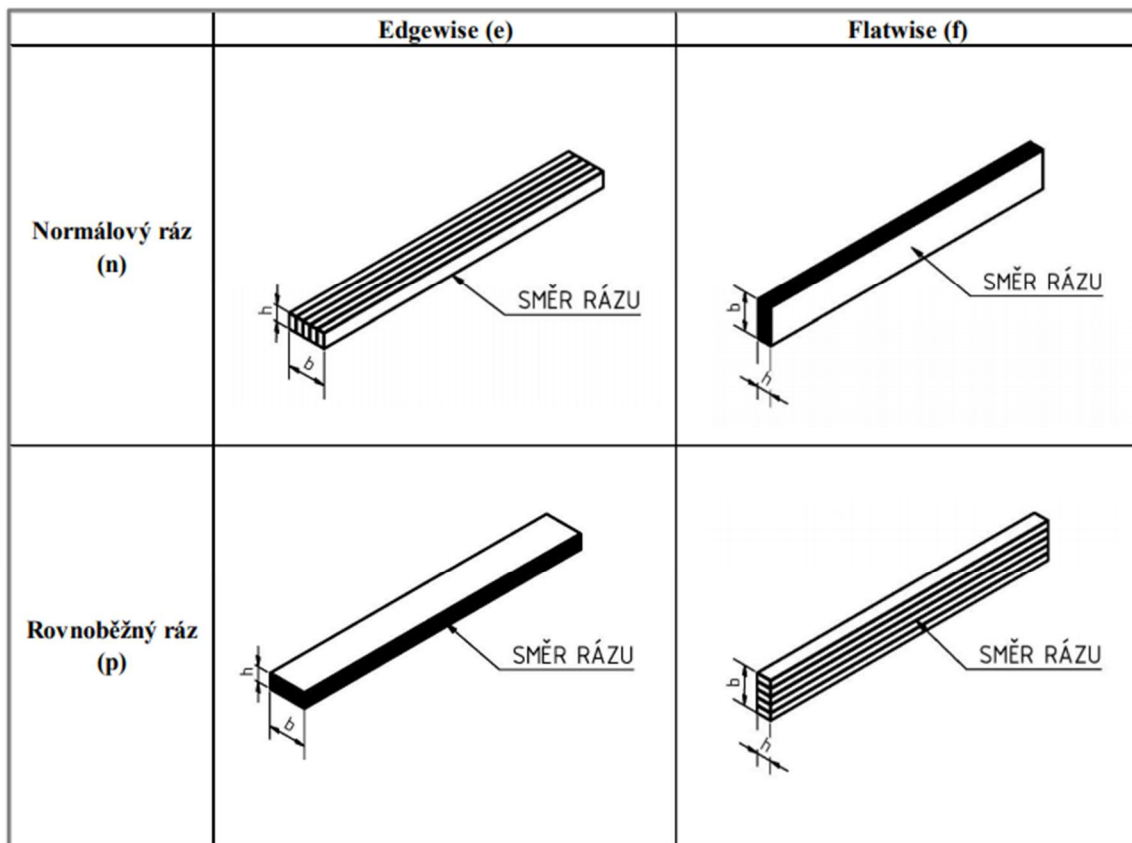
Rázová houževnatost materiálu úzce souvisí se schopností rychle absorbovat dodanou energii nárazem Charpyho kladiva. Při rázovém namáhání termoplastů a reaktoplastů dochází ke dvěma typům lomu, a to konkrétně lomu křehkému a houževnatému. Měření bylo prováděno při pokojové teplotě (22 °C), což je teplota výrazně nižší než teplota skelného přechodu všech testovaných materiálů. Díky tomu by se zvolené materiály měly chovat křehce a mělo by tak dojít k úspěšnému přeražení. Výjimkou by však mohl být materiál Nylon FX256, jehož schopnost absorbovat rázovou energii popisuje i technická dokumentace firmy Fillamentum.

Princip zkoušky spočívá v umístění zkušebního tělesa ve tvaru hranolu na vodorovné podpěry (viz. Obr. 4-12), které je poté přeraženo úderem rázového kladiva (metoda Charpy). Směr rázu je veden středem (mezi podpěrami) s různou orientací vzorku. Orientace Edgewise (e) a Flatwise (f) je uvedena společně s rozměry vzorku na Obr. 4-13 resp. Tab 4-4. Norma uvádí, že zkušební vzorek je opatřen vrubem, avšak v případě tvrdých lehčených materiálů nebo kompozitů vyztužených dlouhými vlákny se vrub na testovaných tělesech vyskytovat nemusí. Proto byla zvolena varianta bez něj. V případě vrubové houževnatosti bude použit typ vrubu A dle zmíněné normy [39].

Měřena je energie vynaložená na přeražení zkušebního tělesa a typ přeražení: C (úplné přeražení, včetně kloubového, tedy neúplného přeražení, kdy obě části tělesa drží pouze obvodová vrstva tvořící kloub bez zbytkové tuhosti), P (odpovídající částečnému přeražení) nebo N (označující nepřeražený vzorek).



Obr. 4-12) Uložení vzorku mezi podpěry



Obr. 4-13) Schéma orientace testovaných těles a směru rázu

Tab. 4-4) Rozměry zkušební tělesa

Zkušební těleso typu 1		
Délka	l	80±0,2 mm
Šířka	b	10±0,2 mm
Tloušťka	h	4,0±0,2 mm
Rozpětí podpěr	L	62 ^{+0,5} mm

Výsledná rázová houževnatost Charpy (a_{cU}) je pak definována vztahem (1), tedy jako kinetická energie (E_C), která byla vynaložena k přeražení zkušební vzorku vztahena na jeho původní průřez:

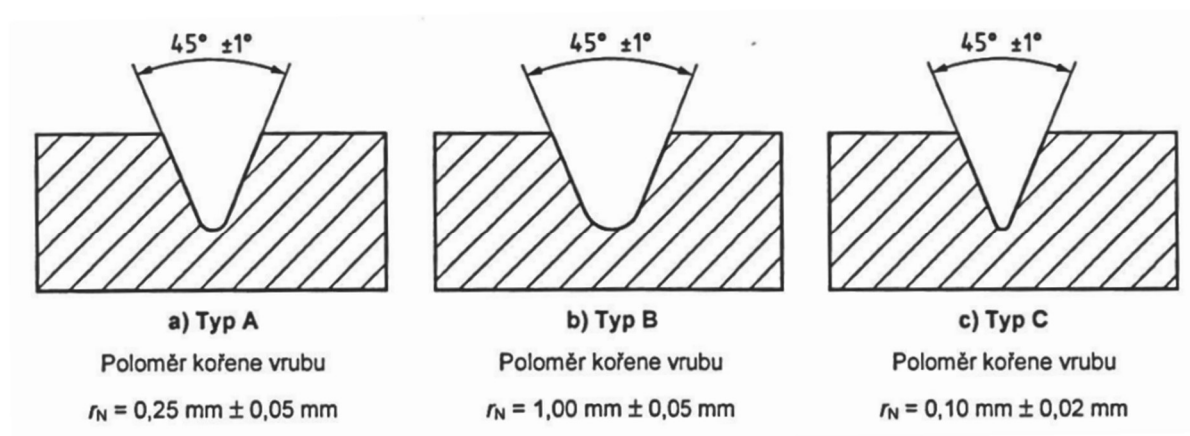
$$a_{cU} = \frac{E_C}{h*b} [\text{kJ} * \text{m}^{-2}] \quad (1)$$

Kde (h) odpovídá tloušťce vzorku a (b) je šířka vzorku.

Při využití testovacího vzorku s vrubem je směr rázu veden výhradně na užší stranu vzorku, a to tak, aby byl vrub orientován na opačnou stranu, než je místo dopadu rázového kladiva. V takovém případě je měřena tzv. vrubová houževnatost (a_{cN}) definovaná jako podíl kinetické energie (E_C) spotřebované k přeražení zkušebního tělesa s vrubem a původního průřezu tělesa pod vrubem dle vztahu (2):

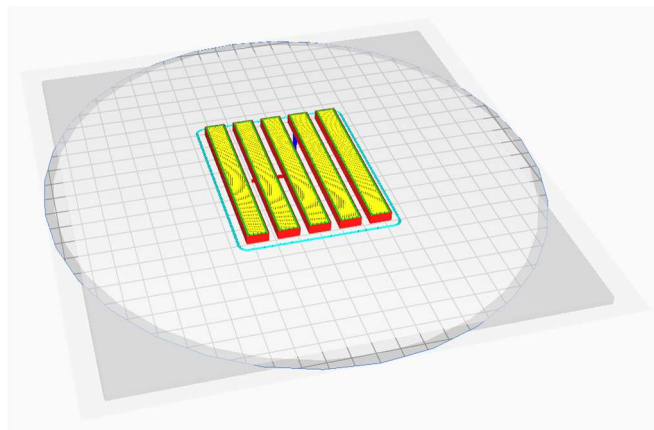
$$a_{cN} = \frac{E_C}{h \cdot b_N} \text{ [kJ } \cdot \text{ m}^{-2} \text{]} \quad (2)$$

Kde (h) odpovídá tloušťce zkušebního tělesa s vrubem a (b_N) šířku tělesa pod vrubem. (N) poté definuje typ vrubu (A, B či C). Geometrie zmíněných typů vrubů je zobrazena na Obr. 4-14 i s velikostí poloměru kořene vrubu.



Obr. 4-14) Geometrie typů vrubů

Výroba vzorků probíhala obdobně jako tomu bylo u vzorků pro tahovou zkoušku. Orientace tisku (Obr. 4-15) byla zvolena tak, model zaujímal na tiskové podložce co největší plochu. Tištěno bylo 5 zkušebních modelů najednou pro zvýšení rychlosti produkce a snížení potenciálních vlivů okolí. Výplň všech vzorků činila 100 % a její orientace byla opět od -45° do $+45^\circ$. Počet perimetrů byl stanoven na hodnotu 3 a výška vrstvy činila 0,2 mm. U materiálu Nylon FX256 a Nylon CF15 bylo využito funkce Brim (Obr. 4-16) pro zvýšení adheze na podložce. Ostatní parametry tisku byly použity na základě výsledků z kapitoly 4.3 (optimalizace tiskových parametrů).



Obr. 4-15) Snímek orientace tisku vzorků pro zkoušku rázové houževnatosti



Obr. 4-16) Snímek vytištěných vzorků z materiálu Nylon CF15 za využití funkce Brim

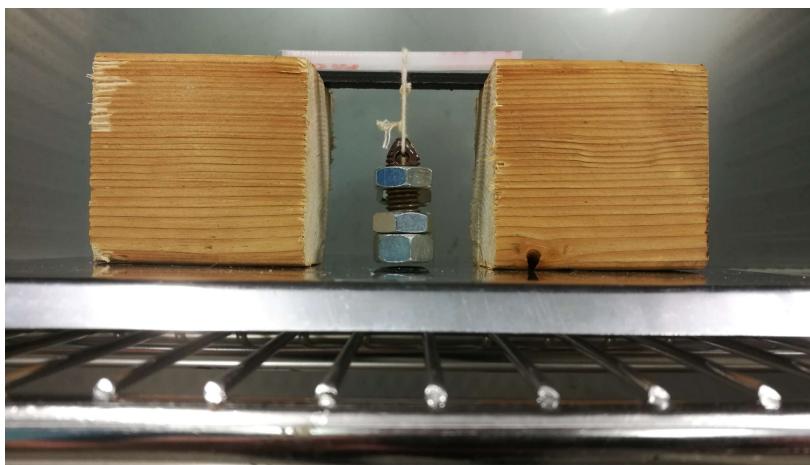
Pro přeražení a následné získání výsledků byl vybrán stroj značky Zwick (Obr. 4-17) s kladivem o maximální velikosti kinetické energie 2,7 J. Použitá rychlost nárazu kladiva do vzorku je uvedena v příslušné normě a její hodnota činí 3,8 m/s \pm 10 %. Rozteč mezi podpěrami činila 62^{+0,5} mm, jak je taktěž uvedeno v normě ČSN EN ISO 179-1. Počet testovaných vzorků byl stanoven na 10 pro každý materiál tak, aby první polovina z nich byla přeražena dle orientace flatwise a druhá polovina zkušebních modelů dle edgewise. Celkem tedy bylo vyrobeno 60 testovacích modelů, které sloužily k následnému přeražení.



Obr. 4-17) Testovací stroj značky Zwick pro měření rázové houževnatosti.

4.4.3 Stanovení teploty průhybu při zatížení

Zkouška spočívá v termomechanickém zatížení zkušební tělesa ve tvaru hranolu statickým 3 bodovým ohybem. Z důvodu absence dostatečného vybavení nebylo možné zkoušku provést dle normy ČSN EN ISO 75-1, avšak bylo provedeno její napodobení. Vzorek byl umístěn mezi dva dřevěné kvádry a v jeho středu byl zatížen závažím, odpovídajícím 0,225 MPa (polovina minimálního zatížení požadována normou ČSN EN ISO 75-1). (Obr. 4-18) Poté byla celá soustava umístěna do klimakomory Binder MK 720, kde byla teplota okolí zvyšována stálou rychlostí 120 °C/h. Měřena byla teplota průhybu HDT (heat deflection temperature) a čas, při kterém dosáhne testovací těleso smluvního průhybu (0,2 %). Tato metoda měření je vhodná pro termoplasty, reaktoplasty a jejich kompozity [39].



Obr. 4-18) Fotografie připravených vzorků pro zjištění teploty průhybu při zatížení HDT

Velikost vzorků je dána normou ČSN EN ISO 75-1, podle které je možné využít rozměrově stejné zkušební modely, jako tomu bylo u normy ČSN EN ISO 179-1 (Zkouška rázové houževnatosti). Jednotlivé rozměry jsou hranolu jsou uvedeny v Tab. 4-5.

Tab. 4-5) Rozměry zkušební tělesa

Zkušební těleso typu 1		
Délka	l	80±0,2 mm
Šířka	b	10±0,2 mm
Tloušťka	h	4,0±0,2 mm

Ověření dosažení smluvního průhybu bylo dosaženo dopadem závaží o velikosti 61 g na plechovou podložku. Průběh zkoušky byl snímán kamerou, která by případně mohla pomoci při analyzování kontaktu. Rozteč mezi podpěrnými kvádry činila 60 mm, tedy zkušební modely byly na každé straně podepřeny 10 mm.

5 VÝSLEDKY

5.1 Testování tisknutelnosti

3D tisky testovacích modelů z komerčních materiálů byly ve všech případech úspěšně dokončeny, na základě čehož byly vytvořeny tiskové profily. Optimalizace tiskových parametrů probíhala v několika iteracích, pro dosažení co nejvyšší kvality tisku. Kompletní přehled zkoumaných parametrů tisku pro každý z testovaných materiálů je shrnut v tab. 5-1.

Tab. 5-1) Přehled základních tiskových parametrů

Materiál	Teplota trysky [°C]	Teplota podložky [°C]	Rychlost tisku [mm/s]	Výkon chlazení [%]	Hloubka retrakce [mm]	Rychlost retrakce [mm/s]
PET-G	252	85	35-45	80	9	40
PET-G CF Jet	268	85	30-40	80	9	40
CPE HG100	246	80	35-45	50	9,5	30
CPE CF112	266	80	30-40	40	9	25
Nylon FX256	243	105	30-40	35	11	45
Nylon CF15	255	105	30-40	15	11	45

5.1.1 PET–G a PET–G CF Jet

Tisk z materiálu PET–G nebyl příliš obtížný, proto je mezi uživateli 3D tiskáren velice oblíbený. Avšak překvapením bylo u obou materiálů stanovování ideální teploty trysky. V obou případech byla stanovená teplota trysky vyšší než horní hranice intervalu, udávaného výrobcem. Pro materiál PET–G teplota trysky přesáhla interval o 4 °C, což není zásadní rozdíl a výslednou kvalitu tisku by použití uvedené horní hranice teploty trysky výrobcem výrazně neovlivnilo. Větší rozdíl by však nastal u materiálu PET–G CF Jet, pro který byla stanovena optimální teplota trysky o 18 °C vyšší než maximum uváděné v technickém listu výrobce. Při nižších teplotách (okolo 230 °C) nebyla koheze jednotlivých vrstev dostačující a stala se kritickou díky křehkosti, kterou výtisk trpěl. To bylo důvodem neúspěchu hned několika tisků prvního testovacího modelu (Teplotní věž), kdy bylo nutné od modifikace g-kódu začínajícího od 230 °C upustit a začít tak teplotou tisku 250 °C.

Dalším pozorovaným negativem bylo při tisku uhlíkové varianty se základem PET–G, i občasné ucpávání trysky, projevující se přeskokováním kolečka extruderu a tvorbou defektů na modelech. (Obr. 5-1) Oba faktory byly eliminovány zvýšením teploty trysky na konečných 268 °C a zvýšení přítlaku podávacího kolečka, po čemž byl tok roztaveného polymeru ideální.



Obr. 5-1) Defekty tvořené ucpáním trysky během tisku

Pozitivním vlivem uhlíkových vláken na tisknutelnost bylo výrazné snížení tzv. „Stringování“, tedy nežádoucím tažení tenkých vláken, čímž se stal tisk malých ploch ve stejné výšce výrazně snazším. K výraznému zlepšení došlo i v kvalitě povrchů u uhlíkem plněného PET–G, která je u tohoto materiálu velmi vysoká. (Obr. 5-2)



Obr. 5-2) Test kvality povrchů materiálu PET–G CF Jet

Testovanou dvojicí materiálů tvoří velice podobný základ, avšak tisknutelnost je poměrně rozdílná. Na Obr. 5-3 jsou zobrazeny výtisky z testovaného materiálů PET-G CF Jet v jejich finální iteraci.



Obr. 5-3) Modely ve finální iteraci vývoje tiskových profilů pro materiál PET-G CF Jet

5.1.2 CPE HG100 a CPE CF112

Náročnost tisku z materiálu CPE HG100 je velice podobná obtížnosti tisku PET-G, tedy poměrně nízká. Výraznějším negativním projevem základního materiálu se ukázala tvorba tenkých vláken, kterou se ani po 6 iteracích nepovedlo zcela eliminovat. (Obr. 5-4) Nutno však podotknout, že testovací model (Test retrakcí) je zakončen ostrými špičkami, které je velice obtížné vytisknout s použitím většiny dostupných materiálů. Teplotní intervaly udávány výrobcí jsou zde přesnější, a s technickými listy se optimální teploty tisku shodují více. CPE má středně dobrou kvalitu povrchů a výrazný lesklý vzhled modelů. Lesklost povrchu může způsobovat jemnou nečitelnost vytištěných znaků či symbolů na vertikální rovině, avšak při správném pootočení výtisku kolmo ke zdroji světla je text či číslice zřetelný.



Obr. 5-4) Nežádoucí tvorba vláken polymeru při testu retrakcí

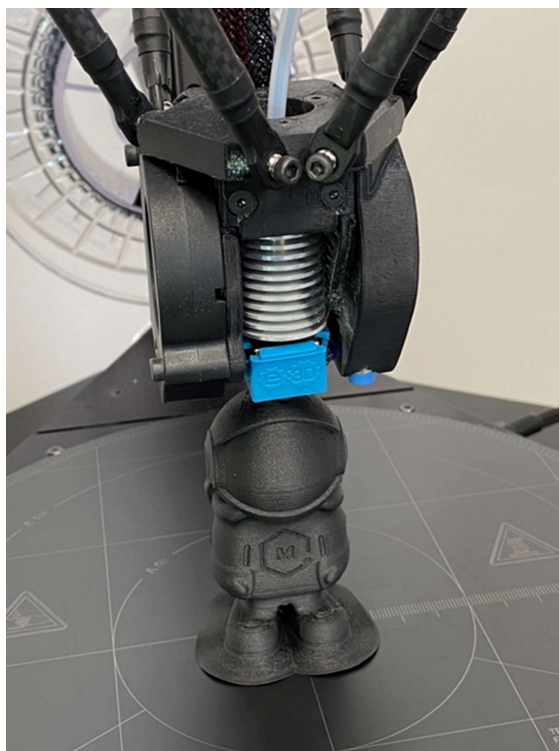
Tisk z materiálu CPE CF112 neprovázely téměř žádné problémy s výjimkou křehkosti v nízkých teplotách, kdy se výtisky lámaly podobně jako tomu bylo u PET–G CF Jetu. Kvalita povrchů je opět velmi vysoká a oproti CPE je povrch výrazně matnější, což způsobuje uhlíkové aditivum. Rychlost pohybů tiskové hlavy byla u karbonové varianty CPE po nabití informací z předešlé dvojice mírně snížena oproti základnímu CPE, za účelem zvýšení koheze jednotlivých vrstev, a tím poklesu zmíněné křehkosti. Na rychlost tisku upozorňoval i vývojový pracovník firmy Fillamentum, se kterým byly postupy práce konzultovány. Přehled finálních výtisků z filamentu CPE CF112 je zobrazen na Obr. 5-5.



Obr. 5-5) Modely ve finální iteraci vývoje tiskových profilů pro materiál CPE CF112

5.1.3 Nylon FX256 a Nylon CF15

V porovnání náročnosti tisku nylonových materiálů oproti výše zmíněných, byl tisk Nylonu FX256 a Nylonu CF15 výrazně problematičtější. Problémem je například jeho vysoká hygroskopicita, která se dá ovšem relativně jednoduše vyřešit vysoušením celé cívky před samotným tiskem. Další ztížení spočívá v jeho vysoké smrštivosti, která je tak vysoká, že pokud není plocha první vrstvy výtisku dostatečně velká, model se během tisku deformuje. K tomuto jevu dochází zejména na okrajích tištěných modelů a označuje se jako „Warping“. Tento problém nastal u obou nylonových materiálů a byl vyřešen využitím funkce Brim (Obr. 5-6) v softwaru pro přípravu tisku (Ultimaker Cura 4.5) a nanesením tenké vrstvy lepidla na tiskovou podložku. I když se Warping projevil u obou testovaných materiálů, v případě filamentu s uhlíkovými vlákny byla deformace menší. Lze tedy konstatovat, že karbon má v tomto ohledu kladný vliv. Interval teplot trysky udávaný výrobcem těchto materiálů se ukázal jako poměrně přesný, protože subjektivně posouzené ideální hodnoty teplot trysky u obou materiálů do intervalu zapadají. Teplota trysky u uhlíkové varianty musela být opět oproti verzi bez aditiv zvýšena, a to konkrétně o 12 °C. Pozměněn byl i výkon chladicího ventilátoru, přenastaven o 20 %. Rychlosti tisku i nastavení retrakcí je však u obou materiálů totožné.



Obr. 5-6) Snímek z tisku testovacího modelu s využitím funkce Brim

Analogicky jako u předešlých materiálů se vlivem uhlíku zvýšila kvalita povrchů. (Obr. 5-7) Matný povrch a správné vrstvení materiálu mají za důsledek vzhledově velmi atraktivní modely, působící houževnatým dojmem. Avšak při detailnější analýze dojde pozorovatel k názoru, že i u materiálu Nylon CF15 dochází k výraznému zvýšení křehkosti oproti filamentu Nylon FX256. Tento nežádoucí jev se tedy vizuálně jeví i u velice houževnatého materiálu jako je nylon, avšak konkrétní zvýšení křehkosti ukáží až výsledky zkoušky rázové houževnatosti.



Obr. 5-7) Detail na průběh tisku s vysokou kvalitou povrchů materiálu Nylon CF15

5.2 Testování mechanických a termomechanických vlastností

5.2.1 Výsledky tahové zkoušky

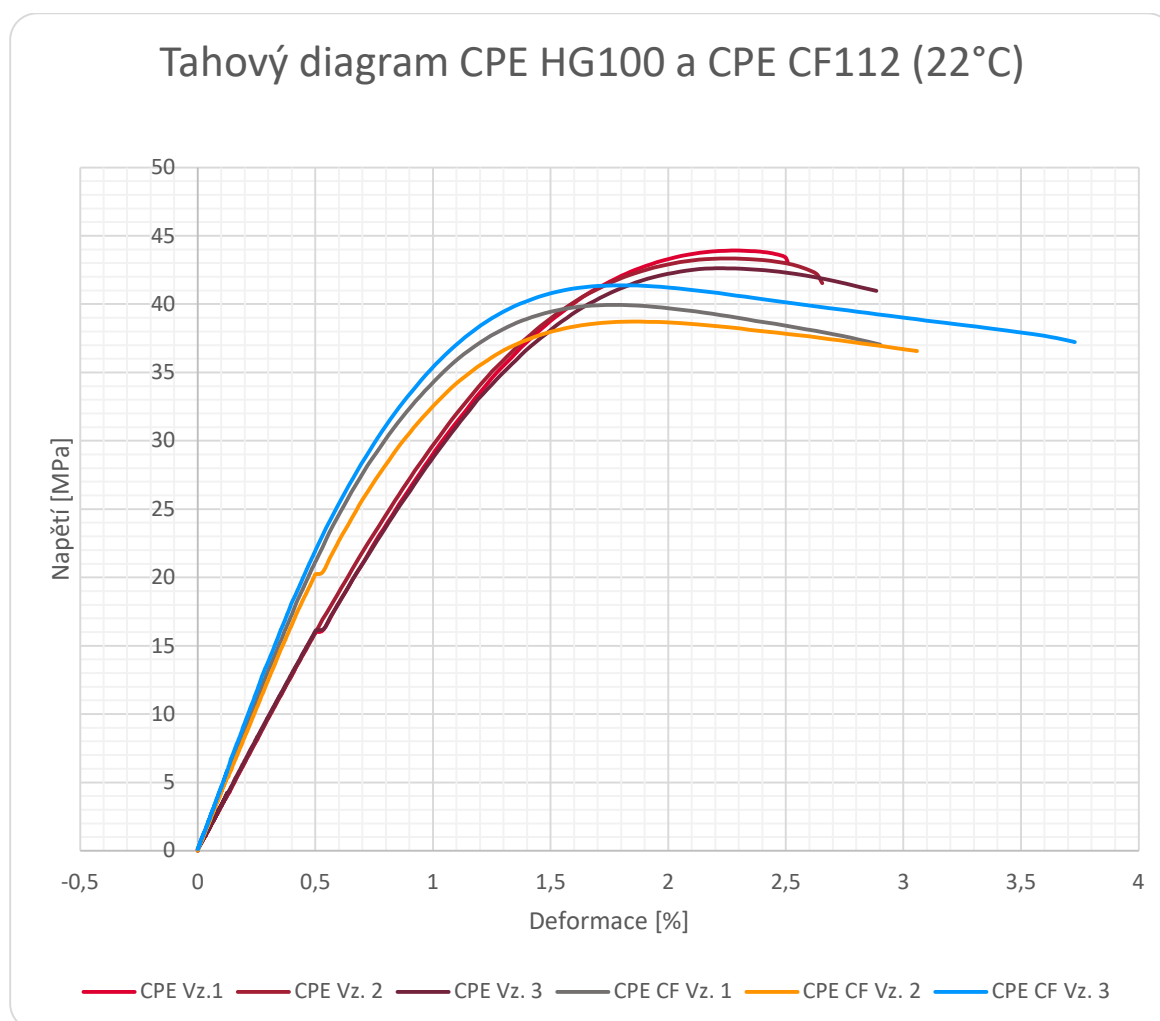
Veškeré tahové zkoušky dle ČSN EN ISO 527 byly prováděny za výše uvedených podmínek. Výsledky jsou rozděleny podle stanovené teploty prostředí v testovací komoře na teplotu pokojovou (22 °C) a teplotu simulující extrémní pracovní podmínky (80 °C) za účelem sledování vlivu karbonu na vlastnosti za vysokých teplot. Výsledky měření za pokojové teploty jsou shrnuty v Tab. 5-2, rozdělené dle typu materiálu a zkoumaných mechanických vlastností.

Tab. 5-2) Výsledky tahové zkoušky materiálů CPE HG100 a CPE CF112 za pokojové teploty

Materiál	Číslo vzorku	Modul pružnosti E [MPa]	Maximální zatěžující síla F _{max} [N]	Mez pevnosti R _m [MPa]
CPE HG100	1	1600	1764	43,9
	2	1592	1747	43,3
	3	1591	1731	42,6
	\bar{x}	1594,33	1747,33	43,26
CPE CF112	1	2191	1651	39,9
	2	2073	1634	38,7
	3	2306	1692	41,4
	\bar{x}	2190	1659	40

Z výše uvedené tabulky vyplývá, že za standardních pracovních podmínek má základní materiál CPE HG100 o přibližně 7,5 % vyšší mez pevnosti, resp. je schopen odolávat vyšší maximální hodnotě zatěžující síly (F_{max}) v jednoosém zatěžování tahem. Pozitivním vlivem karbonové příměsi je však poměrně výrazné navýšení modulu pružnosti (E), který se v průměru zvýšil o necelých 600 MPa.

Zmíněná data jsou vynesena do tahového diagramu (Napětí – Deformace), kde jsou projevy uhlíkového aditiva na mechanické vlastnosti vzorků zřetelně pozorovatelné.



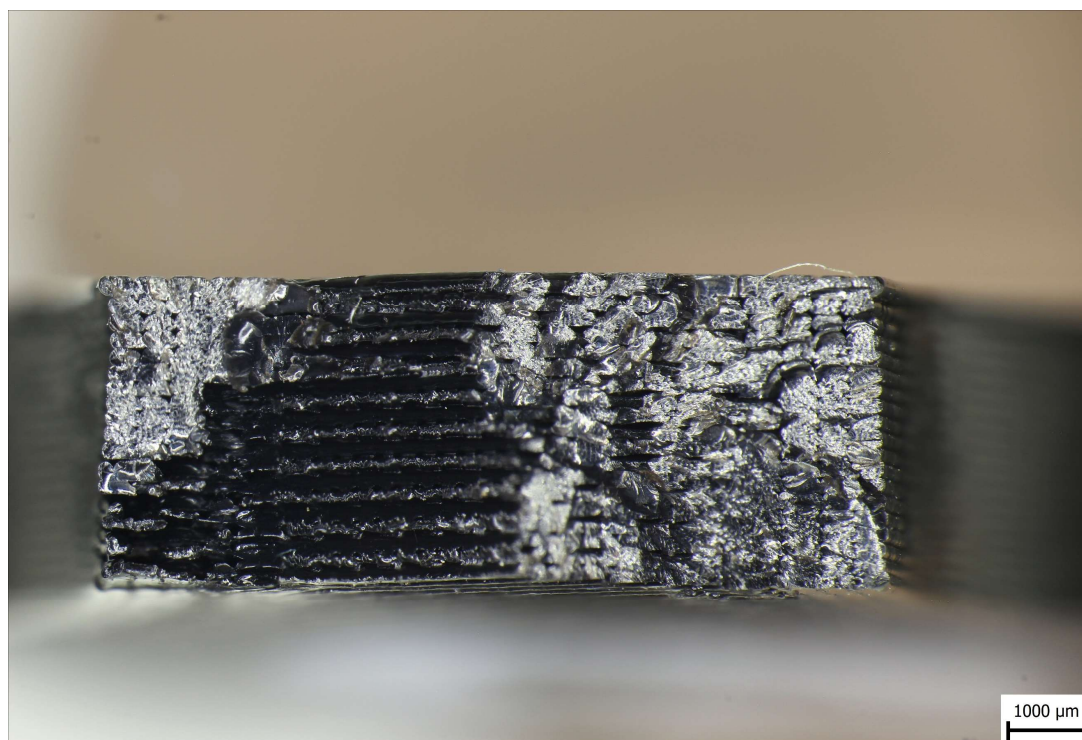
Graf 5-1) Tahový diagram materiálu CPE HG100 a CPE CF112 za pokojové teploty

I když se vlivem uhlíkového vlákna snížila maximální pevnost tištěných vzorků, tvar deformačních křivek zůstal z velké části nezměněn. E modul, geometricky odpovídající směrnici přímkové části deformační křivky, je u materiálu CPE CF112 výrazně vyšší, a to již při malém zatížení. V grafu 5-1 je při detailnějším zkoumání patrný krátký skluz obou materiálů (CPE Vz. 3 i CPE CF Vz. 2), při kterém vzorky v určité fázi zatěžování ztratily svoji stálost a došlo tak prudké deformaci za konstantního napětí. Tento skluz byl pravděpodobně vyvolaný defekty vytvořenými na testovacích modelech v důsledku technologie tisku. Jedná o vady vzniklé nekonzistentním vrstvením během tisku či odpařením vzdušné vlhkosti v procesu tisku, čímž dochází ke vzniku malých dutin či pórů. (Obr. 5-8) Problém nekonzistentního vrstvení však nelze u metody FDM plně eliminovat, avšak problémům se vzdušnou vlhkostí se lze vyvarovat vysušením vzorku. Na daném snímku (Obr. 5-8) lze pozorovat vysokou kvalitu sjednocení vrstev tvořící téměř slitou strukturu. Z obrázku je také patrné, že vzorek byl přetržen křehkým lomem, vedeným od levé spodní části vzorku.



Obr. 5-8) Detail struktury lomu materiálu CPE CF112 s defekty výtisku

Z následujícího snímku (Obr. 5-9) lze vydedukovat, jakým způsobem došlo k lomům u vzorků vytištěných z materiálu CPE HG100. Ve všech třech případech se jednalo o lom křehký, který byl veden z velké části po směru vrstvení při tisku. Lze zde také pozorovat, že jednotlivé vrstvy nejsou tak dobře spojené jako v předchozím případě, což by mohlo vysvětlovat nižší modul pružnosti.



Obr. 5-9) Detail struktury lomu materiálu CPE HG100 vedeného ve směru vrstvení

Tahová zkouška testovaných polymerů za zvýšené teploty přinesla výsledky o řád nižší než v případě teploty pokojové. Díky zmíněné teplotě se vzorky z materiálu CPE HG100 dokonce staly tak tvárnými, že je nebylo možné pomocí trhacího stroje přetrhnout. I když se čelisti natahující testovací modely dostaly do svého maxima (Obr. 5-10), stále docházelo k podélné deformaci vzorku. Bylo tedy nutné ukončit testování před jejich destrukcí.



Obr. 5-10) Elastické chování materiálu CPE HG100 za teploty 80 °C

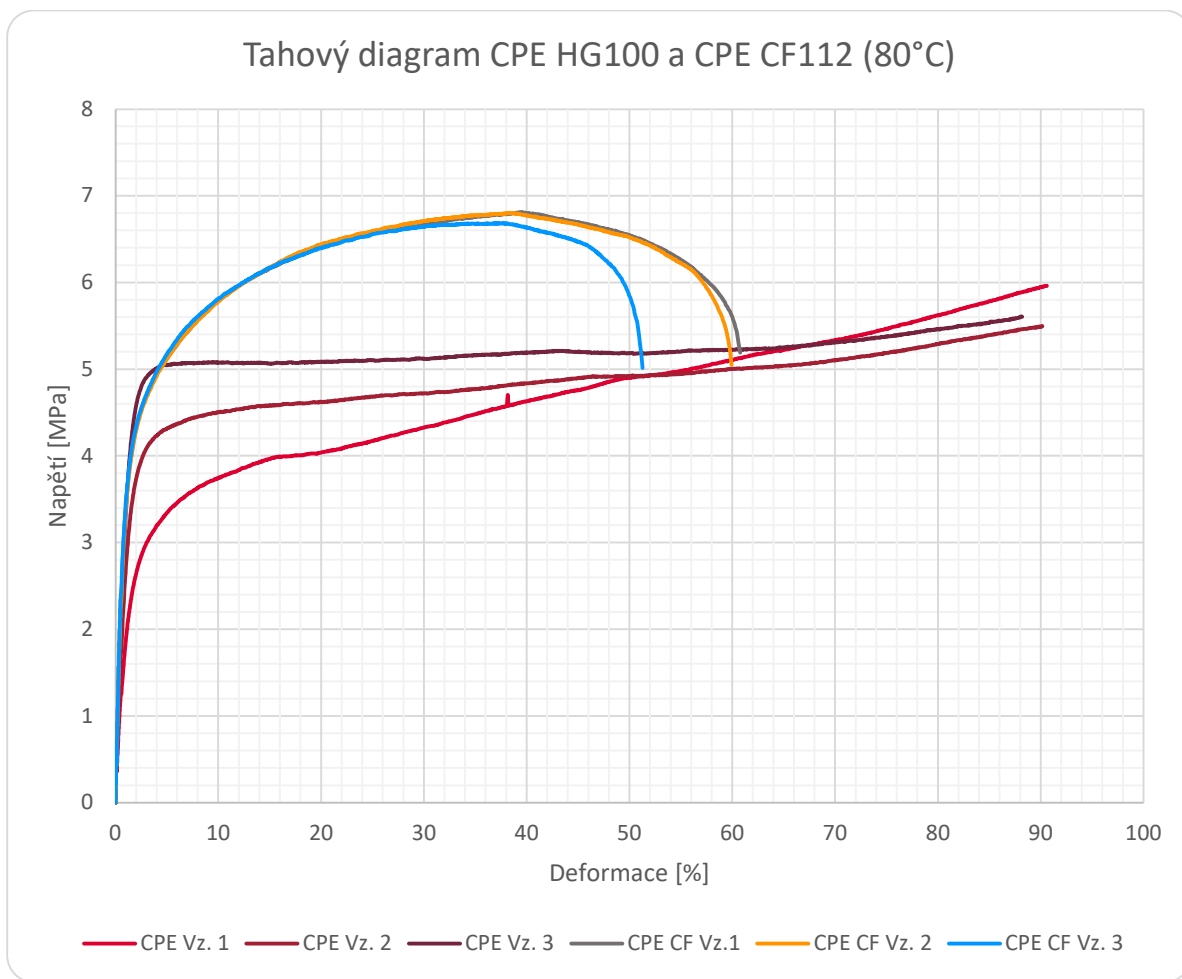
Na rozdíl od základní verze CPE materiálu se vzorky s karbonovou maticí i za zvýšené teploty přetrhnout podařilo. Data získaná z trhacího stroje jsou i s průměrnými hodnotami mechanických vlastností uvedena v Tab. 5-3.

Tab. 5-3) Výsledky tahové zkoušky materiálů CPE HG100 a CPE CF112 za teploty 80 °C

Materiál	Číslo vzorku	Modul pružnosti E [MPa]	Maximální zatěžující síla F _{max} [N]	Mez pevnosti R _m [MPa]
CPE HG100	1	110	240	6
	2	175	227	5,5
	3	203	235	5,8
	\bar{x}	162,66	234	5,76
CPE CF112	1	212	283	6,8
	2	220	278	6,8
	3	220	276	6,7
	\bar{x}	217,33	279	6,76

Hodnoty maximální pevnosti (R_m) jednotlivých materiálů se od sebe liší téměř ve stejném poměru jako za klasických pracovních podmínek. Analogicky je tomu tak i v případě modulu pružnosti (E), který je opět v případě CPE CF112 výrazně vyšší.

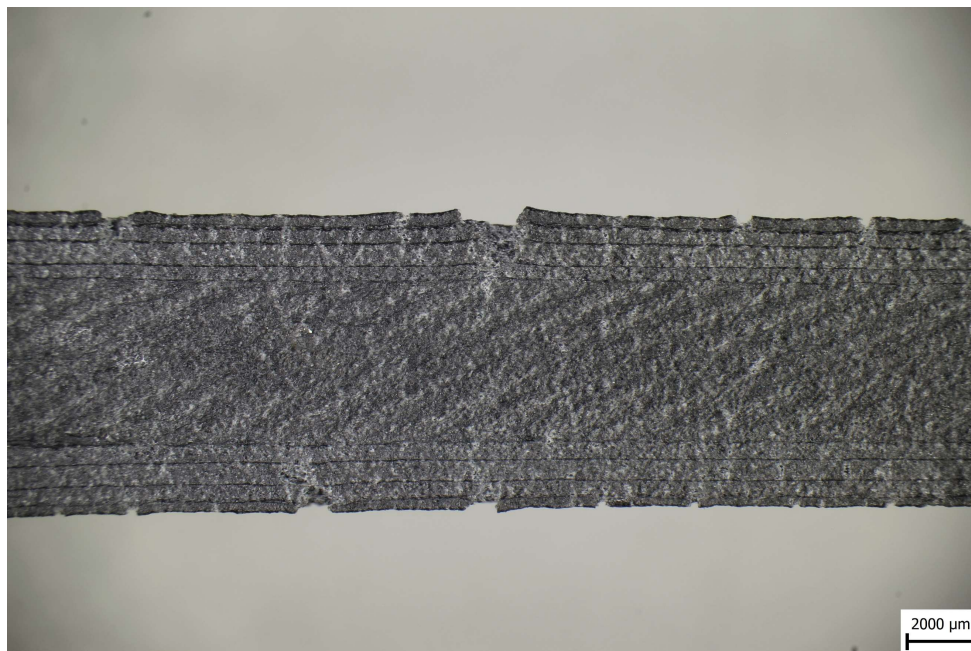
Tahový diagram testovaných vzorků za zvýšené teploty je zobrazen v Graf. 5-2, kde je zřetelně znát vliv karbonových vláken v CPE materiálu.



Graf 5-2) Tahový diagram materiálu CPE HG100 a CPE CF112 za zvýšené teploty

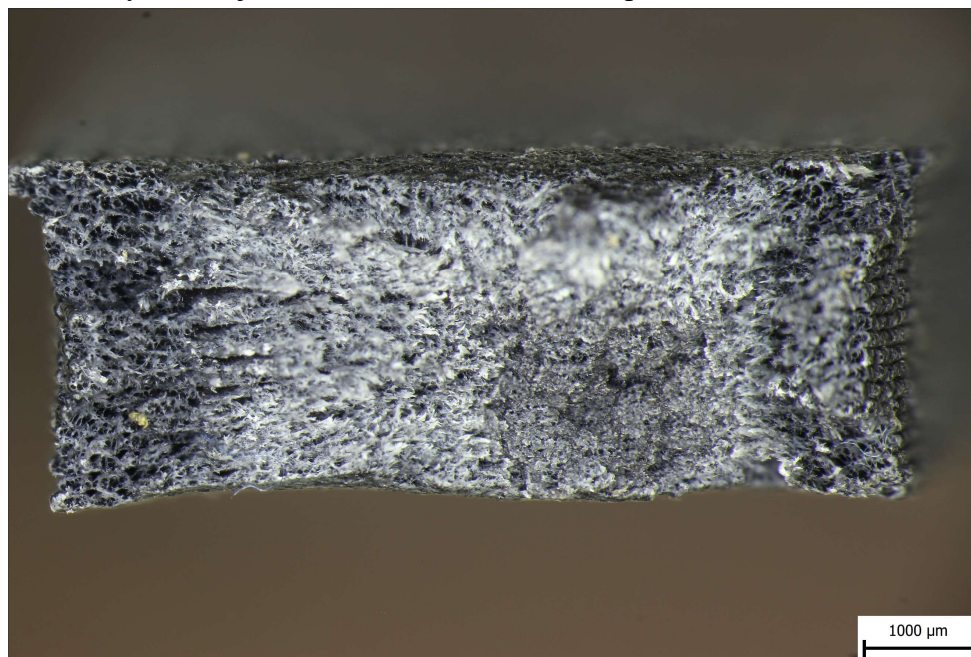
Poměrné rozdíly v maximální pevnosti a E modulu vzorků jsou velice podobné těm z předchozího testu za pokojové teploty, avšak veliký rozdíl je ve tvaru deformačních křivek. Jak je z výše prezentovaného grafu patrné, maximální naměřená pevnost byla u základního materiálu bez přidaných aditiv naměřena až při 90% deformaci, zatímco u uhlíkem naplněného materiálu tomu bylo při přibližně 38% prodloužení. Počáteční přímkový úsek, příslušící pružné deformaci, se v případě základního materiálu změnil na deformaci trvalou téměř skokově, zatímco materiál s uhlíkovým aditivem se v tomto ohledu projevoval spíše postupnější změnou. Z grafu je také zřejmé, že u materiálů CPE HG100, velice záleželo na konkrétním vzorku. Rozdíl v naměřeném napětí při 5% deformaci je přibližně 1,5 MPa, což odpovídá 30% rozptylu mezi vzorky v dané fázi zatěžování.

Přetržené vzorky s uhlíkovými vlákny byly následně analyzovány pod mikroskopem k rozboru typu lomu a lomové struktury. Jak je z Obr. 5-11 patrné, k přetržení vzorků docházelo vlivem šířících se trhlin v kolmém směru na směr osy zatěžování. Tyto trhliny vznikaly po celé zúžené části vzorku, avšak jejich počátek byl z velké části tvořen od spodní strany (od první vrstvy při tisku) zkušebního modelu.



Obr. 5-11) Detail trhlín přetrženého vzorku z materiálu CPE CF112 za zvýšené teploty

Z Obr. 5-12 je patrné, že tyto trhliny byly důsledkem tvárných lomů šířící se od okrajů zkušebních vzorků. I na tomto snímku lze pozorovat, že se vlivem odpaření vlhkosti tvořily ve výtiscích dutiny, avšak jsou hůře detekovatelné kvůli plastické deformaci vzorků.



Obr. 5-12) Detail lomu přetrženého vzorku z materiálu CPE CF112 za zvýšené teploty

Srovnání vzorků z tahové zkoušky z materiálu CPE HG100 (vlevo) a CPE CF112 (vpravo) je zobrazeno na Obr. 5-13, kde jsou zkušební modely rozděleny do skupin. Nejvýše jsou modely, které nebyly podrobeny tahové zkoušce a jsou přiloženy pro účely srovnání původní velikosti výtisku. Druhou skupinou jsou vzorky, které byly testovány tahovou zkouškou dle normy ČSN EN ISO 527-1 za pokojové teploty. Při porovnání přetržených vzorků je zde patrné, že lom vzorků s uhlíkovým aditivem vedl téměř kolmo k ose zkušebního modelu, avšak u výtisků ze základního materiálu tomu bylo vždy po směru vrstvení materiálu. Poslední skupina představuje vzorky natahované za zvýšené teploty (80 °C), kdy, jak bylo zmíněno, nebylo možné u vzorků z materiálu CPE HG100 dosáhnout přetržení.



Obr. 5-13) Porovnání všech vzorků se základem CPE z tahové zkoušky
CPE HG100 (vlevo), CPE CF112 (vpravo)

5.2.2 Výsledky zkoušky rázové a vrubové houževnatosti

Dynamická zkouška rázové houževnatosti dle normy ČSN EN ISO 179-1 proběhla pomocí Charpyho kladiva, které přerazilo všech 50 zkušebních modelů. Rázová houževnatost (a_{cU}) byla úspěšně naměřena u materiálu PET-G a CPE společně s uhlíkovými variantami. U materiálu Nylon FX256 se ovšem vzorek nepodařilo přerazit ani kladivem 10,8 J (Jak bylo predikováno). Z toho důvodu byla u dvojice Nylon FX256 a Nylon CF15 testována vrubová houževnatost (a_{cA}). Bylo tedy nutné vytvořit příslušný vrub dle zmíněné normy a přeražení vzorků opakovat. Zvolen byl typ vrubu A, jehož geometrie je zobrazena na Obr. 4-8. Šířka vzorku pod vrubem byla stanovena na $8,0 \pm 0,2$ mm.

Před samotným zahájením měření bylo nutné změřit velikost energie, která je spotřebována vlivem tření mechanismu. Tato hodnota musí být tedy odečtena od celkové energie naměřené při každém přeražení. Výsledky z měření tření jsou shrnuty v Tab. 5-4.

Tab. 5-4) Výsledky měření energie tření

Číslo měření	Velikost energie tření [J]
1	0,016
2	0,013
3	0,015
4	0,013
5	0,015
\bar{x}	0,0144

Průměrná hodnota \bar{x} byla následně použita pro odečtení energie vlivu tření od každé z naměřených hodnot po přeražení vzorku.

Postupným přerážením všech vzorků bylo docíleno výsledků v podobě naměřených energií vynaložených k přerážení i typu přerážení. Výsledky jsou uvedeny v Tab. 5-5 resp. Tab. 5-6, a poté graficky znázorněny v pruhovém grafu 5-3, kde je porovnána velikost rázové houževnatosti (a_{cU}) materiálů PET-G, PET-G CF Jet, CPE HG100 a CPE CF112.

Tab. 5-5) Výsledky měření rázové houževnatosti s již odečtenou hodnotou energie tření

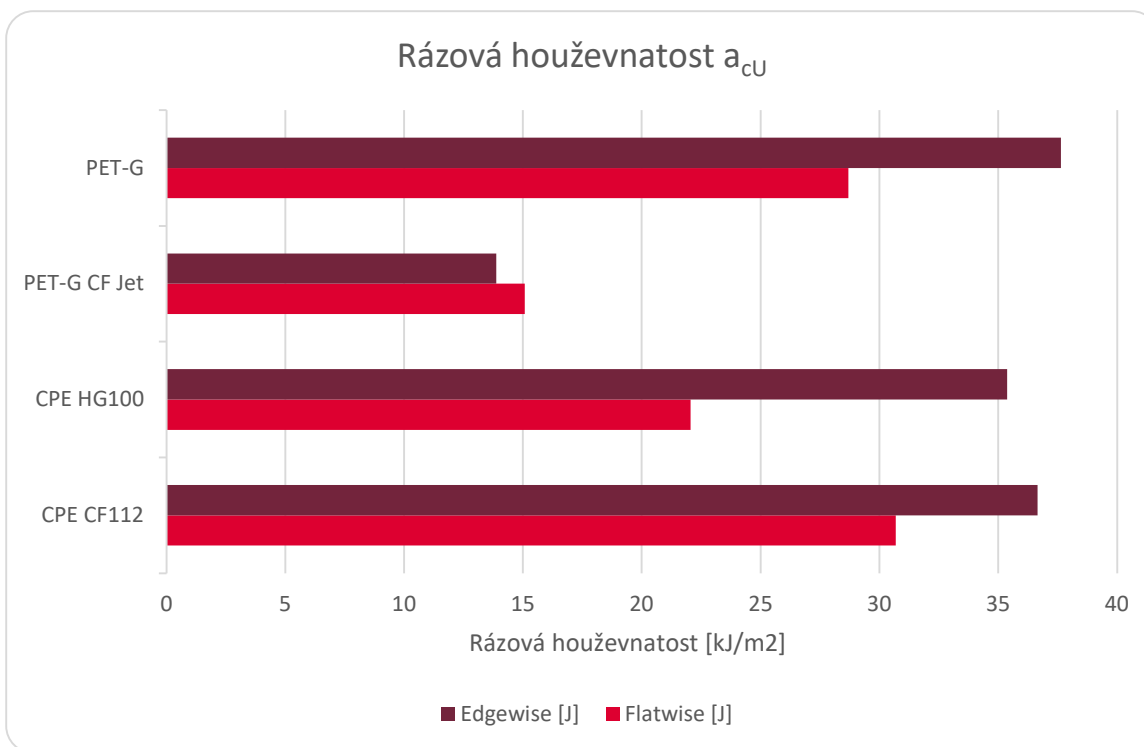
Materiál	Číslo vzorku	Energie přerážení (f) [J]	Energie přerážení (e) [J]	Typ přerážení
PET-G	1	0,7966	0,6676	C
	2	2,2026	2,4486	C
	3	1,1536	2,6096	C
	4	0,7426	0,9266	C
	5	0,7716	0,8766	C
	\bar{x}	1,1478	1,5058	
	a_{cU} [kJ/m ²]	28,695	37,645	
PET-G CF Jet	1	0,6606	0,5826	C
	2	0,5656	0,5826	C
	3	0,5826	0,5406	C
	4	0,5586	0,5966	C
	5	0,5766	0,4026	C
	\bar{x}	0,5888	0,541	
	a_{cU} [kJ/m ²]	14,72	13,525	

(Pokračování tabulky 5-5 na dalším listě)

(Pokračování tabulky 5-5)

Materiál	Číslo vzorku	Energie přeražení (f) [J]	Energie přeražení (e) [J]	Typ přeražení
CPE HG100	1	0,7216	0,7966	C
	2	0,8296	1,0056	C
	3	0,7286	2,3946	C
	4	1,2326	0,5406	C
	5	0,8256	2,2656	C
	\bar{x}	0,8676	1,4006	
a_{cU} [kJ/m ²]	21,69	35,015		
CPE CF112	1	1,2756	1,6146	C
	2	1,0856	1,3006	C
	3	1,2186	1,4576	C
	4	1,3006	1,7876	C
	5	1,1866	1,0996	C
	\bar{x}	1,2134	1,452	
a_{cU} [kJ/m ²]	30,335	36,3		

Z výše uvedených dat lze vypožorovat, že ve všech případech se jednalo o lom úplný. Nutno však podotknout, že vzorek č. 3 materiálu PET-G a vzorek č. 1 materiálu CPE byl rozlomen na 3 velké kusy, kde ani jeden z lomů nebyl veden středem zkušebního modelu. Podobně tomu bylo i u vzorku č. 3 materiálu CPE, kdy byl model rozlomen na díly dva, avšak lom nebyl veden směrem od místa dopadu rázového kladiva, ale v oblasti hrany jedné z podpor vzorku.



Graf 5-3) Srovnání průměrných hodnot rázové houževnatosti testovaných materiálů

Jak je z grafu 5-3 patrné, vytištěné vzorky umístěné na podpěry s orientací Edgewise dokázaly až na materiál PET-G s uhlíkovými vlákny absorbovat výrazně více energie a projevíly tak vyšší rázovou houževnatost než vzorky přeražené v orientaci Flatwise. PET-G CF Jet však projevil značně nejmenší rozdíl mezi jednotlivými druhy orientací. Konkrétně o 1,195 kJ/m², což odpovídá přibližně 8,1 %. Zbylé materiály projevíly vliv na tento parametr 2krát až téměř 5krát větší. Co se týče sledovaného vlivu uhlíkových vláken na absorpci rázové energie, je zřejmé, že v případě materiálu se základem PET-G je rozdíl opravdu markantní. Rázová houževnatost PET-G CF Jet je při úderu kladiva na užší stranu vzorku přibližně poloviční. Tyto výsledky ukazují, že uhlíkové aditivum v PET-G materiálech činí výtisky výrazně křehčí.

Vzorek vytištěný z materiálu CPE HG100 jeví největší citlivost na orientaci vzorku při rázovém ohybu ze všech testovaných filamentů. Rozdíl činí přibližně 38 %. Co se týče této citlivosti u uhlíkové varianty CPE, je přibližně stejně velká, jako u materiálu PET-G.

Výrazně srovnatelnější výsledky vlivu karbonového aditiva, než tomu bylo u analýzy předešlé dvojice vykazují materiály CPE od firmy Fillamentum. CPE CF112 jeví dokonce vyšší odolnost vůči nárazu v obou orientacích přeražení vzorku než jeho základní verze. Výrazně vyšší je však schopnost absorpce rázové energie při umístění vzorků na podpěry „na plocho“, kdy uhlíková vlákna v materiálu CPE dokázaly zvýšit tuto odolnost o 8,645 kJ/m² tedy 28,5 %.

V níže uvedené tabulce 5-6 jsou uvedeny naměřené hodnoty energií vynaložených na přeražení zkušebních modelů s vrubem společně s typem přeražení. Ze zmíněných dat je patrné, že všechny vzorky se díky vrubu podařilo úspěšně přerazit. Vrubová houževnatost (a_{cA}) je měřena pouze s orientací vzorku Flatwise. Z toho důvodu nebyly v tomto případě pozorovány vlivy orientace na výslednou schopnost absorpce energie. Použito bylo i stejné rázové kladivo jako v předchozím případě, takže ztráta energie vlivem tření zůstala stejná.

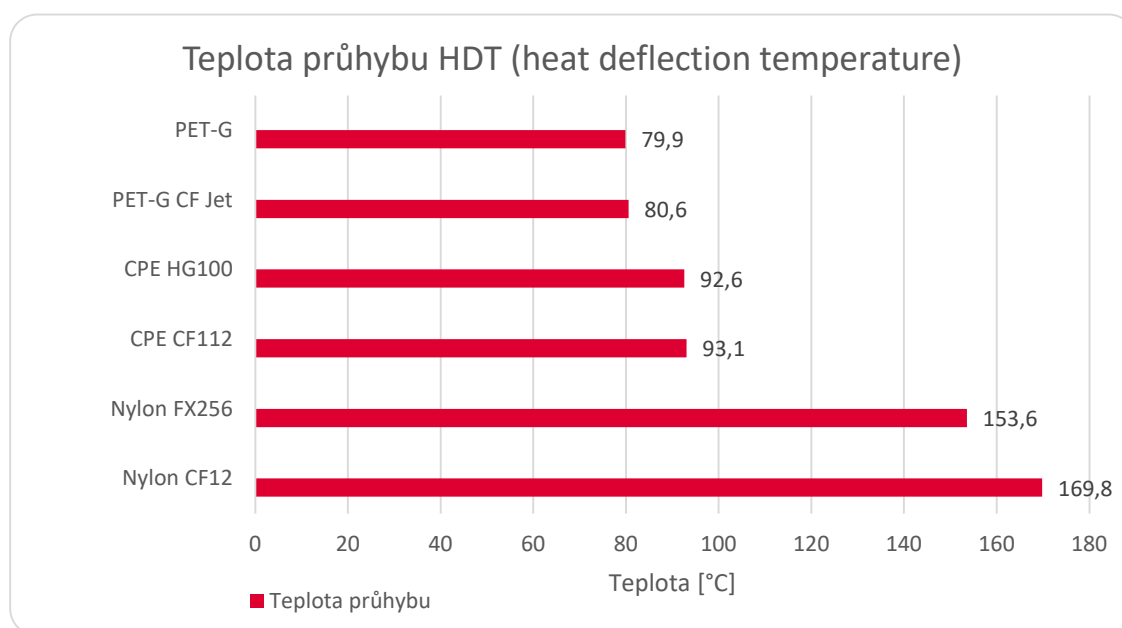
Tab. 5-6) Výsledky měření rázové houževnatosti s již odečtenou hodnotou energie tření

Materiál	Číslo vzorku	Energie přeražení (f) [J]	Typ přeražení
Nylon FX256	1	0,6824	C
	2	0,3414	C
	3	0,2924	C
	4	0,1694	C
	5	0,3664	C
	\bar{x}	0,3704	
	a_{cA} [kJ/m ²]	11,575	
Nylon CF15	1	0,1614	C
	2	0,1574	C
	3	0,1694	C
	4	0,1694	C
	5	0,1674	C
	\bar{x}	0,165	
	a_{cA} [kJ/m ²]	5,1563	

Z výše uvedené tabulky je dále patrné, že i v případě nylonových materiálů s karbonovým aditivem rapidně klesá houževnatost výtisku. Testované vzorky z materiálu Nylon CF15 absorbovaly v průměru o 6,4187 kJ/m² méně než testovací modely z Nylonu FX256.

5.2.3 Výsledky z termomechanické zkoušky teploty průhybu

Měření, které probíhalo jako napodobení normy ČSN EN ISO 75-1 probíhalo relativně bez problémů. Všechny testované vzorky materiálů byly vlivem statického ohybového a teplotního zatížení prohnuty o předem definovaný průhyb. Maximální teplota, které lze v klimakomoře dosáhnout činí 180 °C, což se ukázalo pro účely testu jako dostatečné. Kompletní výsledky jsou shrnuty v grafu. 5-4, kde je zaznamenána teplota dosažení definovaného průhybu, čímž byl celý test ukončen.



Graf 5-4) Sumarizace výsledků testu stanovení teploty HDT

Z Graf. 5-4 je patrné, že největší odolnost materiálu vůči statickému, termomechanickému zatěžování projevily materiály na bázi Nylonu. Teplota smluvního průhybu je u materiálu Nylon CF15 vyšší přibližně o 90 °C. Zajímavý je i sledovaný vliv uhlíkových vláken, který se u prvních čtyř testovaných materiálů projevil mírným zvýšením odolnosti o necelé jedno procento, avšak vliv karbonu ve struně z nylonu je, co se termomechanické odolnosti týče, o řád vyšší.

Bohužel nebylo možné z kapacitních důvodů měřit průběhy jednotlivých průhybu, avšak tato závislost průhybu na teplotě byla alespoň pozorována. Zatímco u materiálu PET-G, CPE HG100 a jejich karbonové verze projevili spíše rázový přechod mezi nulovým a smluvním průhybem (pouze několik desítek sekund), tak materiály se základem z nylonu byly prohýbány spíše lineárně. První známka průhybu se u materiálu Nylon FX256 projevila přibližně při 110 °C, a poté se průhyb postupně zvyšoval. Analogicky tomu bylo při sledování průhybu nylonu s uhlíkovou příměsí, kdy první vizuální projev deformace nastal okolo 118 °C. Dále se jako jeho základní verze průhyb lineárně zvyšoval až do průhybu smluvního. Hodnoty teplot průhybů s časy jejich docílení jsou shrnuty v Tab. 5-7.

Tab. 5-7) Výsledky termomechanické zkoušky za účelem zjištění teploty průhybu HDT

Materiál	Teplota průhybu HDT [°C]	Délka trvání testu [h:min:s]
PET-G	79,9	0:29:51
PET-G CF Jet	80,6	0:30:28
CPE HG100	92,6	0:36:30
CPE CF112	93,1	0:37:05
Nylon FX256	153,6	1:07:51
Nylon CF15	169,8	1:13:01

6 DISKUZE

Prvním z testů, které byly pro účely předložené práce vykonány, byl test tisknutelnosti. Ten byl proveden za pomoci FDM tiskárny DeltiQ 2, která testovala vlivy jednotlivých tiskových parametrů za účelem tvorby tiskových profilů a ověření kvality tisku vybraných materiálů s důrazem na pozorování vlivu uhlíkového aditiva. Negativní vliv karbonové příměsi se ukázal hned při tisku prvního z modelů (Teplotní věže), při které se modely při nízkých teplotách trysky stávaly velice křehkými. Tento test měl pomoci experimentálně určit teplotu trysky postupným zvyšováním její hodnoty po vytištění předem definované výšky. Díky zmíněnému negativu uhlíkového vlákna na základní materiál dokonce nebylo možné tisk z materiálu PET-G CF Jet dokončit. Model se v určité výšce tisku zlomil v jeho spodní části, což vedlo k ukončení testu. Zbylé uhlíkové varianty se základy PET-G, resp. Nylonu, se však podařilo úspěšně vytisknout bez další modifikace g-kódu. U filamentu PET-G CF Jet bylo v tomto testu také zjištěno, že se jeho ideální teplota trysky při tisku liší o 18 °C oproti horní hranici doporučeného intervalu teplot daného výrobcem. Druhý z testovaných modelů sloužil primárně k ověření tisknutelnosti velmi malých ploch v rámci jedné vrstvy a správnému nastavení retrakcí. Tento test byl pro každý z materiálů proveden ve čtyřech iteracích, kdy bylo ve většině případů čtvrtým tiskem ukončeno testování zmíněné schopnosti s uspokojivým výsledkem. Ovšem v případě materiálu CPE nebyl autor práce spokojen ani po 6. iteraci, kdy se na horní části modelu tvořily jemné prameny polymeru. V tomto testu se tedy ukázal vliv karbonového vlákna velice kladným, protože tisk z odvozeného materiálu CPE CF112 nebyl v tomto ohledu nijak náročný. Další pozitivum bylo ověřeno v testu kvality povrchů, kdy matný povrch u všech uhlíkových kompozitů měl vizuálně mnohem lepší výsledky než materiály základní. Finální test (tisk postavičky astronauta) kompletoval veškeré předešlé testy tisknutelnosti a při kvalitním výsledku ukončil tuto fázi testování.

Druhým z testů byla zkouška tahem dne normy ČSN EN ISO 527 za pokojové a zvýšené teploty. Kvůli pandemii COVID-19 nebylo možné provést testování v plánovaném rozsahu a výběr materiálů musel být zredukován na jednu dvojici. Vybrán byl filament CPE značky Fillamentum a jeho uhlíkem naplněná verze. Cílem bylo změřit vliv karbonu na pevnost (R_m) v závislosti na deformaci vzorku. Z výsledků tahové zkoušky za pokojové teploty plyne, že základní materiál CPE HG100 má vyšší mez pevnosti, než CPE CF112 přibližně o 7,5 %. Naměřená pevnost (R_m) činila u základního materiálu v průměru 43,26 MPa, což je hodnota srovnatelná s výsledky uváděnými výrobcem v technickém listě. Rozdílný výsledek však přineslo testování materiálu CPE CF112, kde je v technické dokumentaci vliv uhlíkového vlákna prezentován jako kladný. Výrobci uváděná maximální hodnota pevnosti činí 52,4 MPa (tedy vyšší, než je udávaná pevnost základního materiálu), avšak na vzorcích bylo autorem v průměru naměřeno pouze 40 MPa. Kladný vliv karbonového kompozitu byl však ověřen při měření modulu pružnosti (E), kdy jeho hodnota vzorostla o necelých 600 MPa. V tomto případě se autorovy výsledky maximální hodnoty E-modulu s výsledky výrobce téměř neliší.

Při analýze získaných dat byla upozorována anomálie v průběhu deformační křivky na dvou ze šesti vzorků, kdy došlo k mírnému prokluzu. Jeho výskyt autor přisuzuje defektům na testovacích modelech, vzniklých během procesu tisku. Tvorbu defektů (nežádoucích dutin či pórů), nelze při využití technologie FDM tisku nikdy zcela vyloučit. Velmi malé dutiny jsou tvořeny při nanášení jednotlivých vrstev polymeru, resp. vypařením vzdušné vlhkosti a jejich eliminace je spíše otázkou preprocessingu. Kompletní porovnání výsledků tahové zkoušky za pokojové teploty s daty uváděnými výrobcem filamentů je shrnuto v Tab. 6-1.

Tab. 6-1) Srovnání výsledků s daty výrobce (Fillamentum)

Materiál	Naměřená mez pevnosti (R_m) [MPa]	Udávaná mez pevnosti (R_m) [MPa]	Naměřený modul pružnosti (E) [MPa]	Udávaný modul pružnosti (E) [MPa]
CPE HG100	43,26	48*	1594,33	1860*
CPE CF112	40	37,7	2190	2200

(* - vzorek testovaný dle amerických norem ASTM)

Překvapivé výsledky přineslo testování dvojice materiálu při tahové zkoušce za teploty 80 °C. Testovací vzorky z materiálu CPE HG100 se nepovedlo díky elastickému chování při zvýšené teplotě přetrhnout, avšak byl zde výrazně zřetelný vliv uhlíkových vláken v materiálu CPE CF112 na termomechanické vlastnosti. Mez pevnosti (R_m) i modul pružnosti (E) se snížil v porovnání se vzorky měřenými za pokojové teploty o celý řád, avšak poměr hodnot meze pevnosti a Youngova modulu základního materiálu ku tomu s uhlíkovou maticí byl téměř nezměněn. Výrazná odlišnost testovaných materiálů byla však pozorována v průběhu deformačních křivek, kde maximální napětí na vzorku z CPE HG100 odpovídalo 90% deformaci (maximum dovolující rozsah měřicího stroje), zatímco nejvyšší hodnota napětí na testovacím modelu z CPE CF112 byla naměřena při 38% deformaci. Protože relativně nově představený testovaný materiál CPE CF112 nebyl dosud předmětem hlubšího zkoumání, nebylo s čím naměřená data porovnat. Měření by tak mohlo sloužit k budoucímu výzkumu dalších materiálů s uhlíkovými vlákny pro porovnání výsledků.

V pořadí třetím testem byla mechanická analýza rázové a vrubové houževnatosti za účelem zkoumání vlivu uhlíkových vláken na schopnost absorbovat rázovou energii. Po zanalyzování výsledků rázové zkoušky typu Charpy bylo zřejmé, že velikost energie nutné k přeražení vzorku velice záleží na orientaci vzorku vzhledem ke směru rázu. Tato skutečnost byla pozorována u třech ze čtyř testovaných materiálů, kde vymykající se materiál PET–G CF Jet projevil zmíněnou citlivost o poznání nižší než ostatní materiály. Největší rázovou houževnatost projevil materiál PET–G firmy Filament PM s průměrně naměřenou rázovou houževnatostí (a_{cU}) 37,645 kJ/m². Dalším v pořadí byla uhlíková varianta CPE (CPE CF112), jejíž rázová houževnatost činí (a_{cU}) 36,3 kJ/m². Tento výsledek však absolutně nekoresponduje s výsledky udávanými v technickém listu materiálu, kde je hodnota rázové houževnatosti nově představeného materiálu rovna 105,9 kJ/m². Téměř trojnásobný rozdíl ve srovnávaných hodnotách může být způsoben jinými parametry tisku, které mohou rázovou houževnatost velice ovlivnit. Bohužel však u výsledků firmy Filamentum nejsou parametry tisku vzorků uvedeny, takže hodnocení rozdílu je spíše předmětem k další diskuzi. Porovnání výsledků všech testovaných materiálů v porovnání s daty uvedenými v technických listech výrobců jsou shrnuty v Tab. 6-2.

Tab. 6-2) Porovnání výsledků všech testovaných materiálů s daty výrobců

Materiál	Naměřená maximální hodnota příslušné houževnatosti [kJ/m²]	Houževnatost uvedená výrobcem [kJ/m²]
PET–G (a_{cU})	37,645	11
PET–G CF Jet (a_{cU})	14,720	23
CPE HG100 (a_{cU})	35,015	Nepřeraženo*
CPE CF112 (a_{cU})	36,300	106
Nylon FX256 (a_{cA})	11,575	7
Nylon CF15 (a_{cA})	5,156	Neměřeno

(* - vzorek testovaný dle amerických norem ASTM; neznámé podmínky testu)

Sledovaný vliv uhlíkových vláken na schopnost absorpce rázové energie se v případě materiálů se základem PET-G projevil jako velice negativní. Rázová houževnatost, měřená při orientaci Edgewise (tedy při úderu rázového kladiva na širší stranu vzorku), u zmíněných materiálů klesla vlivem karbonového aditiva téměř o polovinu. Vliv karbonu na houževnatost vzorku se v podání dvojice materiálů se základem CPE ukázal jako pozitivní. Zatímco se měřená houževnatost vzorku při orientaci Edgewise téměř nelišila, u orientace „na plocho“ už byl rozdíl poměrně výrazný. Uhlíková vlákna dokázala zvýšit rázovou houževnatost vzorku o 28,5 %.

Protože se nepodařilo pomocí Charpyho kladiva přerazit nylonové vzorky, jak bylo predikováno, bylo na obou testovaných materiálech provedeno měření vrubové houževnatosti. Na střed vzorků byl pomocí obrážecího stroje vytvořen vrub typu A dle normy ČSN EN ISO 197-1eA a provedeno přeražení. Naměřená rázová houževnatost (a_{cA}) materiálu Nylon FX256 činí 11,575 kJ/m², což je v porovnání z technické dokumentace více, než výrobce uvádí. Firma Fillamentum nechala svůj nylonový materiál FX256 testovat se stejným typem vrubu a naměřená hodnota vrubové houževnatosti odpovídala 7 kJ/m². Vliv uhlíkové příměsi je zde dle naměřených výsledků podobného charakteru jako tomu bylo u rázové houževnatosti materiálu se základem PET-G. Projevil se tedy velmi negativně, kdy vrubová houževnatost (a_{cA}) vzorku z Nylonu CF15 klesla oproti základnímu materiálu Nylon FX256 více než dvojnásobně. Díky nutnosti tvorby vrubů je nerelevantní porovnat výsledky s výzkumem španělských vědců, kteří prováděli pouze zkoušku rázové houževnatosti.

Posledním ze série testů bylo testování materiálů napodobením normy ČSN EN ISO 75-1. Testování spočívalo v zavěšení závaží na střed testovacího tělesa podepřeného dvěma dřevěnými kvádry. Cílem měření bylo zjištění hodnoty HDT (heat deflection temperature) vypovídající o vlastnostech výtisku termomechanicky namáhaného 3-bodovým ohybem. Protože však nebylo možné z kapacitních důvodů provést měření na profesionálních strojích, došlo k řadě zjednodušení a omezení. Generované ohybové napětí mělo poloviční minimální hodnotu, než uváděla norma (0,45 MPa), podpěry nepodpíraly testované modely pouze tečně a nebylo možné měřit průběh deformace v závislosti na teplotě. I přes všechna zjednodušení bylo docíleno smysluplných výsledků, které se sice nedají porovnávat s daty uváděnými výrobcem materiálu, ale je alespoň možné jednotlivé materiály porovnat mezi sebou. Materiál PET-G dosáhl předem definovaného průhybu při 79,9 °C a jeho verze s karbonovým vláknem 80,6 °C. Rozdíl mezi naměřenými hodnotami není příliš velký, což udává i firma Filament PM, jejíž výsledky ze zkoušky dle ČSN EN ISO 75-1 se u obou materiálů pohybují okolo 70 °C. Podobný rozdíl mezi naměřenými a předpokládanými hodnotami nastal u testování materiálu CPE HG100 a CPE CF112, kdy se teplota průhybu při statickém zatížení pohybovala okolo 93 °C. Výrobce CPE filamentů v technické dokumentaci uvedl pouze teplotu HDT materiálu CPE HG100 rovnou 70 °C. Tato hodnota však byla naměřena dle normy ASTM 0648. U všech čtyřech testovaných materiálů vyšly výsledky základních a karbonem vyztužených materiálů velice podobné, avšak modely tištěné z filamentu s uhlíkovým aditivem vykazují teplotu HDT o 0,5 °C vyšší.

Třetí testovanou dvojicí materiálu, byly materiály se základem z nylonu, které dosáhly na neočekávaný výsledek. Výrobce udávaná teplota průhybu vzorku z Nylonu FX256 činí při zatížení 0,45 MPa 110 °C. Autorem testovaný vzorek však ve zjednodušeném testu dosáhl až na teplotu 153,6 °C. Vzorek s karbonem plněného nylonu dosáhl po hodině a třinácti minutách v klimakomůře teploty průhybu 169,8 °C při zatížení 0,22 MPa. Vliv uhlíkového vlákna se v tomto případě projevil rovněž kladně a zvýšil tak podle výsledků měření odolnost teplotně a staticky namáhaného vzorku o 16,2 °C. Nutno však dodat, že ani jeden z výsledků se neshodoval s daty uváděných výrobcí, což nejspíše zapříčinilo poloviční ohybové napětí působící ve středu vzorku a další zjednodušení testu. Tento test by pro zpřesnění výsledků výzkumu bylo vhodné opakovat s licencovaným měřícím vybavením dle zmíněné normy.

7 ZÁVĚR

Cílem předkládané práce bylo experimentálně stanovit ideální tiskové parametry pokročilých materiálů pro FDM/FFF 3D tisk a posoudit tak jejich tisknutelnost. Dále pomocí realizace experimentů analyzovat vliv karbonového aditiva na mechanické a termomechanické vlastnosti. Výsledkem bylo porovnání výsledků běžně používaných materiálů s jejich verzemi s uhlíkovými vlákny.

Rešeršní část byla věnována rozboru aditivních technologií a přehledu metod 3D tisku, zaměřeného převážně na metodu FDM/FFF, která byla využita pro účely bakalářské práce. V další části úvodní kapitoly byly rozebrány různé konstrukce FDM tiskáren, kde prioritně popsanou 3D tiskárnou byla ta s konstrukcí Delta. Dále byly představeny a porovnány komerčně dostupné filameny a jejich vlastnosti. Poslední sekce rešeršní části byla věnována studiu karbonu, jeho výrobě a jeho úloze ve filamentech na základě informací výrobců a dostupných výzkumů.

V další části práce byly rozebrány všechny konstrukční prvky ovlivňující samotnou tisknutelnost a kvalitu tisku. Rozebrán byl i vybraný software, který sloužil pro tvorbu strojových instrukcí 3D tiskárny. Následoval detailní rozbor vlastností konkrétních materiálů určených k testování. Škála vybraných strun čítala celkem 6 materiálů, jejichž polovinu tvořily kompozitní uhlíkové filameny (PET-G, PET-G CF Jet, CPE HG100, CPE CF112, Nylon FX256 a Nylon CF15). Následující část konkrétně popisovala postupy ověřování tisknutelnosti a tvorbu tiskových profilů pro další postupy práce. V závěrečné sekci této kapitoly byly vyčteny a popsány jednotlivé zkoušky testující mechanické a termomechanické vlastnosti výtisků.

Primárním cílem experimentální části bylo analyzovat rozdíly mezi výsledky základních materiálů a materiálů s přidanými uhlíkovými vlákny. Tento cíl byl splněn sérií čtyř testů, z nichž první byl věnován rozdílu kvality a náročnosti tisku vybraných materiálů. Tímto testem byl splněn i dílčí cíl identifikace stěžejních parametrů ovlivňující výsledné vlastnosti výtisků. Další 3 zkoušky odhalily vliv uhlíku na mechanické a termomechanické vlastnosti tištěných vzorků. Zkouška tahem prověřila rozdíly v pevnosti a modulu pružnosti uhlíkem plněného materiálu v porovnání s jeho základní verzí. Kvůli kapacitním důvodům nebylo možné změřit všechny testované materiály, ale pouze materiál CPE HG100 s jeho karbonovou variantou. Test tahové zkoušky byl proveden při různých teplotách (22 a 80 °C) pro zjištění rozdílu vlastností při tepelném zatížení. V dynamické zkoušce rázové houževnatosti byly kvůli silné anizotropii uhlíkových materiálů zvoleny 2 sady vzorků, kdy v prvním případě byly testovací modely přeraženy na užší straně vzorku, zatímco v případě druhé sady byl úder kladiva cílen na stěnu širší. Díky predikovanému neúspěchu měření dynamické houževnatosti u nylonových materiálů byly vzorky z tohoto filamentu testovány na vrubovou houževnatost. Zde už nebylo nutné dělit vzorky na dvě sady, protože vrub bylo možné vytvořit pouze na širší straně testovacího modelu.

Závěrečným testem, zkoumající termomechanické vlastnosti materiálu, bylo měření teploty průhybu při statickém zatížení vzorku 3-bodovým ohybem. Tento test nebylo možné provést s certifikovaným testovacím strojem, což bylo nejspíše důvodem ne příliš přesných výsledků. Tento test by bylo vhodné nad rámec bakalářské práce zopakovat dle normy a jeho výsledky upřesnit. Dále by bylo přínosné rozšířit škálu porovnávaných materiálů s přidáním aditiv a specifikovat konkrétní využití každého z nich.

Ze zmíněných výsledků je patrné, že vliv uhlíkových vláken na vlastnosti výtisků se liší podle základního materiálu, kterým je filament tvořen. Obecně je však možné vliv uhlíku shrnout následovně. Tisknutelnost je ovlivněna pouze zvýšením teploty tisků, mírným snížením rychlostí tisku a nutností použití speciální tvrzené trysky. Mez pevnosti vyztužených materiálů se vlivem uhlíku lehce snížila, ovšem při použití delších karbonových vláken či změnou typu vyztužování při tisku by mohly výtisky dosahovat výrazně lepších výsledků. Kladný vliv karbonového aditiva prokázalo termomechanické testování, kde ve veškerých provedených testech obstála uhlíková varianta materiálu lépe. Pro praktickou volbu materiálu před samotným tiskem je tedy nutné specifikovat podmínky použití výtisku a na základě toho stanovit, zda je využití výrazně dražších karbonových variant materiálů nezbytné.

Realizací zmíněných testů a analyzováním výsledků byly splněny veškeré primární i dílčí cíle. Výsledky dosud neměřených charakteristik u pokročilých materiálů přináší na poli výzkumu další rozšíření o možnosti porovnání s materiály běžně používanými. Naměřená data mohou být přínosná pro praktické využití při volbě materiálu před samotným 3D tiskem specifických dílců použitých v průmyslu. Výsledky tisknutelnosti mohou být využity pro tvorbu tiskových profilů stolních 3D tiskáren s podobným hardwarem jako v případě tiskárny použité pro účely předložené práce.

8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] KRATOCHVÍLOVÁ, Jitka. *3D tisk*. Vydání první. Přeložil Petra MILLAROVÁ. Ústí nad Labem: Univerzita J.E. Purkyně v Ústí nad Labem, 2015. ISBN isbn978-80-7414-936-8.
- [2] PÍŠKA, Miroslav. *Speciální technologie obrábění*. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2009. ISBN isbn978-80-214-4025-8.
- [3] KLOSKI, Liza a Nick KLOSKI. *Začínáme s 3D tiskem*. 1. vydání. Přeložil Jakub GONER. Brno: Computer Press, 2017. ISBN isbn978-80-251-4876-1.
- [4] *ISO/ASTM 52900:2015: Additive manufacturing — General principles — Terminology*. První. Francie: Nevím, 2015.
- [5] Přehled technologií 3D tisku. In: *Dk metal prominent* [online]. Libhošť: dk metal prominent, 2018 [cit. 2020-03-06]. Dostupné z: <http://www.dkmp.cz/o-nas/detail/Prehled-technologie-3D-tisku>
- [6] JONES, Rhys, Patrick HAUFE, Edward SELLS, Pejman IRAVANI, Vik OLLIVER, Chris PALMER a Adrian BOWYER. RepRap – the replicating rapid prototyper. *Robotica* [online]. 2011, **29**(01), 177-191 [cit. 2019-02-17]. DOI: 10.1017/S026357471000069X. ISSN 0263-5747. Dostupné z: http://www.journals.cambridge.org/abstract_S026357471000069X
- [7] Prusa Research: O nás. *Prusa Research* [online]. Praha: Prusa Research, 2018 [cit. 2020-03-06]. Dostupné z: <https://www.prusa3d.cz/o-nas/>
- [8] TAMBOR, Vojtěch. TriLab DQ2. *Trilab3d.com* [online]. Hradec Králové: TriLab, 2019 [cit. 2020-03-07]. Dostupné z: <https://trilab3d.com/deltiq-2/>
- [9] 3D tisk: jak funguje FDM/FFF tiskárna?. *Svět hardware* [online]. 2019, **2019**(), 1 [cit. 2020-03-07]. Dostupné z: <https://www.svethardware.cz/3d-tisk-jak-funguje-fdm-fff-tiskarna/48457-2>
- [10] Jaký materiál vybrat pro stolní 3D tisk?: Průvodce základními polymery napoví. *Blog 3D tisk* [online]. 2016, **2016**(), 1 [cit. 2020-03-07]. Dostupné z: <https://www.3d-tisk.cz/jaky-material-vybrat-pro-stolni-3d-tisk/>

- [11] PET-G. *Filament-PM* [online]. Haňovice: Plasty Mladeč, 2017 [cit. 2020-03-09]. Dostupné z: <https://www.filament-pm.cz/petg>
- [12] PETG Material. *Tractus 3D* [online]. Bernseweg: Tractus 3D, 2019 [cit. 2020-03-09]. Dostupné z: <https://tractus3d.com/materials/petg/>
- [13] Průvodce materiály. *Prusa3d.cz* [online]. Praha: PrusaResearch a.s., 2019 [cit. 2019-02-17]. Dostupné z: <https://www.prusa3d.cz/materialy/>
- [14] Materiálový slovník. *Materialpro3d* [online]. Brno: materialpro3d, 2017 [cit. 2020-03-09]. Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/materialovy-slovník/pet-g/>
- [15] CPE (Modified PETG). *Fillamentum: Addi(c)tive polymers* [online]. Hulín: Fillamentum, 2019 [cit. 2020-03-13]. Dostupné z: <https://fillamentum.com/collections/cpe-filament>
- [16] CPE. *Materialpro3d* [online]. Brno: materialpro3d, 2019 [cit. 2020-03-13]. Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/materialovy-slovník/cpe/>
- [17] Technický datový list: CPE. *Ultimaker* [online]. Utrecht: Ultimaker, 2017 [cit. 2020-03-13]. Dostupné z: <https://ultimaker.com/download/67656/TDS%20CPE%20v3.010-cze.pdf>
- [18] Nylon: 3D Printing Materials Overview. In: *Medium* [online]. Londýn: <https://medium.com>, 2019 [cit. 2020-03-18]. Dostupné z: <https://medium.com/@ZMorph/nylon-3d-printing-materials-overview-b482246ff7a6>
- [19] Nylon 618. *Omnexus* [online]. Paříž: Omnexus, 2018 [cit. 2020-03-18]. Dostupné z: <https://omnexus.specialchem.com/product/t-taulman-3d-nylon-618>
- [20] Materiálový slovník: Nylon. <https://www.materialpro3d.cz> [online]. Brno: materialpro3d, 2019 [cit. 2020-03-18]. Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/materialovy-slovník/nylon/>
- [21] The strongest players in carbon fiber 3D printing today. *3ders: 3D printer and 3D printing news* [online]. 3ders, 2016 [cit. 2020-03-18]. Dostupné z: <http://www.3ders.org/articles/20160229-the-strongest-players-in-carbon-fiber-3d-printing-today.html>
- [22] EHRENSTEIN, Gottfried. *Polymerní kompozitní materiály*. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009. ISBN isbn978-80-86960-29-6.

- [23] LEGENDRE, André. *Uhlíkové materiály: od černé keramiky k uhlíkovým vláknům*. Vyd. 1. Praha: Informatorium, 2001. ISBN isbn80-86073-82-3.
- [24] How is carbon fiber made?. *Zoltek* [online]. Bringeton: Zoltek, 2007 [cit. 2020-04-01]. Dostupné z: <http://zoltek.com/carbon-fiber/what-is-carbon-fiber/>
- [25] CARBONX™ ABS+CF. In: *3DXTech: Additive manufacturing* [online]. USA: 3DXTech, 2017 [cit. 2020-06-22]. Dostupné z: <https://www.3dxtech.com/carbon-fiber-filaments/carbonx-abs-cf/>
- [26] PET-G CFJet: Filament 1,75 CFJet - PETG/CF černá s karbonovými vlákny 0,5 kg. *Filament PM* [online]. Chudobín: Filament PM, 2018 [cit. 2020-04-03]. Dostupné z: <https://www.filament-pm.cz/filament-1-75-cfjet-petg-cf-cerna-s-karbonovymi-vlakny-0-5-kg/p41>
- [27] CPE CF112 Carbon. *Fillamentum: Addi(c)tive polymers* [online]. Hulín: Fillamentum, 2019 [cit. 2020-04-03]. Dostupné z: <https://fillamentum.com/collections/cpe-cf112-carbon-filament/products/cpe-cf112-carbon>
- [28] Abrasives killing your nozzle. *E3D online: Your toolkit for everything 3D printing* [online]. Chalgrove: E3D online, 2015 [cit. 2020-04-03]. Dostupné z: <https://e3d-online.com/blog/2015/09/09/abrasives-killing-your-nozzle/>
- [29] Using Abrasive Filaments and 3D Printer Nozzle Wear. *3D Printing blog* [online]. Chalgrove: 3D Printing blog, 2015 [cit. 2020-04-03]. Dostupné z: <https://3dprinting-blog.com/tag/carbon-fiber-nozzle-wear/>
- [30] The Olsson Ruby. *Olssonruby* [online]. Stockholm: 3D Verkstan, 2019 [cit. 2020-04-03]. Dostupné z: <https://olssonruby.com/the-olsson-ruby/>
- [31] AJAY KUMAR, M., M.S. KHAN a S.B. MISHRA. Effect of machine parameters on strength and hardness of FDM printed carbon fiber reinforced PETG thermoplastics. *Materials Today: Proceedings*. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.01.291>. ISSN 2214-7853. Dostupné také z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785320303734>

- [32] NING, Fuda, Weilong CONG, Jingjing QIU, Junhua WEI a Shiren WANG. Additive manufacturing of carbon fiber reinforced thermoplastic composites using fused deposition modeling. *Composites Part B: Engineering*. 2015, **80**, 369-378. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.06.013>. ISSN 1359-8368. Dostupné také z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359836815003777>
- [33] LIU, Zhaobing, Qian LEI a Shuaiqi XING. Mechanical characteristics of wood, ceramic, metal and carbon fiber-based PLA composites fabricated by FDM. *Journal of Materials Research and Technology*. 2019, **8**(5), 3741-3751. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.06.034>. ISSN 2238-7854. Dostupné také z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2238785419301905>
- [34] DE TORO, Elena, Juana SOBRINO, Alberto MARTÍNEZ a Valentín EGUÍA. Analysis of the influence of the variables of the Fused Deposition Modeling (FDM) process on the mechanical properties of a carbon fiber-reinforced polyamide. *Procedia Manufacturing*. 2019, **41**, 731-738. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.09.064>. ISSN 2351-9789. Dostupné také z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2351978919311540>
- [35] Titan Extruder. *E3D online: Your toolkit for everything 3D printing* [online]. Chalgrove: E3D online, 2016 [cit. 2020-04-12]. Dostupné z: https://e3d-online.com/titan-extruder?gclid=Cj0KCQjw-Mr0BRDyARIsAKEFbeeQTeo6wXJ2IWYh2LrKfKvt1KkEd-1opn3xZfiUy9ouk2TYFmXdQvIaAqTYEALw_wcB
- [36] Jak tisknout na pláty se zrnitým práškovým povrchem?. *Josef Průša* [online]. Praha: PrusaResearch a.s., 2019 [cit. 2020-04-12]. Dostupné z: <https://josefprusa.cz/jak-tisknout-na-texturovanou-podlozku/>
- [37] Přejchodové teploty polyemrů. *Publi* [online]. Brno: Publi, 2016 [cit. 2020-04-24]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/06.html>
- [38] REDWOOD, Ben. How does part orientation affect a 3D Print?. *3D Hubs* [online]. Amsterdam, Nizozemí: 3D Hubs, 2016 [cit. 2020-04-11]. Dostupné z: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/how-does-part-orientation-affect-3d-print/#introduction>
- [39] Polymery. *Polymery* [online]. Publi.cz, 2015, **2015**, 25 [cit. 2020-06-11]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/Cover.html>

9 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

9.1 Seznam použitých zkratek

2D	Dvoudimenzionální
3D	Třidimenzionální
3DLac	Adhezní aplikátor
ABS	Akrylonitrilbutadienstyren
AM	Additive Manufacturing
ASTM	American Society for Testing and Materials
CAD	Computer aided design
CFRP	Carbon Fiber Reinforced Plastic
CNC	Computer numerical control
CO ₂	Oxid uhličitý
CPE	Co-polyester
DLP	Digital light processing
DMLS	Direct Metal Laser Sintering
EBM	Electron Beam Melting
FDM	Fused Deposition Modeling
FFF	Fused Filament Fabrication
HIPS	High impact polystyrene
ISO	Mezinárodní organizace pro normalizaci
Kevlar	Obchodní označení pro aramidová vlákna
LCD	Liquid Crystal Display
LOM	Laminated Object Manufacturing
Magigoo	Adhezní aplikátor
Nylon	Obchodní název pro Polyamid
PEI	Ultem
PA	Polyamid

PAN	Polyakrylonitril
PET	Polyethylentereftalát
PET-G	Polyethylentereftalát glykol
PLA	Polyactid acid
PVA	Polyvinylalkohol
RepRap	Replicating Rapid Prototyper
RP	Rapid Prototyping
SLA	Stereolitografie
SLS	Selective Laser Sintering
SLM	Selective Laser Melting
STL	Stereolitografie
TPE	Termoplastický elastomer
UAM	Ultrasonic Additive Manufacturing
UV	Ultrafialové záření

9.2 Seznam použitých veličin

R_m	MPa	Mez pevnosti
E	MPa	Modul pružnosti
a_{cU}	kJ/m^2	Rázová houževnatost
a_{cA}	kJ/m^2	Vrubová houževnatost

10 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

Obr. 2-1)	Vývoj a proces reverzního inženýrství	17
Obr. 2-2	Schéma principu fungování tiskárny SLA [5]	19
Obr. 2-3)	Metoda DLP [5]	19
Obr. 2-4)	Metoda SLS a DMLS [5]	20
Obr. 2-5)	Princip FDM tiskárny [5]	22
Obr. 2-6)	Prusa i3 MK3S [7].....	23
Obr. 2-7	a) TriLab DeltiQ2 s extruderem Titan b) Trilab DeltiQ2 s Direct extruderem [8] 24	
Obr. 2-8)	Tiskový prostor Delta tiskáren [8]Polar.....	24
Obr. 2-9)	Tiskárna Polar3DScara [9]	25
Obr. 2-10)	Tiskárna s konstrukcí Scara [9].....	25
Obr. 2-11)	Porovnání vlastností standartních materiálů [10].....	26
Obr. 2-12)	Příklady vytištěných modelů z materiálu PET-G [13]	27
Obr. 2-13)	a) CPE HG100 Design pantu b) Funkční mechanicky odolný čep se závitem a maticí [15] 28	
Obr. 2-14)	Mechanicky namáhané díly z polyamidu [18]	29
Obr. 2-15)	Ideální grafitová struktura uhlíkového vlákna [22].....	30
Obr. 2-16)	Schéma procesu spřádání [23]	31
Obr. 2-17)	Snímek komerčního zoxidovaného vlákna [25]	31
Obr. 2-18)	Schéma výroby uhlíkových PAN-vláken [22].....	32
Obr. 2-19)	Porovnání karbonového vlákna s lidským vlasem [25]	33
Obr. 2-20)	Srovnání uhlíkových vláken dle mechanických vlastností bezprostředně po výrobě [22].....	33
Obr. 2-21)	Srovnání mechanických vlastností nejpoužívanějších materiálů [23]	34
Obr. 2-22)	Vytištěné modely z běžně používaných materiálů s příměsí uhlíkových vláken [27] [28].....	35
Obr. 2-23)	Porovnání opotřebované trysky (vlevo) a nepoužité trysky (vpravo) [30] .	36
Obr. 2-24)	Srovnání mosazné trysky (vlevo) a trysky z tvrzené ocele (vpravo) po protlačení 250 g abrazivního materiálu [29]	36

Obr. 2-25)	Rubínová tryska The Olsson Ruby společnosti 3DVerkstan [31]	36
Obr. 4-1)	Tiskárna DeltiQ2 značky TriLab [8]	39
Obr. 4-2)	a) Titan extruder společnosti E3D b) Motor s montážním schématem extruderu Titan [35]	40
Obr. 4-3)	Tisková podložka Trilab PrintPad [8]	41
Obr. 4-4)	Tisková hlava DeltiQ 2 [8]	42
Obr. 4-5)	Vizualizace modelu pro určení ideální teploty trysky (Teplotní věž)	48
Obr. 4-6)	Model určený k testování retrakcí	48
Obr. 4-7)	Krychle testující kvalitu povrchů	49
Obr. 4-8)	Model určený k finálnímu testu (postavička astronauta)	49
Obr. 4-9)	Schéma rozměrů testovaného tělesa 1A	50
Obr. 4-10)	Snímek modelů pro tahovou zkoušku ze sliceru Ultimaker Cura 4.5 – orientace modelů	51
Obr. 4-11)	Trhací stroj Zwick s vyhřívanou komorou	52
Obr. 4-12)	Uložení vzorku mezi podpěry	53
Obr. 4-13)	Schéma orientace testovaných těles a směru rázu	54
Obr. 4-14)	Geometrie typů vrubů	55
Obr. 4-15)	Snímek orientace tisku vzorků pro zkoušku rázové houževnatosti	55
Obr. 4-16)	Snímek vytištěných vzorků z materiálu Nylon CF15 za využití funkce Brim	56
Obr. 4-17)	Testovací stroj značky Zwick pro měření rázové houževnatosti	56
Obr. 4-18)	Fotografie připravených vzorků pro zjištění teploty průhybu při zatížení HDT	57
Obr. 5-1)	Defekty tvořené ucpáním trysky během tisku	59
Obr. 5-2)	Test kvality povrchů materiálu PET–G CF Jet	59
Obr. 5-3)	Modely ve finální iteraci vývoje tiskových profilů pro materiál PET–G CF Jet	60
Obr. 5-4)	Nežádoucí tvorba vláken polymeru při testu retrakcí	60
Obr. 5-5)	Modely ve finální iteraci vývoje tiskových profilů pro materiál CPE CF112	61
Obr. 5-6)	Snímek z tisku testovacího modelu s využitím funkce Brim	62
Obr. 5-7)	Detail na průběh tisku s vysokou kvalitou povrchů materiálu Nylon CF15...	62

Obr. 5-8)	Detail struktury lomu materiálu CPE CF112 s defekty výtisku	65
Obr. 5-9)	Detail struktury lomu materiálu CPE HG100 vedeného ve směru vrstvení...	65
Obr. 5-10)	Elastické chování materiálu CPE HG100 za teploty 80 °C	66
Obr. 5-11)	Detail trhlin přetrženého vzorku z materiálu CPE CF112 za zvýšené teploty 69	
Obr. 5-12)	Detail lomu přetrženého vzorku z materiálu CPE CF112 za zvýšené teploty 69	
Obr. 5-13)	Porovnání všech vzorků se základem CPE z tahové zkoušky	70
Graf 5-1)	Tahový diagram materiálu CPE HG100 a CPE CF112 za pokojové teploty .	64
Graf 5-2)	Tahový diagram materiálu CPE HG100 a CPE CF112 za zvýšené teploty ...	68
Graf 5-3)	Srovnání průměrných hodnot rázové houževnatosti testovaných materiálů ..	74
Graf 5-4)	Sumarizace výsledků testu stanovení teploty HDT	76

11 SEZNAM TABULEK

Tab. 4-1) Srovnání vybraných filamentů pro FDM/FFF 3D tisk.....	43
Tab. 4-2) Srovnání tiskových parametrů materiálů	44
Tab. 4-3) Rozměry testovaného vzorku	51
Tab. 4-4) Rozměry zkušebního tělesa	54
Tab. 4-5) Rozměry zkušebního tělesa	57
Tab. 5-1) Přehled základních tiskových parametrů	58
Tab. 5-2) Výsledky tahové zkoušky materiálů CPE HG100 a CPE CF112 za pokojové teploty	63
Tab. 5-3) Výsledky tahové zkoušky materiálů CPE HG100 a CPE CF112 za teploty 80 °C	67
Tab. 5-4) Výsledky měření energie tření	71
Tab. 5-5) Výsledky měření rázové houževnatosti s již odečtenou hodnotou energie tření ..	72
Tab. 5-6) Výsledky měření rázové houževnatosti s již odečtenou hodnotou energie tření ..	75
Tab. 5-7) Výsledky termomechanické zkoušky za účelem zjištění teploty průhybu HDT	77
Tab. 6-1) Srovnání výsledků s daty výrobce (Fillamentum)	79
Tab. 6-2) Porovnání výsledků všech testovaných materiálů s daty výrobců	80

12 SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1: Technický list PET–G (Filament PM)

Příloha 2: Technický list PET–G CF Jet Carbon (Filament PM)

Příloha 3: Technický list CPE HG100 (Fillamentum)

Příloha 4: Technický list CPE CF112 (Fillamentum)

Příloha 5: Technický list Nylon FX256 (Fillamentum)

Příloha 6: Technický list Nylon CF15 (Fillamentum)