

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ
ÚSTAV MATERIÁLOVÉHO INŽENÝRSTVÍ



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

MATERIÁLY PRO 3D TISK KOMPOZITŮ
MATERIALS FOR FILAMENT/BASED COMPOSITE PRINTING

AUTOR: Václav Voltr

STUDIJNÍ PROGRAM: Teoretický základ strojního inženýrství

VEDOUCÍ PRÁCE: prof. RNDr. Petr Špatenka CSc.

PRAHA 2021

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Voltr** Jméno: **Václav** Osobní číslo: **483924**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav materiálového inženýrství**
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**
Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Materiály pro 3D kompozity

Název bakalářské práce anglicky:

Materials for filament/based composite printing

Pokyny pro vypracování:

Provedete rešerši problematiky materiálů pro 3D - tisk z filamentu a state-of-art a metodiku přípravy těchto materiálů. Následně zhotovíte na laboratorním extrudéru takovýto filament, vytisknete vzorek a provedete analýzu jeho vlastností.

Seznam doporučené literatury:

- [1] EHRENSTEIN, Gottfried W. Polymerní kompozitní materiály. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009. ISBN 978-80-86960-29-6.
[2] IGNAZIO, BLANCO. THE USE OF COMPOSITE MATERIALS IN 3D PRINTING. JOURNAL OF COMPOSITE SCIENCE [ONLINE]. 2020, 8-10 DOSTUPNÉ Z: DOI:10.3390/JCS4020042
[3] SCHIRMEISTER, CARL G., TIMO HEES, ERIK H. LICHT A ROLF MÜLHAUPT. 3D PRINTING OF HIGH DENSITY POLYETHYLENE BY FUSED FILAMENT FABRICATION: ADDITIVE MANUFACTURING [ONLINE] 2019(28), 152-159. ISSN 2214-8604. DOSTUPNÉ Z: DOI: 10.1016/J.ADDMA.2019.05.003.
[4] NORMY DLE POUŽITÝCH ZKOUŠEK

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

prof. RNDr. Petr Špatenka, CSc., ústav materiálového inženýrství FS

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

Datum zadání bakalářské práce: **04.04.2021**

Termín odevzdání bakalářské práce: **25.07.2021**

Platnost zadání bakalářské práce: _____

prof. RNDr. Petr Špatenka, CSc.
podpis vedoucí(ho) práce

prof. RNDr. Petr Špatenka, CSc.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

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

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně a to výhradně s použitím pramenů a literatury, uvedených v seznamu citovaných zdrojů.

V Praze dne:

.....

Podpis

Anotace

Tato bakalářská práce se zabývá tématem 3D tisku kompozitních materiálů. Teoretická část je zaměřena na obecné informace o kompozitních materiálech, jsou zde srovnány mechanické a fyzikální vlastnosti vybraných vláken. Dále jsou popsány metody 3D tisku a vysvětlena problematika 3D tisku kompozitních materiálů. Praktická část bakalářské práce je soustředěna na přípravu kompozitní směsi, jejíž matrici tvořily různé formy lineárního nízkohustotního polyethylenu, a jako výztuž byla použita recyklovaná uhlíková vlákna. Tato kompozitní směs byla zpracována technologiemi tavením v peci, extruzí a 3D tiskem. Práce se dále zabývá analýzou mechanických vlastností tohoto kompozitního materiálu. Vzorky z připraveného kompozitního materiálu byly podrobeny zkoušce tahem a zkoušce rázem v ohybu.

Annotation

This bachelor thesis deals with the topic of 3D printing of composite materials. The theoretical part is focused on general information about composite materials, mechanical and physical properties of selected fibers are compared. Furthermore, the 3D printing methods are described and the problems of 3D printing of composite materials are explained. The practical part of the bachelor thesis is focused on the preparation of a composite blend, whose matrix consisted of different forms of linear low-density polyethylene, and recycled carbon fibers were used as reinforcement. This composite blend was processed by furnace melting, extrusion, and 3D printing technologies. The work also deals with the analysis of the mechanical properties of this composite material. Samples of the prepared composite material were subjected to tensile and flexural impact tests.

Klíčová slova

3D tisk
Filament
Kompozitní materiál
Nízkohustotní polyethylen
Uhlíková vlákna

Keywords

3D printing
Filament
Composite material
Low-density polyethylene
Carbon fibres

Poděkování

Rád bych touto cestou vyjádřil poděkování prof. RNDr. Petrovi Špatenkovi, CSc., za jeho cenné rady, doporučení a trpělivost při vedení mé bakalářské práce. Taktéž bych chtěl poděkovat Ing. Jakobovi Antoňovi a všem dalším pracovníkům z laboratoře plastů a kompozitů za odborné konzultace, vstřícnost, ochotu a pomoc při provedení experimentů.

SEZNAM ZKRATEK

| | |
|------|------------------------------------|
| CAD | počítačem podporované projektování |
| .STL | formát souboru pro software Slicer |
| UV | ultrafialové záření |

Metody 3D tisku

| | |
|-----|---------------------------------|
| CFF | continuous filament fabrication |
| FDM | fused deposition modelling |
| FFF | fused filament fabrication |
| SLA | stereolitografie |
| SLS | selective laser sintering |

SEZNAM VELIČIN

| | | |
|-----------------|---|----------------------------------|
| A | počáteční průřez | [mm ²] |
| a _{cU} | rázová houževnatost | [kJ.m ⁻²] |
| α | součinitel teplotní roztažnosti | [K ⁻¹] |
| E | modul pružnosti | [N.mm ⁻²] |
| E _c | korigovaná spotřebovaná energie při přeražení | [kJ] |
| ρ | hustota | [kg.m ⁻³] |
| ρ_{el} | měrný elektrický odpor | [Ω .cm] |
| σ_m | pevnost v tahu | [N.mm ⁻²] |
| F _m | maximální síla | [N] |
| δ | tažnost | [%] |
| ω | úhlová rychlost | [rad.s ⁻¹] |
| MFI | index toku taveniny | [g.10 min ⁻¹] |
| \bar{x} | aritmetický průměr | [dle jednotky počítané veličiny] |
| s | směrodatná odchylka | [dle jednotky počítané veličiny] |
| h | šířka vzorku pod vrubem | [mm] |
| b | tloušťka vzorku | [mm] |
| t | čas | [s] |
| T | teplota | [°C] |

Případné dolní indexy

| | |
|---|---|
| | fyzikální vlastnost je vztahována do směru vlákna |
| ⊥ | fyzikální vlastnost je vztahována ve směru kolmém na vlákna |

SEZNAM MATERIÁLŮ

| | |
|-------|--|
| ABS | akrylonitril-butadien-styren |
| PA | polyamid |
| PC | polykarbonát |
| PE-LD | nízkohustotní polyethylen |
| PE-HD | vysokohustotní polyethylen |
| PETG | polyethylentereftalát - modifikovaný glykolem |
| PLA | polylactic acid - kyselina polymléčná |
| PVA | polyvinylalkohol |
| IPA | isopropylalkohol |
| CF | uhlíková vlákna |
| HT | standardní vlákna |
| IM | středně-modulová vlákna |
| HM | vysoko-modulová vlákna |
| UHM | ultravysokomodulová vlákna |
| PE1 | Dowlex 2629.10UE (tj. lineární nízkohustotní polyethylen) |
| TPE1L | Dowlex 2629.10UE – plazmově modifikovaný s nízkým časem úpravy |
| TPE1H | Dowlex 2629.10UE – plazmově modifikovaný s vysokým časem úpravy |
| PE2 | RXP 1001 NATURAL LD/70/600 μ (tj. jiný lineární nízkohustotní polyethylen) |
| PE3 | směs PE1 a TPE1H v poměru 1:1 |
| PE4 | směs PE1 a PE2 v poměru 1:1 |
| PE5 | směs TPE1L a PE2 v poměru 1:1 |

OBSAH

| | |
|--|--------|
| Úvod | - 1 - |
| TEORETICKÁ ČÁST..... | - 2 - |
| 1. Kompozitní materiály | - 2 - |
| 1.1 Základní pojmy | - 2 - |
| 1.2 Rozdělení kompozitních materiálů | - 3 - |
| 1.2.1 Rozdělení kompozitních materiálů podle primární fáze | - 3 - |
| 1.2.2 Rozdělení kompozitních materiálů podle sekundární fáze | - 4 - |
| 1.3 Uspořádání vláken v matrici | - 5 - |
| 1.4 Vybraná vyztužující vlákna..... | - 6 - |
| 1.4.1 Skleněná vlákna | - 6 - |
| 1.4.2 Uhlíková vlákna | - 7 - |
| 1.4.3 Aramidová vlákna..... | - 9 - |
| 1.4.4 Porovnání zmíněných vláken | - 10 - |
| 1.5 Adheze | - 12 - |
| 1.5.1 Druhy adheze | - 13 - |
| 1.5.2 Měření adheze v kompozitech | - 15 - |
| 2. Technologie 3D tisku kompozitních materiálů | - 17 - |
| 2.1 Polymerní materiály pro 3D tisk | - 18 - |
| 2.2 Rozdělení technologií 3D tisku..... | - 21 - |
| 2.2.1 Vstupní materiál..... | - 21 - |
| 2.3 Aplikace aditivních technologií ve světě | - 26 - |
| PRAKTICKÁ ČÁST | - 27 - |
| Úvod do problematiky..... | - 27 - |
| 3. Použité materiály | - 28 - |
| 3.1 Matrice - polyethylen | - 29 - |
| 3.2 Výztuž – uhlíková vlákna..... | - 30 - |
| 3.3 Shrnutí vlastností použitých materiálů | - 30 - |
| 4. Postup přípravy vzorků k dalšímu zpracování | - 31 - |
| 5. Technologie zpracování vzorků..... | - 32 - |
| 5.1 Tavení v peci | - 32 - |
| 5.2 Extruze filamentu | - 32 - |

| | | |
|-------|--|--------|
| 6. | Použití připraveného filamentu | - 34 - |
| 6.1 | Tisk vlastního materiálu..... | - 35 - |
| 6.2 | Požadavky na tiskovou podložku | - 35 - |
| 6.3 | Nastavení parametrů tisku | - 36 - |
| 6.3.1 | Nastavení teplot..... | - 36 - |
| 6.3.2 | Nastavení rychlostí..... | - 37 - |
| 6.3.3 | Nastavení výšky vrstev | - 38 - |
| 6.3.4 | Shrnutí nastavených parametrů | - 39 - |
| 7. | Systém označování vzorků..... | - 39 - |
| 8. | Mechanické zkoušky..... | - 40 - |
| 8.1 | Zkouška tahem | - 40 - |
| 8.1.1 | Princip zkoušky..... | - 40 - |
| 8.1.2 | Vyhodnocení tahových vlastností | - 41 - |
| 8.2 | Zkouška rázem v ohybu | - 41 - |
| 8.2.1 | Princip zkoušky..... | - 41 - |
| 8.2.2 | Zkušební tělesa a vyhodnocení zkoušky..... | - 42 - |
| 9. | Vyhodnocení naměřených dat..... | - 43 - |
| 9.1 | Zkouška tahem | - 43 - |
| 9.1.1 | Tahová zkouška zkušebních těles zpracovaných tavením v peci..... | - 43 - |
| 9.1.2 | Tahová zkouška zkušebních těles zpracovaných v extruderu | - 44 - |
| 9.1.3 | Tahová zkouška zkušebních těles vytištěných na 3D tiskárně | - 45 - |
| 9.2 | Zkouška rázem v ohybu | - 46 - |
| 10. | Diskuse | - 47 - |
| 11. | Závěr | - 49 - |
| 12. | Bibliografie | - 50 - |
| | Seznam použitých obrázků | - 54 - |
| | Seznam použitých tabulek | - 55 - |
| | Seznam příloh..... | - 55 - |

Úvod

Tato bakalářská práce pojednává o relativně nové technologii 3D tisku kompozitních materiálů. Aditivní technologie, kam spadá i 3D tisk, se v poslední době velmi rozvíjejí. Tyto technologie se nevyužívají pouze ve strojírenství, stavebnictví a medicíně, dokonce se začínají používat i na Mezinárodní vesmírné stanici, odkud se analyzují vlastnosti materiálů vytištěných při nulové gravitaci. [1] Vývoj nespočívá jen v redukci času, za který se výrobek vytiskne, ale také v použitých materiálech. Dnešním trendem je právě tisknutí kompozitních materiálů. Ačkoliv technologie 3D tisku je velmi mladou technologií (vznikla ve druhé polovině 20. století), tisk kompozitních materiálů je daleko mladší – jedná se o problematiku, která je stará přibližně 10 let.

V dnešní době jsou na trhu jisté komerční kompozitní materiály určené pro 3D tisk, ovšem většinou se jedná o materiály s velmi vysokou pořizovací cenou, jejichž mechanické vlastnosti takovýmto cenám neodpovídají. K přípravě kompozitního materiálu pro 3D tisk je třeba přistupovat pečlivě. Faktor, který se nesmí zanedbat, je zajištění silné adheze mezi maticí a výztuží. Zajištění této adheze se projeví na výsledných mechanických vlastnostech a kompozitní materiál tak bude velmi efektivní. Před samotným tiskem je důležité správně nastavit tiskové parametry, které také zásadně ovlivní vlastnosti tištěné součásti. Takto vytištěný díl může mít velmi složitou geometrii a díky pečlivé přípravě kompozitního materiálu také výborné vlastnosti.

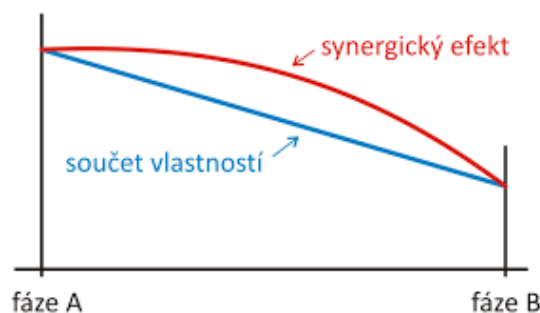
Hlavním cílem bakalářské práce je příprava kompozitní směsi. Připravená kompozitní směs bude zpracována extrudérem, za účelem výroby filamentu. Tento filament z kompozitní směsi bude vložen do 3D tiskárny. Poté budou vytištěna zkušební tělíska dle příslušných technických norem. Tato zkušební tělíska budou dále podrobena mechanickým zkouškám.

TEORETICKÁ ČÁST

1. Kompozitní materiály

1.1 Základní pojmy

Obecně můžeme termín „kompozit“ definovat jako materiál složený ze dvou nebo více odlišných složek (fází), které mají různé vlastnosti (mechanické, fyzikální, chemické). Primární (spojitá) fáze, zvaná matrice, zastává funkci pojiva, zajišťuje tedy spojení sekundární fáze v kompaktní celek. Matrice zároveň chrání sekundární fázi před účinky vnějšího prostředí. Sekundární (nespojité) fáze má většinou vyztužující funkci, proto se tedy tato fáze nazývá výztuží. Tato fáze v podstatě zajišťuje žádané vlastnosti kompozitního materiálu – pokud je cílem zlepšit mechanické vlastnosti, tak se jako výztuž mohou použít například skleněná vlákna, zatímco pokud chceme zlepšit elektrickou vodivost, tak použijeme elektricky aktivní saze. Výsledné vlastnosti kompozitního materiálu mohou být lepší, než by odpovídalo pouhému poměrnému sečtení vlastností jednotlivých složek – tento fakt se nazývá synergický efekt. Je však nezbytně nutné zmínit, že tento efekt platí jen za předpokladu dokonalé adheze mezi primární a sekundární fází. [2; 3]



Obr. 1 – Synergetický efekt uplatňující se u kompozitních materiálů [4]

Jednoznačné určení, zda materiál je nebo není složený (kompozitní), není zcela jednoduché, ovšem na základě dohody, která praví, abychom mohli vícefázový materiál zařadit mezi kompozity, musí platit:

- podíl výztuže musí být větší než 5 %
- vlastnosti výztuže a matrice se liší
- musí dojít k mechanickému smíchání fází [5]

Anizotropie

Kompozitní materiály je možné dle jejich vlastností v různých směrech rozlišovat na izotropní a anizotropní. Izotropní materiály mají stejné vlastnosti ve všech směrech. Příkladem mohou být kovy a polymery (bude však záviset, jakou technologií se tyto materiály zpracují; pokud budou tyto materiály zpracovány např. technologií 3D tisku,

jejich chování bude anizotropní). Anizotropní materiály mají odlišné vlastnosti v různých směrech. Protože jsou kompozity složené ze dvou a více chemicky odlišných fází, je zde zaručena nehomogenita a v závislosti na uspořádání vláken jsou kompozitní materiály většinou anizotropní. [6; 7]

1.2 Rozdělení kompozitních materiálů

V současné době je v nabídce relativně široké spektrum kompozitních materiálů. Rozdělení kompozitních materiálů je možné brát podle různých hledisek. Standardně se kompozity dělí podle použité matrice, podle typu a charakteru výztuže a mnohdy i podle způsobu výroby. [8]

1.2.1 Rozdělení kompozitních materiálů podle primární fáze

Jak už bylo naznačeno v kapitole 1.1, matrice je materiál, který obklopuje sekundární fázi. [3] Její úlohou je zaručení přenosu namáhání na vlákna, převedení namáhání z vlákna na vlákno, zajištění geometrické polohy vláken a tvarové stálosti výrobku a v neposlední řadě musí matrice chránit vlákna před vlivy okolí. Zásadní fakt pro kvalitu kompozitu je zajištění adheze na fázovém rozhraní matrice – vlákno. [6]

Na základě vybrané matrice rozdělujeme kompozity na:

- **Kompozity s kovovou maticí**

U této skupiny kompozitních materiálů se nejvíce využívají lehké slitiny (hliníku, hořčíku, titanu). Pro elektrotechnické účely se lze setkat i se slitinami mědi či stříbra. Výztuž pro tyto materiály mohou tvořit jak keramické (např. vlákna z karbidu křemíku), tak kovové (např. wolframová vlákna) materiály. [3; 9]

- **Kompozity s keramickou maticí**

Tato skupina kompozitních materiálů má lepší mechanické vlastnosti za vyšších teplot než kompozity s kovovou maticí. Matrici nejčastěji tvoří karbid a nitrid křemíku, oxidy křemíku a zirkonia. Jako sekundární fáze se zde používají dlouhá keramická vlákna, případně vlákna uhlíková. [3; 9]

- **Kompozity s uhlíkovou maticí**

V tomto případě tvoří matrici uhlík v různém stavu strukturní uspořádanosti. Nespojitou vyztužující fázi tvoří vlákna uhlíková. Tyto kompozitní materiály disponují unikátními vlastnostmi. V neoxidujícím prostředí jsou velmi odolné proti vysokým teplotám, zároveň se jejich pevnost s rostoucí teplotou zvyšuje. K porušení těchto materiálů nedochází křehkým katastrofickým lomem, ale postupným porušováním vláken. [3]

- **Kompozity s polymerní matricí**

U této skupiny tvoří matici buď termoplast (např. polypropylen, polyamid, polyetylen tereftalát atd.), reaktoplast, dříve známý jako termoset, (např. nenasycený polyester, epoxid) nebo elastomer (např. styren-butadien). Jako sekundární fáze se zde zejména používají vlákna různých délek, například ze skla, uhlíku, polymerů. [3]

Kvůli špatně kontrolovanému průběhu chemické síťovací reakce při vytvrzování reaktoplastů je současný trend přecházet na termoplastové matrice. Termoplasty mají zároveň proti reaktoplastům tu výhodu, že po ohřátí na určitou teplotu (teplota viskózního toku – pro amorfní termoplasty; teplota tání – pro semikrystalické termoplasty [10]) a následnému chladnutí nemění svoji strukturu, kdežto při zahřátí reaktoplastů na vysokou teplotu nedochází k tavení, ale k degradaci materiálu, struktura reaktoplastu se změní. Na druhou stranu mají termoplasty oproti reaktoplastům i nevýhody – např. z hlediska odolnosti vůči creepu (tečení) a vyšším teplotám jsou reaktoplasty odolnější. Co se týče ceny, termoplasty jsou levnější než reaktoplasty. [3; 11]

Polymerní materiály se často používají pro aditivní technologie (kam spadá i technologie 3D tisku). Polymerní materiály mají nižší hustotu než keramika a kovy, což je jejich výhodná vlastnost. Zároveň mají také značně nižší modul pružnosti v tahu, tudíž nejsou tolik tuhé jako například karbid křemíku. Polymery ovšem nejsou odolné proti vysokým teplotám a mají vysokou teplotní roztažnost. Na druhou stranu jsou většinou chemicky odolné, a také odolné proti korozi. Vzhledem k nízké hustotě polymerů mají kompozity s polymerní matricí velký potenciál nejen v leteckém průmyslu a kosmonautice, ale také v elektromobilitě. [3]

1.2.2 Rozdělení kompozitních materiálů podle sekundární fáze

V kapitole 1.1 je uvedeno, že sekundární fáze má většinou vyztužující funkci, to znamená, že při správném uložení vláken do matrice, se zvýší pevnost a tuhost kompozitu. Musí být ale splněny tyto podmínky: [6]

- Vyztužující vlákna musí být pevnější než matrice [6]

$$\sigma_{fiber} > \sigma_{matrix} \quad (1.1)$$

- Vyztužující materiál musí mít vyšší tuhost než matrice [6]

$$E_{fiber} > E_{matrix} \quad (1.2)$$

- Matrice se nesmí porušit dříve než vlákno [6]

$$\varepsilon_{matrix} > \varepsilon_{fiber} \quad (1.3)$$

, kde:

$\sigma_{fiber(m)}$ (popř. $\sigma_{matrix(m)}$) – pevnost vlákna (popř. matrice),

E_{fiber} (popř. E_{matrix}) – modul pružnosti vlákna (popř. matrice) v tahu,

$\varepsilon_{fiber(m)}$ (popř. $\varepsilon_{matrix(m)}$) – mezní prodloužení (tažnost) vlákna (popř. matrice).

Co se týče dělení kompozitních materiálů podle použitého tvaru výztuže, lze obecně rozdělit kompozity na částicové kompozity a na vláknové kompozity.

- **Částicové kompozity**

V tomto případě tvoří výztuž částice, u kterých se žádný z rozměrů velmi výrazně neliší. Těmito částicemi může být například grafit. Orientace částic může být náhodná anebo přednostně orientovaná – např. přednostní orientace dvourozměrných částic, jako jsou kupříkladu uhlíkové destičky. [3]

- **Vláknové kompozity**

U této skupiny kompozitních materiálů tvoří výztuž vlákna, u kterých je vždy jeden rozměr značně větší než zbylé dva rozměry, podle míry delšího rozměru se tyto kompozity rozdělují na dlouhováknové a krátkováknové. Toto dělení je založeno na aspektivním poměru, což je podíl délky vlákna k jeho průměru. [3]

Krátkováknové kompozity

Pro tento typ kompozitních materiálů dosahuje aspektivní poměr hodnot řádově 10^2 . V matici může být uloženo nahodile nebo s přednostní orientací. [3]

Dlouhováknové kompozity

V tomto případě je hodnota aspektivního poměru daleko větší než 10^2 . Vlákna dosahují délky desítek až stovek milimetrů. Jsou orientovaná náhodně nebo s přednostní orientací v ploše nebo prostoru anebo se jedná o vlákna kontinuální, která jsou zabudovaná v matici s jednosměrnou, dvousměrnou nebo trojsměrnou orientací. [3]

1.3 Uspořádání vláken v matici

Jak již bylo zmíněno výše, sekundární fáze může být v matici různě uspořádána, od tohoto uspořádání se odvíjí výsledné vlastnosti kompozitu, zároveň s tímto jevem souvisí i pojem izotropie a anizotropie. Většina uspořádání kompozitních materiálů je taková, že zapříčiní jejich anizotropii, což platí například u jednosměrně orientovaných vláken, kde vlákno v podélném směru vykazuje značně větší pevnost, než je jeho pevnost ve směru kolmém (záleží také na materiálu vlákna), naproti tomu kompozity s výztuží, která je v trojrozměrném prostoru orientována naprosto nahodile, musí mít ve všech směrech stejné vlastnosti. [8; 12]

1.4 Vybraná vyztužující vlákna

Vlákna se jako konstrukční prvky téměř vůbec nepoužívají, ale mají velký potenciál v kompaktní formě, jako je tomu u kompozitních materiálů. [6]

1.4.1 Skleněná vlákna

Skleněná vlákna jsou vlákna s pravidelným kruhovým průřezem (\varnothing 3,5 až 24 μm). Jsou tažena z roztavené skloviny ve sklářské peci. Na základě své amorfní struktury jsou skleněná vlákna izotropní, tudíž mají stejné vlastnosti ve všech směrech, čímž se liší od aramidových a uhlíkových vláken. Standardně se skleněná vlákna skládají z oxidu křemičitého (SiO_2), oxidu hlinitého (Al_2O_3), oxidu vápenatého (CaO), oxidu hořečnatého (MgO), oxidu boritého (B_2O_3), oxidu draselného (K_2O) a v neposlední řadě oxidu sodného (Na_2O). Podle procentuálního zastoupení vyjmenovaných oxidů se dále rozlišuje materiál skleněných vláken. Je označen jako: [6]

- **E – sklovina**

Je vynikající elektrický izolant s vysokou prostupností pro záření. Vlákna se označují jako E – vlákna (elektrická). [6]

- **S – sklovina (USA) = R – sklovina (Evropa)**

Tato skupina se vyznačuje vyšším obsahem SiO_2 , MgO , a Al_2O_3 , které navyšují pevnost materiálu. Proto se označují S (strength), popřípadě R (resistence). [6]

- **C – sklovina**

V tomto případě se jedná o vlákna, která se vyznačují svojí vysokou odolností proti kyselinám a proti chemicky agresivním látkám. [6]

- **ECR – sklovina**

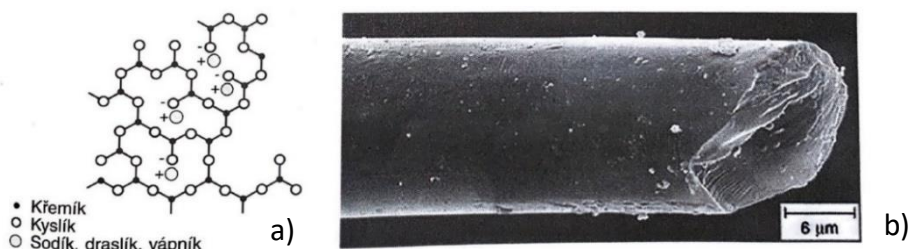
Těž známé jako bezborité skloviny, které mají vyšší dielektrickou konstantu, a to cca 7,0. Pro srovnání, dielektrická konstanta E-skloviny je 5,9 až 6,6. Bezborité skloviny tedy velmi špatně vedou elektrický proud. [6]

Vlastnosti těchto sklovin jsou shrnuty v tabulce 1.

Tabulka 1 - Důležité vlastnosti neupravených skleněných vláken [6]

| Sklovina | E | S (R) | C | ECR |
|---|--------|--------|--------|--------|
| Vlastnosti | | | | |
| Hustota [$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$] | 2,6 | 2,53 | 2,52 | 2,72 |
| Mez pevnosti v tahu *) [$\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$] | 3 400 | 4 400 | 2 400 | 3 440 |
| E-modul (modul pružnosti) [$\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$] | 73 000 | 86 000 | 70 000 | 73 000 |

*) Pokles až 50 % při zpracování na polotovary



Obr. 2 - Struktura a detail skleněného vlákna [6]

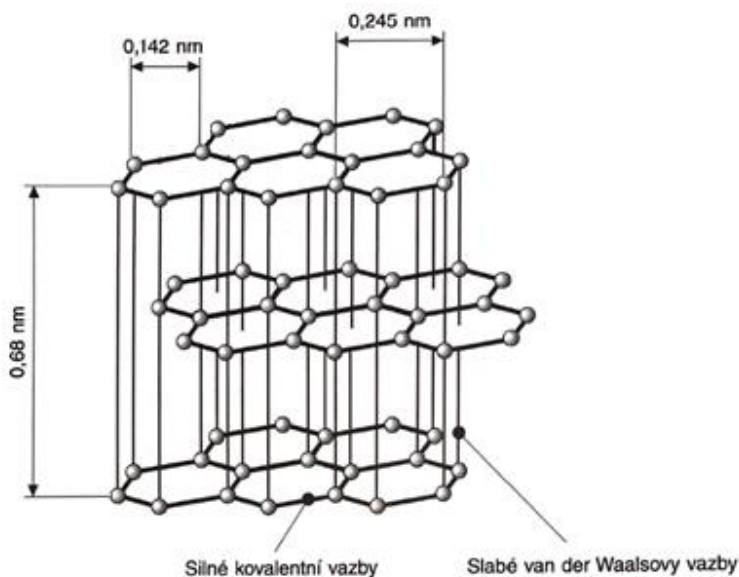
Díky silné kovalentní vazbě mezi atomy křemíku a kyslíku (viz Obr. 2a) je zaručena relativně vysoká pevnost a modul pružnosti. Skleněné vlákno je na obr. 2b.

1.4.2 Uhlíková vlákna

Uhlíková vlákna mohou být definována jako vlákna obsahující alespoň 90 % uhlíku. Už Thomas Alva Edison v roce 1879 zjistil, že uhlíková vlákna lze použít jako vlákna v elektrických lampách. Od této doby se tato vlákna začala zkoušet a postupně více využívat, jelikož mají obecně vynikající vlastnosti v tahu, nízkou hustotu, vysokou tepelnou a chemickou stabilitu při nepřítomnosti oxidačních činidel a dobrou tepelnou a elektrickou vodivost. [13]

Tato vlákna jsou vlákna technická, mají extrémně vysokou pevnost a tuhost, ale také nízkou tažnost. Průměr uhlíkových vláken se pohybuje mezi 5 a 10 μm . [6] Vynikající mechanické vlastnosti jsou dány jejich vysoce anizotropní hexagonální strukturou, kterou se grafit (alotropní modifikace uhlíku) vyznačuje. [3; 6]

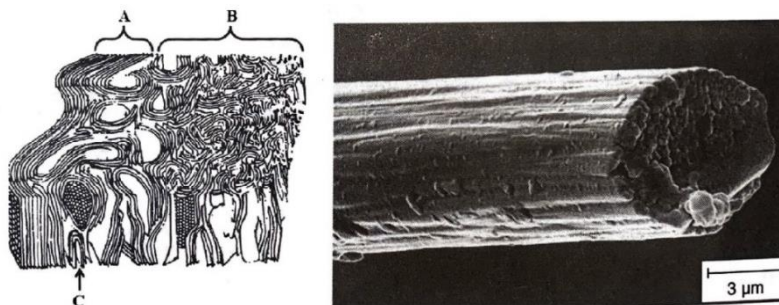
V bazálních hexagonálních rovinách grafitu jsou uhlíkové atomy mezi sebou vázány silnými kovalentními vazbami, zatímco mezi těmito rovinami působí slabé Van der Waalsovy síly, toto je názorně zobrazeno na Obr. 3. Ideální směr namáhání bude tedy ve směru kovalentních vazeb, protože se tak docílí vyšší pevnosti. [3; 6]



Obr. 3 - Ideální grafitová struktura uhlíkového vlákna [6]

Teoretické mechanické vlastnosti, které vycházejí z hodnot energie kovalentních vazeb ve směru vrstev, dosahují obrovských hodnot, a to až $10^6 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$ pro modul pružnosti v tahu a $10^5 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$ pro mez pevnosti v tahu. Tyto hodnoty odpovídají hodnotám měřeným rovnoběžně ve směru vrstev, hodnoty mechanických vlastností měřeny kolmo na roviny vrstev jsou značně nižší, což dokládá, že uhlíková vlákna jsou silně anizotropní materiály – např. modul pružnosti měřený v kolmém směru dosahuje hodnot okolo $4\cdot 10^3 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$, což je způsobeno absencí kovalentních vazeb. Anizotropie zde nepostihuje pouze mechanické vlastnosti, ale projevuje se i u vlastností fyzikálních, například na tepelné roztažnosti, která dokonce dosahuje i lehce záporných hodnot, pakliže ji zjišťujeme ve směru rovnoběžném s vrstvami uhlíku (ve směru osy vlákna). [6]

Struktura uhlíkových vláken není často dokonalá – ideální, jak ukazuje Obr. 3, vzhledem k těmto nedokonalostem, v uspořádání hexagonálních rovin mezi sebou (stupeň grafitizace), se budou výsledné vlastnosti uhlíkových vláken lišit. Vlastnosti uhlíkových vláken jsou tedy silně závislé na dokonalosti struktury a kvalita struktury je dána technologií výroby. [3]



Legenda k Obr. 4:

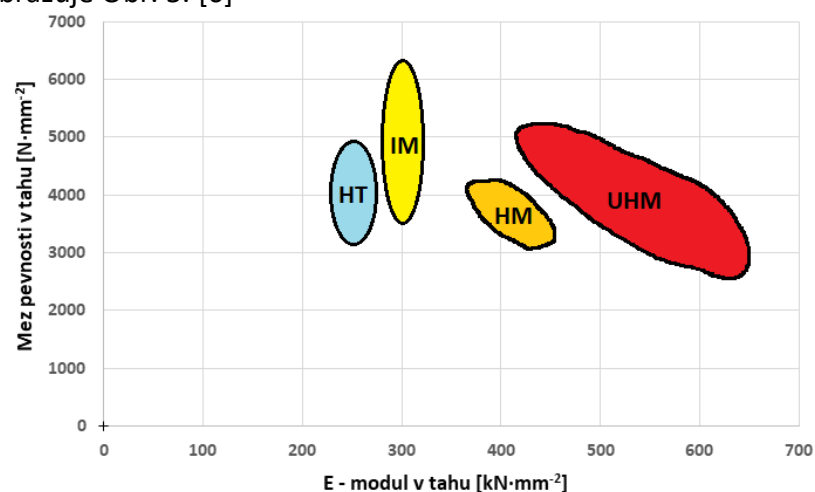
A – oblast kůry

B – oblast jádra

C – defekt vlásenky

Obr. 4 - Uhlíkové vlákno - mikrostruktura [6; 13]

Uhlíková vlákna jsou dělena podle závislosti modulu pružnosti a meze pevnosti v tahu, což zobrazuje Obr. 5. [6]



Obr. 5 - Rozdělení uhlíkových vláken (inspirováno dle [6])

Legenda k Obr. 5

HT – standardní uhlík. vlákna; IM – středně-modulová uhlík. vlákna;

HM – vysoko-modulová uhlík. vlákna; UHM – ultravysokomodulová uhlík. vlákna

1.4.3 Aramidová vlákna

Aramidová vlákna jsou organická vlákna vyznačující se svými makromolekulovými řetězci, které jsou orientovány do směru osy vlákna. Tyto řetězce tvoří jednak amidové (-CO-NH-) skupiny, a jednak aromatické skupiny. Mezi molekulami jsou velmi silné kovalentní vazby. Zásadou těchto vazeb se aramidová vlákna považují za velmi pevná. Kromě kovalentních vazeb se ve struktuře mezi makromolekulami vyskytují ještě vodíkové můstky (mezi atomy kyslíku a vodíku). Díky pravidelnému uspořádání aromatických jader a amidových skupin propojenými vodíkovými můstky jsou aramidová vlákna velmi tuhá. Významný zástupce této skupiny je tzv. para-aramid, který je spíše známý pod obchodním názvem Kevlar. Má vysokou pevnost v tahu a chová se houževnatě (na rozdíl od skleněných a uhlíkových vláken). [3; 6]



Obr. 6 - Detail aramidového vlákna [6]

Vzhledem k makromolekulárním řetězcům orientovaným do směru vlákna a mezimolekulárním silám na bázi vodíkových můstků se aramidová vlákna chovají silně anizotropně, což se projevuje jak v mechanických, tak ve fyzikálních vlastnostech. Tento fakt dokládá tabulka 2. [3]

Tabulka 2 - Vlastnosti jednosměrně vyztuženého epoxidového laminátu vysokomodulovým aramidovým vláknem (obsah výtzuže 65 až 70 objem. %) [6]

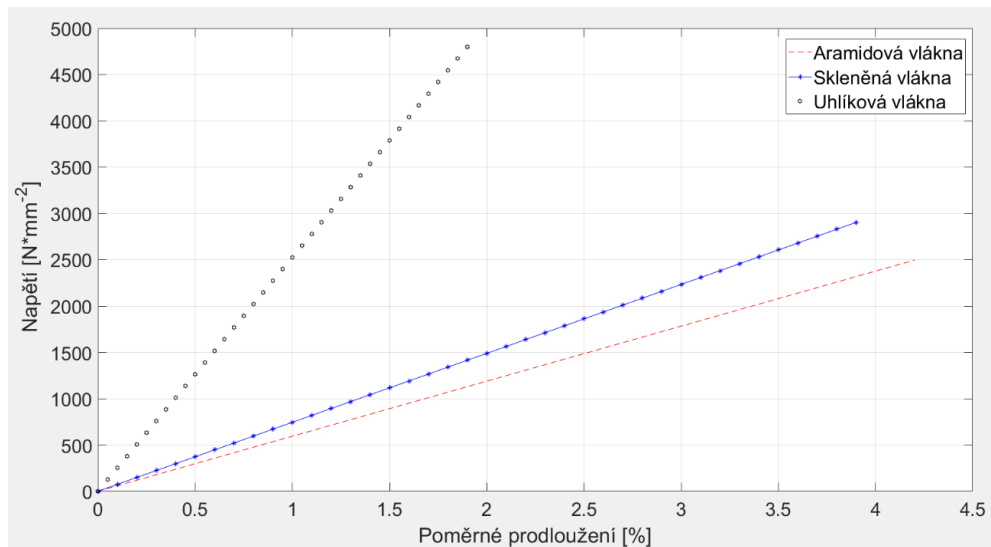
| Vlastnosti | Ve směru vláken () | | Kolmo na vlákno (⊥) | |
|---|----------------------|--------|---------------------|------|
| | Tah | Tlak | Tah | Tlak |
| E – modul [$\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$] | 80 000 | 80 000 | 6 500 | 5100 |
| Pevnost [$\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$] | 1 800 | 230 | 8 | 53 |
| Tažnost [%] | 2,2 | 0,5 | 0,16 | 1,4 |
| Příčné smrštění | 0,3 | 0,3 | 0,025 | 0,02 |
| Součinitel teplotní roztažnosti [K^{-1}] | $-2 \cdot 10^{-6}$ | | $70 \cdot 10^{-6}$ | |

Nevýhodou aramidových vláken je jejich citlivost na působení vody, pronikající voda zvyšuje pohyblivost řetězců a značně snižuje hodnotu modulu pružnosti. Další nepříznivou vlastností těchto vláken je jejich nízká adheze k matici, což by

zapříčinilo špatný přenos napětí z matrice na vlákna a kompozit by neplnil správně svou funkci. Adheze těchto vláken je často nižší než u ostatních vláken, na druhou stranu jsou tato vlákna nejlehčí ze všech ($\rho = 1,45 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$), díky čemuž dosahují vysoké měrné pevnosti. [6]

1.4.4 Porovnání zmíněných vláken

Porovnání vlastností zmíněných typů vláken lze provést z deformačního chování jednosměrně vyztužených laminátů, a to při stejném obsahu vláken. Laminát s těmito vlákny je namáhán tahem ve směru výztuže. Chování jednotlivých kompozitů s různými typy vláken znázorňuje Obr. 7. [6]



Obr. 7 - Vliv vlastností aramidových, skleněných a uhlíkových vláken na průběh zatěžovacího diagramu jednosměrně vyztuženého laminátu při tahové zkoušce (inspirováno dle [6])

Z Obr. 7 je zřejmé, že největší hodnoty pevnosti i tuhosti vykazují vlákna uhlíková, která jsou zdaleka nejvíce anizotropní. Anizotropii dobře charakterizuje poměr modulu pružnosti E ve směru vláken (E_{\parallel}) ku modulu pružnosti E kolmo na vlákna (E_{\perp}). Čím větší hodnoty tento poměr nabývá, tím je materiál více anizotropní (pokud je tento poměr roven 1, pak je materiál izotropní). Znázornění míry anizotropie jednotlivých vláken ukazuje tabulka 3. [6]

Tabulka 3 - Elastické charakteristiky různých vláken, názorná míra anizotropie [6]

| Vlákno | E_{\parallel} [kN·mm ⁻²] | E_{\perp} [kN·mm ⁻²] | $E_{\parallel} / E_{\perp}$ [1] | Výsledek |
|----------------|--|------------------------------------|---------------------------------|----------------|
| E – sklo | 73 | 73 | 1 | Izotropní |
| Aramidové (HM) | 133 | 5,4 | 24,6 | Anizotropní |
| Uhlíkové (HM) | 500 | 5,7 | 88 | Silně anizotr. |

Je třeba si uvědomit, že u kompozitů vyztužených zmíněnými druhy vláken nebude záležet pouze na rozdílných vlastnostech samotných vláken, ale také na matici,

do níž budou vlákna uložena, a zvláště pak na adhezi těchto dvou fází. Právě na matici bude zejména záležet při styku kompozitu s agresivními chemikáliemi, které mohou narušit fázová rozhraní, a tím pádem zhoršit adhezi mezi maticí a vlákny. Co se týče odolnosti zmíněných vláken vůči nepříznivému prostředí, nejlépe by měla obstát vlákna uhlíková, zatímco ostatní zmiňovaná vlákna by v alkalickém i kyselém prostředí vykazovaly snížení pevnosti. [6]

Kompletní srovnání mechanických a fyzikálních vlastností těchto vláken je znázorněno v tabulce 4.

Tabulka 4 - Přehled vlastností skleněných, uhlíkových a aramidových vláken [6]

| Vlákno | ρ [g · cm ⁻³] | σ_m [N · mm ⁻²] | E_{\parallel} [kN · mm ⁻²] | E_{\perp} [kN · mm ⁻²] | δ [%] | α_{\parallel} [10 ⁻⁶ · K ⁻¹] | α_{\perp} [10 ⁻⁶ · K ⁻¹] | ρ_{el} [Ω · cm] |
|------------------|-----------------------------------|---------------------------------------|---|---|-----------------|---|---|--------------------------------------|
| Skleněná vlákna | | | | | | | | |
| E-sklo | 2,60 | 2 400 | 73 | 73 | 3,0 | 5 | 5 | 10 ¹⁴ až 10 ¹⁵ |
| R-sklo | 2,53 | 3 500 | 86 | 86 | 4,1 | 4 | 4 | |
| Uhlíkové vlákno | | | | | | | | |
| HT | 1,78 | 3 600 | 240 | 15 | 1,5 | -1 | 10 | 10 ⁻³ až 10 ⁻⁴ |
| IM | 1,77 | 4 700 | 295 | - | 1,6 | -1,2 | 12 | |
| HM | 1,96 | 1 750 | 500 | 5,7 | 0,35 | -1,5 | 15 | |
| Aramidové vlákno | | | | | | | | |
| LM | 1,44 | 2 800 | 65 | - | 4,3 | -2 | 40 | 10 ⁵ |
| HM | 1,45 | 3 000 | 130 | 5,4 | 2,1 | -4 | 52 | |

Doposud však nebylo zmíněno, jak se tato vlákna liší v ceně. Rozdílná cena u těchto vláken závisí na cenách použitých surovin, výrobních postupů a v neposlední řadě na situaci na trhu. Cena skleněných vláken je relativně nízká, protože tato vlákna jsou vyrobena z levných a snadno dostupných surovin, stejně tak vlákna aramidová, ovšem u těchto vláken je složitější a energeticky náročnější výroba, což se na ceně musí projevit, a tedy aramidová vlákna jsou dražší než vlákna skleněná. Absolutně nejdražší jsou vlákna uhlíková, jelikož je zapotřebí pro výrobu použít kvalitní předupravené příze, které bývají drahé, zároveň trvá relativně dlouhou dobu, než se vlákna vyrobí. Výroba je tedy velice energeticky náročná a cena těchto vláken je vysoká. Ceny jednotlivých vláken nejsou v čase konstantní, ale pro představu jsou v tabulce 5 zobrazeny cenové relace mezi jednotlivými vlákny. [6]

Tabulka 5 - Orientační ceny jednotlivých vláken [6]

| Materiál vlákna | Cena (€/1 kg) |
|-------------------------|---------------|
| Sklo | 2 až 3 |
| Aramid | 20 až 30 |
| Uhlík | |
| standardní typ (HT, IM) | 20 až 80 |
| vysokomodulový typ (HM) | 100 až 500 |
| speciální typ (UHM) | 100 až 1 000 |

Tabulka 6 - Shrnující tabulka - všeobecné srovnání kompozitů vyztužených různými vlákny [6]

| Vlastnosti | Kompozity | | |
|-------------------------|-----------------|-----------|----------|
| | vyztužené sklem | aramidové | uhlíkové |
| Hustota ρ | + - | ++ | + |
| Mez pevnosti v tahu | + | + | + |
| E – modul | - | + | ++ |
| Mez pevnosti v tlaku | + | - | + |
| Dielektrické vlastnosti | ++ | ++ | - |
| Adheze, přilnavost | ++ | - | + |
| Cena | ++ | + - | - |

Legenda k tab. 6:

„+“ – parametr je u daného materiálu vysoký (výjimky: hustota, cena)

„-“ – parametr je u daného materiálu nízký (výjimky: hustota, cena)

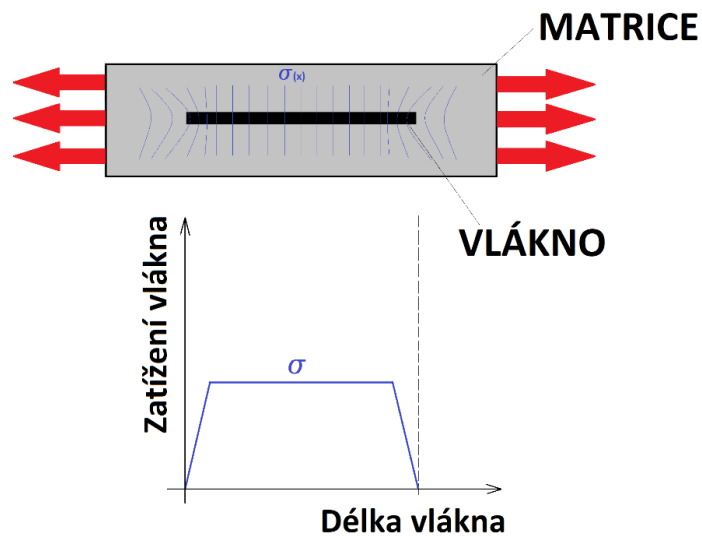
„+ -“ – parametr není u daného materiálu ani vysoký ani nízký

Pozn.: Čím víc je daných znaků v poli tabulky, tím je parametr vyšší (++), popřípadě nižší (--).

1.5 Adheze

Jak již bylo zmíněno na začátku kapitoly 1, adheze je důležitý faktor, který má klíčový význam přenosu napětí z matrice na vlákno (tedy přenos napětí na hranici fází). Při dokonalé adhezi, tzn. při dokonalém přenosu napětí z matrice na vlákno, se kompozity chovají synergicky (viz kapitola 1.1). To, jak se budou síly a napětí mezi primární a sekundární fází přenášet, bude zásadní pro požadovanou vlastnost kompozitního materiálu. Pokud je například cílem vysoká pevnost kompozitu, vyžaduje

se adheze co nejvyšší. Přenos tahového zatížení z matrice na vlákno znázorňuje Obr. 8. [14; 15]



Obr. 8 - Přenos tahového zatížení z matrice do vlákna, průběh napětí podél vlákna (inspirováno dle [15])

Z obrázku 8 je možné pozorovat, že určité úseky na koncích vlákna nepřenáší celé zatížení, ale napětí tam lineárně klesá.

1.5.1 Druhy adheze

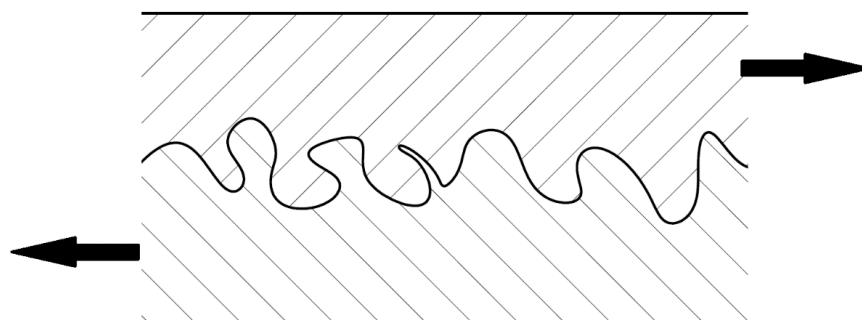
Mezi matricí a vláknem můžeme rozlišovat tři druhy zdrojů adhezních sil: [15]

- Mechanické zaklínění
- Fyzikální působení
- Chemické a fyzikálně chemické působení

Mechanické zaklínění

Rozhraní fází není nikdy dokonale rovné. Na tomto rozhraní se nacházejí vždy výčnělky a prohloubeniny. Při dokonalém styku může dojít k zaklínění mezi spojitou a nespojitou fází (viz Obr. 9). Při zatížení, které je na Obr. 9 znázorněno černými šipkami, do sebe výčnělky a prohloubeniny zapadnou, zaklíní se do sebe. Čím je rozhraní drsnější a vzájemný styk dokonalejší, tím je zaklínění větší. Důvodem je fakt, že při drsnějším rozhraní jsou generovány větší třecí síly, které jsou za mechanickou vazbu zodpovědné.

[15]



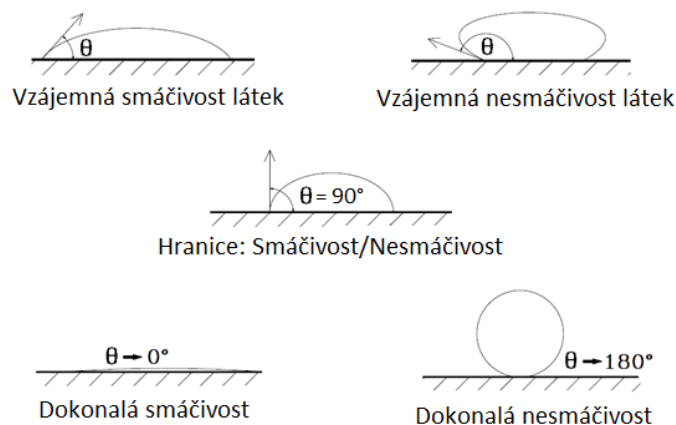
Obr. 9 - Rozhraní fází – zaklínění (inspirováno dle [15])

Fyzikální adheze

Tato vazba souvisí s tzv. Van der Waalsovou vazbou mezi částicemi na rozhraní. Vzdálenost, na kterou působí se pohybuje kolem 0,3 až 0,5 nm a teoreticky může dosahovat pevnosti 0,7 až 7 kN·mm⁻². Fyzikální adheze je také úzce spjata se vzájemnou smáčivostí primární a sekundární fáze. [15]

Smáčivost

Abychom docílili co největší soudržnosti vlákna s matricí, musíme zajistit dobrou smáčivost, kterou charakterizuje tzv. úhel smáčivosti θ (théta). Pokud při zvětšování plochy na rozhraní pevného a kapalného prostředí (zpravidla se myslí pevné vlákno a kapalná matrice) dochází k snižování celkové povrchové energie, kapalně prostředí bude povrch na rozhraní zvětšovat. Tato skutečnost se projeví na úhlu θ , který bude v intervalu (0°; 90°), při tomto úhlu mluvíme o tzv. dobré smáčivosti vlákna s matricí, resp. obě látky (pevná a kapalná) se označují za vzájemně smáčivé (viz Obr. 10 vlevo nahoře). V případě, že úhel θ náleží intervalu (90°; 180°) se jedná o špatnou smáčivost, obě látky jsou tedy vzájemně nesmáčivé (viz Obr. 10 vpravo nahoře). Obecně platí, že čím je úhel smáčivosti menší, tím jsou látky smáčivé lépe a opačně, čím je tento úhel větší, tím jsou látky více nesmáčivé. [14; 15]



Obr. 10 - Znázornění smáčivosti (resp. nesmáčivosti) dvou látek (inspirováno dle [15])

Dále bude velmi záležet na drsnosti povrchu na rozhraní. Platí, že u látek smáčivých drsnost adhezi zlepšuje, a naopak u látek nesmáčivých drsnost adhezi zhoršuje. [15]

Chemická adheze

Na rozhraní matrice – vlákno mohou vzniknout chemické reakce, které působí na kratší vzdálenost, než je tomu u fyzikální adheze (jedná se o cca 0,1 až 0,3 nm). Zároveň je jejich teoretická pevnost vyšší až o desetinásobek, a to 7 až 70 kN·mm⁻². Tyto chemické vazby se uplatňují, pokud matrice a vlákno vzájemně difundují (prolínají se), a tak na rozhraní fází vzniká difuzní mezivrstva s velice silnou adhezí. Také mají uplatnění,

pokud spolu primární a sekundární fáze chemicky reagují, čímž na rozhraní fází vzniká mezivrstva chemické sloučeniny. Na druhou stranu chemická adheze nemusí mít v konečném důsledku pozitivní účinky (i když je z hlediska adhezních sil výhodná). Například - vzniklá mezivrstva nemusí mít vždy žádoucí vlastnosti, může být křehká, může mít nízkou pevnost atd., také může vlivem difuze docházet k znatelnému úbytku sekundární fáze (tj. zejména v případě, kde je vlákno ve formě částic). Aby se tomuto nebezpečí zabránilo, tak se preventivně mezi vlákno a matici používá disperzní mezivrstva, která má za úkol působit jako difuzní bariéra. [15]

1.5.2 Měření adheze v kompozitech

Určování vlastností na rozhraní primární a sekundární fáze je velmi důležité. Možností, jak tyto vlastnosti zjistit je vícero, jelikož je souvislost vzájemné smáčivosti materiálů (matrice a vlákno) a povrchového napětí s adhezními silami poměrně složitá, je vhodné adhezní síly na rozhraní zjišťovat přímo – experimentálně. Abychom mohli rozhraní popsat úplně, bude třeba znát kritické tečné i normálové napětí na rozhraní, při kterém dojde k jeho porušení. [15]

Způsobu měření adheze je více. Existují přímé metody měření adheze, které jsou založené na předpokladu možné přípravy rovinného rozhraní mezi oběma fázemi. S tímto předpokladem lze zjišťovat adhezní napětí přímo ze statických zatěžovacích zkoušek, popřípadě tečné adhezní napětí ze zatěžování třibodovým ohybem. Dalším možným způsobem je měřit adhezi na základě metod porovnávacích. Tyto metody neumožňují explicitní určení adhezního napětí na rozhraní fází, jsou ovšem založeny na porovnávání kvality adheze. U těchto metod se převážně posuzuje adheze tenkých vrstev. Spadá sem například scratch test, jehož podstata spočívá ve vytváření vrypu do tenké vrstvy jednoho materiálu na robustním vzorku druhého materiálu pomocí diamantového hrotu. Přítlačná síla na hrot se pomalu navyšuje až do doby, kdy se celá vrstva odtrhne. Tato síla bude v momentu odtržení měřítkem kvality adheze. Dalším příkladem, který do této skupiny metod spadá je mřížkový test. Tento test spočívá ve vyrytí 10 vrypů ve dvou navzájem kolmých směrech pomocí speciálního ostrého nástroje, kde je hloubka vrypu totožná s výškou tenké vrstvy. Po vyrytí vrypů je na tenkou vrstvu nalepena lepicí páska, která se následně odtrhne. Měřítkem kvality adheze je poměr plochy tenké vrstvy, který se při odlepení lepicí pásky neodtrhne ku ploše lepicí pásky, která byla na tenkou vrstvu nalepena. Posledním způsobem, jak lze adhezi měřit, je způsob měření adheze přímo na kompozitech. [15] Tomuto způsobu měření adheze je věnováno více pozornosti (viz kapitola 1.5.2.1), protože je pro tuto práci klíčový.

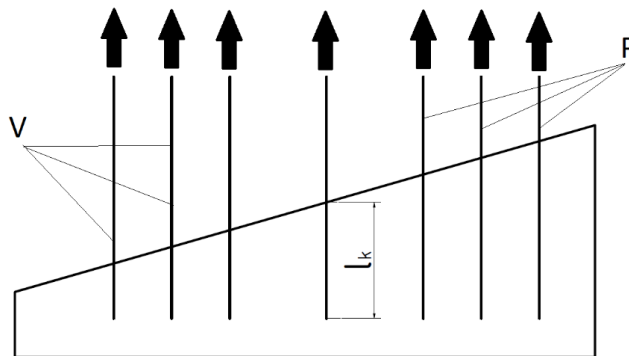
Měření adheze přímo na kompozitech

V tomto případě se jedná opět o porovnávací zkoušky. Za velmi zjednodušených předpokladů lze pomocí těchto zkoušek zjistit přímo adhezní napětí. Řadíme sem tyto zkoušky (testy): [15]

- Vytrhávací zkouška
- Příčný test kompozitu
- Podélný test kompozitu s výřezy
- Posouzení podle charakteru lomu

Vytrhávací zkouška

Tato zkouška se používá pro určení adheze ve vláknových kompozitech. V matrici je umístěno množství vláken s různou hloubkou zalití těchto vláken (velikosti plochy rozhraní). Vlákna se budou postupně zatěžovat, čímž následně dojde k jejich porušení. Vlákna se ovšem porušují různě, záleží na tom, do jaké hloubky jsou zalita. Pokud jsou vlákna zalitá velmi málo, vytrhnou se. V případě, že jsou vlákna zalitá ve velké délce, přetrhnou se. Existuje tedy i určitý mezní stav, což je délka vlákna, při které je stejná pravděpodobnost vytržení i přetržení – tato délka je označována jako kritická délka vlákna. Právě od této délky se bude vyhodnocovat adheze, kde bude platit, že adheze bude tím lepší, čím bude kritická délka kratší. Princip této metody je naznačen na Obr. 11. [15]

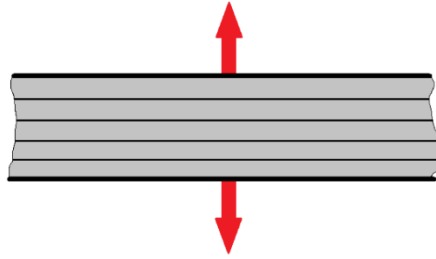


Obr. 11 - Princip vytrhávací zkoušky (inspirováno dle [15])

Pozn.: V – vytržená vlákna; P – přetržená vlákna; l_k – kritická délka

Příčný test kompozitu

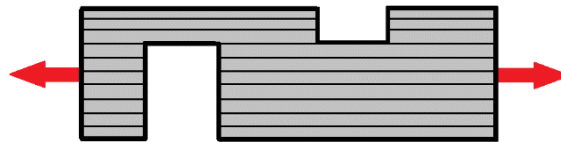
Tento test se uplatňuje u vláknových kompozitů s uspořádanými spojitými vlákny. Jak již vyplývá z názvu „Příčný test“ – kompozit se bude zatěžovat tahovou silou, jejíž směr bude kolmý na vlákna (viz Obr. 12). Zatěžování bude probíhat až do lomu, kdy se vlákna od matrice odtrhnou, poté je možné ze zjištěné meze pevnosti odhadnout velikost normálové adhezní síly. [15]



Obr. 12 - Princip příčného testu kompozitu (inspirováno dle [15])

Podélný test kompozitu s výřezy

Tato zkouška se stejně jako příčný test týká zejména vláknových kompozitů s uspořádanými spojitými vlákny. V tomto případě kompozit není zatěžován v příčném směru, ale tahová síla míří ve směru vláken. Dále musí kompozit obsahovat jisté výřezy. Vzhledem k tomu, že síla působí v podélném směru, budou se z této zkoušky vyhodnocovat adhezní tečné síly, které se dají odhadnout z meze pevnosti, když dojde k lomu, který vznikne usmyknutím rozhraní vláken a matrice. Princip je naznačen na Obr.13. [15]



Obr. 13 - Princip podélného testu kompozitu s výřezy (inspirováno dle [15])

Posouzení podle charakteru lomu

Adheze lze často posoudit i dle charakteru lomové plochy, kde obecně platí, že silná adheze je u křehkých lomů, kde se vlákna přetrhnou. [15]

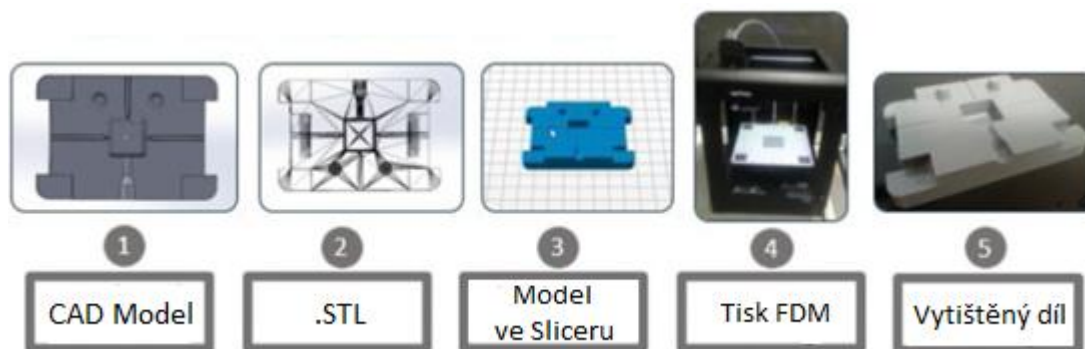
2. Technologie 3D tisku kompozitních materiálů

Technologie 3D tisku je technologií aditivní, což znamená, že při výrobě se materiál přidává po jednotlivých vrstvách, tímto se liší od standardních technologií (soustružení, frézování, vrtání atd.), kde se materiál postupně ubírá. Lze tisknout jak kovové, tak nekovové materiály, avšak pro tuto práci budou zásadní spíše materiály nekovové, a to zejména kompozitní materiály s termoplastickou matricí.

Touto technologií lze tvořit výrobky, které jsou jinými technologiemi nevyrobitelné, jako například duté výrobky. Další nespornou výhodou je, že náklady na výrobu nejsou závislé na složitosti výrobku, odvíjí se jen od času tisku. Díky tomu, že materiál přidáváme, docílíme téměř nulového odpadu. Nevýhodou může být, že doba tisku je relativně dlouhá a některé tištěné materiály jsou při zpracování toxické (např. fotopolymery). Také je třeba počítat s tím, že vytištěný výrobek bude anizotropní, jelikož se tiskne ve vrstvách a orientace tisku může být různá (0°; 45°; 90°).

Postup při 3D tisku

Všechno začíná v CAD softwaru, kde se navrhne model součásti, hotový navržený model se exportuje do formátu souboru STL. Soubor STL definuje prostorové body a propojuje tyto body do trojúhelníků, které se jako celek nazývají síť. Tento soubor se vloží do programu nazývaného Slicer, který rozdělí objekt na jednotlivé vrstvy. V tomto programu lze nastavovat i určité parametry tisku, jako například procentuální vyplněnost součásti. Tento program posléze vytvoří tzv. G – code, jedná se o kód, kterým se budou řídit pohyby krokových motorů 3D tiskárny ve směru os x, y a z. Poté se tento kód vloží do tiskárny a může se začít tisknout. Po ukončení tisku se výrobek odebere a následuje tzv. postprocessing, což znamená například odstranění přebytečného materiálu, který při tisku vznikl. [16; 17] Názorně toto ukazuje Obr. 14 (bez postprocessingu).



Obr. 14 - Postup při 3D tisku [17]

2.1 Polymerní materiály pro 3D tisk

Tisknou se jak termoplasty, tak reaktoplasty, avšak nabídka termoplastů je větší, jsou tedy běžnější. Co se týče reaktoplastových materiálů a 3D tisku, tak se jedná zejména o epoxidové pryskyřice, které mají vynikající kombinaci pevnosti a přilnavosti. Jsou to reaktivní materiály, které vyžadují tepelné nebo UV vytvrzování pro dokončení polymeračního procesu. [7]

K nejběžnějším termoplastům na tisk se řadí materiál polylactic acid (PLA, kyselina polymléčná), akrylonitril-butadien-styren (ABS), polyethyltereftalát (PET, PETG) a další. Ovšem pro technické účely se spíše používají polyamidy (PA) a polykarbonáty (PC). [18] Tato práce je zaměřena na termoplasty, proto je jim dále věnován podrobnější popis.

Potenciální termoplasty pro zpracování technologií 3D tisku

- **PLA (polylactic acid – kyselina polyléčná)**

Tento materiál se semikrystalickou strukturou je v současné době nejvíce používaný, co se týče technologie FDM (viz dále – kapitola 2.2.1.1). Jeho bezesporná výhoda spočívá v tom, že je biologicky rozložitelný – uvádí se, že pokud bychom ho umístili do kompostu, měl by se rozložit do 18 měsíců, ale záleželo by na podmínkách vytvořených v daném kompostu. Tiskne se snadno a dosahuje relativně dobrých mechanických vlastností, pro představu – maximální pevnost v tahu se pohybuje kolem 65 N.mm^{-2} [7]. Jedná se o velmi tvrdý materiál, ovšem s tím souvisí také fakt, že je relativně křehký. Nevýhoda PLA spočívá v tom, že nad teplotu $60 \text{ }^\circ\text{C}$ ztrácí své mechanické vlastnosti. [7; 18]

- **ABS (akrylonitril-butadien-styren)**

Předností tohoto materiálu je vysoká tuhost, houževnost a odolnost vůči opotřebení a chemikáliím. Na rozdíl od PLA je jeho struktura amorfni, zároveň není tak pevný jako PLA, mez pevnosti ABS v tahu je cca 40 N.mm^{-2} [7]. Jeho maximální provozní teplota je $98 \text{ }^\circ\text{C}$, což je relativně málo, ale je to více než u PLA. Nevýhodou tohoto materiálu je, že neodolává UV záření a při tavení vznikají toxické výpary. [7; 18]

- **PETG (polyethylentereftalát – modifikovaný glykolem)**

Tento materiál se vyznačuje svou dobrou houževnatostí, velmi dobře odolává chemikáliím i vodě, také je odolný proti rázům. Přidaný glykol zajišťuje, že se tento materiál nebude chovat křehce, ale houževnatě. Jeho pevnost je mezi PLA a ABS (mez pevnosti PETG = 53 N.mm^{-2} [7]), stejně tak je velikost jeho maximální provozní teploty, která má hodnotu $73 \text{ }^\circ\text{C}$. Co se týče nevýhod, tak tento materiál velmi špatně odolává otěru a opotřebení. Odlišnost tohoto materiálu od zmiňovaných termoplastů je, že se může vyskytovat jak v semikrystalické, tak v amorfni formě. [7; 18]

- **PE (polyethylen)**

Tento termoplast se semikrystalickou strukturou spadá do skupiny polyolefinů, která je největší skupinou syntetických polymerů. Jedná se o nepolární materiál, který vyniká svými výbornými elektroizolačními vlastnostmi. Díky tomu, že není polární, tak za běžných podmínek odolává polárním rozpouštědlům, kyselinám, zásadám a solím. Nevýhodou polyethylenu může být velká citlivost na UV záření, například pro jeho aplikaci ve venkovním prostředí se k polyethylenu přidávají saze (2 až 3 %), aby došlo k jeho stabilizaci. PE se vyznačuje vynikající odolností proti rázovému namáhání, a to i za teplot jdoucích značně pod $0 \text{ }^\circ\text{C}$ (přechodová teplota polyethylenu je $-120 \text{ }^\circ\text{C}$ [10]). Na druhou stranu jsou jeho pevnostní charakteristiky nejhorší ze všech standardních termoplastů. Vlastnosti materiálu obecně závisí na tvaru molekul, jejich délce,

prostorovém uspořádání monomerů v řetězci a stupni krystalinity. Například molekulovou strukturu lze ovlivnit způsobem výroby. Makromolekuly polyethylenu se mohou nacházet ve stavu lineárním nebo rozvětveném. Dle hustoty lze polyethylen rozlišovat na: [19]

1) Vysokohustotní polyethylen (PE-HD)

- Hustota: 0,940 až 0,960 g.cm⁻³
- Teplota tání: 130 až 135 °C
- Modul pružnosti: 700 až 1400 N.mm⁻²
- Mez pevnosti: 18 až 35 N.mm⁻²

2) Nízkohustotní polyethylen (PE-LD)

- Hustota: 0,914 až 0,928 g.cm⁻³
- Teplota tání: 105 až 115 °C
- Modul pružnosti: 200 až 500 N.mm⁻²
- Mez pevnosti: 8 až 23 N.mm⁻²

Co se týče aplikace tohoto materiálu, polyethylen se používá například na obalové materiály, fólie, izolační pláště kabelů, nádrže či potrubí. [19] Pro technologii 3D tisku není používán často, protože je tištění polyethylenu velmi obtížné, nikoliv však nemožné. Doposud zmíněné termoplasty se většinou nepoužívají pro technické aplikace, pro tyto aplikace se zejména používají polyamidy (PA) a polykarbonáty (PC). [20]

PA (polyamid)

Mezi nejpoužívanější polyamidy pro technologii 3D tisku se řadí PA11 a PA12, které jsou charakteristické skupinou -CONH- a v chemickém vzorci se liší počtem skupin -CH₂- . Jedná se o velice pevné materiály s velmi nízkou hustotou (mez pevnosti v tahu: 40 až 85 N.mm⁻²; hustota: 1,06 až 1,14 g.cm⁻³). [7]

PA12 (polyamid 12)

Tento polyamid se vyznačuje výbornými mechanickými vlastnostmi v širokém intervalu teplot (od -40 °C do +100 °C), zároveň velice dobře odolává chemikáliím (např. ropným produktům) a je velmi houževnatý. Oproti polyamidu 6 (PA6) má nižší teplotu tání, která má hodnotu kolem 177 °C, což je dáno obecným pravidlem, které udává, že čím víc molekul uhlíku se v řetězci nachází, tím nižší bude mít materiál teplotu tání (PA12 má tedy víc uhlíků v řetězci než PA6). Je to hygroskopický materiál, tudíž snadno pohlcuje vlhkost, a proto musí být uchováván v suchu. Zejména se používá pro hadice, kabely, ale uplatňuje se i v potravinářském a lékařském odvětví. [7; 20]

PA11 (polyamid 11)

V tomto případě polyamidu zůstávají opět velice dobré mechanické vlastnosti ve stejném teplotním rozmezí, jako tomu je u PA12. V podstatě se od PA12 liší velmi málo, je stejně tak odolný vůči chemikáliím, hygroskopický a opět se jedná o velmi houževnatý materiál. Jedním z rozdílů je například vyšší teplota tání nebo fakt, že absorbuje o trochu víc vody než PA12. Přirozená barva tohoto materiálu je bílá, ale při malé tloušťce materiálu nemodifikované vrstvy se jeví jako poloprůhledný. PA11 nelze snadno zapálit

a zároveň ani snadno uhasit. Uplatnění tohoto materiálu je stejné jako u PA12. Zajímavostí tohoto polyamidu je, že se vyrábí z obnovitelných zdrojů, a to z ricinového oleje ze semen skočce. [7; 20; 21]

- **PC (polykarbonát)**

Tento termoplast s amorfni strukturou se vyznačuje svoji relativně vysokou pevností, která je srovnatelná s pevností polyamidů (mez pevnosti polykarbonátu v tahu = $72 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$ [7]), zároveň je ze zmiňovaných plastů nejvíce odolný vůči teplotě – jeho maximální provozní teplota může dosahovat až $121 \text{ }^\circ\text{C}$. Je relativně tvrdý, také je odolný vůči únavovým lomům a rázům. Stejně jako polyamidy je polykarbonát velmi houževnatý a také hygroskopický. Jeho nevýhoda je, že je při zpracování mírně toxický (podobně jako ABS). [7]

2.2 Rozdělení technologií 3D tisku

Používaných technologií je v dnešní době více, liší se v rychlosti a kvalitě tisku, podle čehož se dále liší i cena tisku. Dále se liší v používaných materiálech a formě v jaké se vstupní materiál nachází – podle tohoto kritéria se technologie 3D tisku rozdělují nejčastěji. [22]

2.2.1 Vstupní materiál

- Vstupním materiálem je filament (= polymerní vlákno v pevném stavu)
- Vstupním materiálem je tekutý fotopolymer
- Vstupním materiálem je prášek

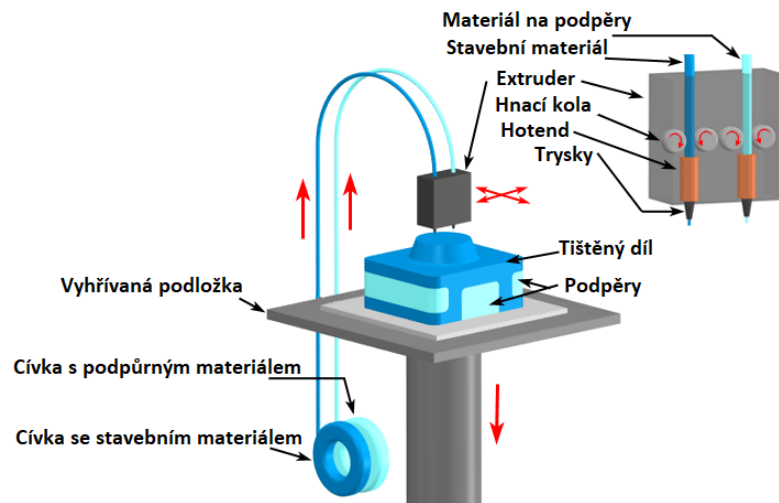
Nyní budou jednotlivé technologie podrobněji popsány.

2.2.1.1 Filament

Fused Deposition Modelling (FDM)/ Fused Filament Fabrication (FFF)

Technologie FDM (popřípadě FFF) je v současné době ta nejpoužívanější. Je založena na nanášení jednotlivých vrstev, kde je materiál ve formě filamentu navinutého na cívce. Pomocí ozubených kol je filament vtlačován do extruderu, kde se taví a vystupuje z něho na vyhřívanou podložku. Na této podložce se postupně vytváří navržená součást. Roztavený materiál (nejčastěji termoplast – PLA, ABS, PA atd.) na podložce relativně rychle ztuhne. Extruder může konat pohyby ve dvou osách x a y nebo x a z, pohyb ve zbylé třetí ose koná vyhřívaná podložka – pokud koná pohyb ve vertikální ose z extruder, po dokončení tisku jedné vrstvy se posune v této ose o hodnotu tloušťky tištěné vrstvy směrem nahoru (pokud vertikální pohyb zaručuje podložka, po ukončení tisku jedné vrstvy se posune o tloušťku této vrstvy směrem dolů). Extrudery mohou být na tiskárně dva, a to za účelem tištění součásti ze dvou různých materiálů

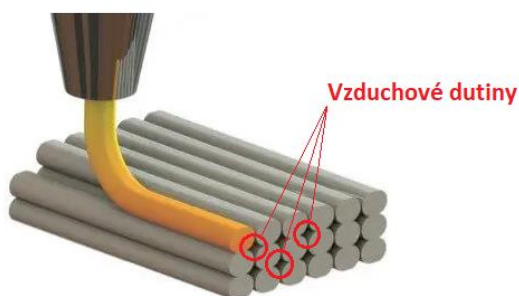
(kvůli využití odlišných vlastností materiálů v různých částech tištěného dílu) anebo z důvodu, že navržená součást může obsahovat určité převisy a dutiny, u kterých je třeba využít tzv. podpěr, které zabezpečí, že bude technologicky možné tuto součást vytisknout. Čili jeden extruder bude tisknout podpěry a druhý samotnou součást z požadovaného materiálu. Tyto podpěry se vyplatí dělat z materiálů, které lze po vytisknutí celé součásti snadno odstranit – například rozpustit ve vodě (např. PVA – polyvinylalkohol). Princip této technologie je znázorněn na Obr. 15. [9; 22]



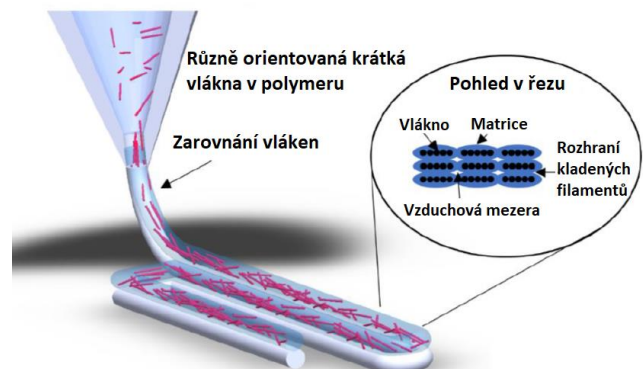
Obr. 15 - Princip technologie FDM [22]

Výhodou této technologie je, že pořizovací náklady s ní spojené jsou relativně nízké, manipulace a obsluhování samotné tiskárny je celkem uživatelsky přívětivé. Na druhou stranu tato technologie není natolik přesná jako ostatní technologie. Také je třeba brát v úvahu, že při kladení filamentu vznikají malé dutiny, které narušují celistvost výrobku, a tedy ovlivňují mechanické vlastnosti (viz Obr. 16).

Kromě neplněných polymerů lze tisknout i polymery plněné, tedy i kompozitní materiály. V případě této technologie se jedná o tisk kompozitních materiálů s polymerní maticí plněnou krátkými vlákny. Tato vlákna zpočátku nejsou zcela uspořádána, orientují se teprve až po výstupu z extruderu (respektive z trysky) – tj. během procesu extruze filamentu. (viz Obr. 17). [24]



Obr. 16 - Vzduchové dutiny [23]



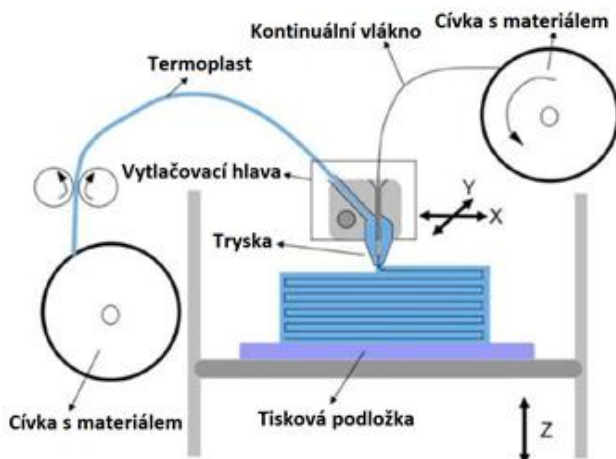
Obr. 17- Ukázka vytlačování plněného filamentu [24]

Klíčová zde bude vzájemná soudržnost na rozhraní matrice a vláken (tedy adheze) a také orientace vláken. Od těchto parametrů se budou silně odvíjet mechanické vlastnosti. [25]

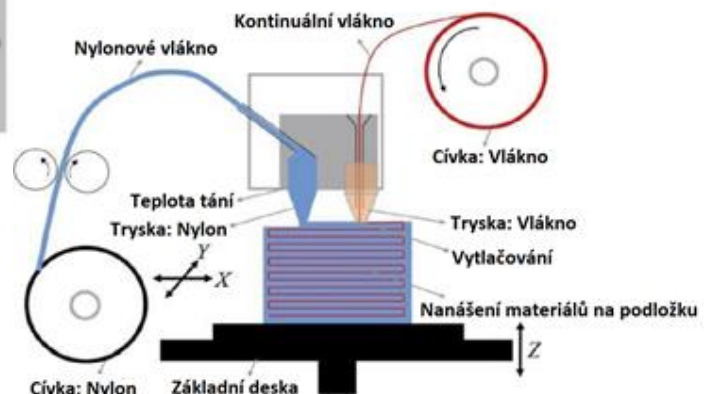
Continuous Filament Fabrication (CFF)

V tomto případě je technologie opět založená na vytlačování vlákna, princip je tedy znovu stejný jako u technologie FDM (popř. FFF). Stejně jako technologie FDM je tato technologie spjata s tiskem kompozitních materiálů. Ovšem na rozdíl od technologie FDM tato technologie pracuje s kontinuální výztuží. Na Obr. 18 je názorně vidět první možnost tisknutí s použitím kontinuálního vlákna, a to pomocí upravené tiskové hlavy. Vchází do ní jak termoplastový filament, tak kontinuální vlákno (skleněné, uhlíkové apod.). Ve vytlačovací hlavě dojde ke spojení materiálů, které se následně kladou na tiskovou podložku. Vytlačovací hlava koná pohyb v rovině x-y, podložka se pohybuje ve vertikální ose z. [25]

Druhou možností, jak tisknout kontinuální vlákna, je metoda vytvořena roku 2014 společností Markforged. Hlavním rozdílem oproti možnosti první je, že v tomto případě zde máme dvě samostatné vytlačovací trysky – do jedné přichází plast (často polyamid) a do druhé vyztužující vlákno (skleněné, uhlíkové, aramidové). Avšak tyto dvě trysky nepracují současně – zatímco jedna tryska „stojí“, druhá tiskne. Trysky jsou na sobě nezávislé, takže výztuž nemusí být úplně ve všech místech výtisku, což může pozitivně ovlivnit cenu výtisku. [25] Schéma tisknutí metodou Markforged je názorně vidět na Obr. 19.



Obr. 18 - Schéma tisknutí pomocí upravené tiskové hlavy [25]

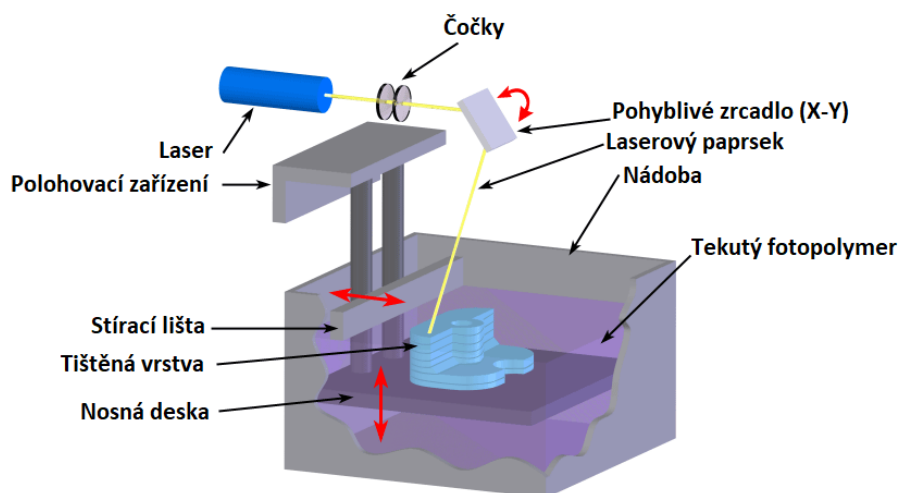


Obr. 19 - Schéma tisknutí metodou Markforged [25]

2.2.1.2 Tekutý fotonpolymer

Stereolitografie (SLA)

Technologie SLA je nejstarší technologií 3D tisku. Její princip spočívá ve vytvrzování tekutého fotonpolymeru (tj. nevytvrzený reaktoplast) pomocí UV záření (popř. pomocí laseru). Jedná se o velice přesnou metodu – její přesnost se odvíjí od rozlišení zdroje UV záření a teoreticky odpovídá velikosti molekul použitého materiálu. Z Obr. 20 je patrné, že laser je natáčením zrcadla v rovině x-y směřován do tekutého fotonpolymeru tak, aby vytvořil navrženou součást po jednotlivých vrstvách. V okamžiku, kdy laser osvítl jednu vrstvu fotonpolymeru, dojde ke změně struktury a vytvrzení této vrstvy. Neozářené části fotonpolymeru zůstávají tekuté. Jakmile se každá vrstva dotiskne (resp. vytvrdí) nosná deska se posune ve vertikálním směru o tloušťku tištěné vrstvy a stírací lišta přejede povrch, čímž dojde k jeho vyhlazení. Na tuto vytištěnou vrstvu se tiskne další vrstva stejným způsobem. Tento proces se opakuje do té doby, než je součást kompletně vytištěná. Pokud se jedná o složitější součást, je nutné přidávat podpěry, které mají stejný význam jako u metody FDM. V mnoha případech se vytištěná součást dává do UV peci pro finální vytvrzení. Výhodou této metody je výborná kvalita povrchu tištěných výrobků, vysoká přesnost, a tudíž i možnost vytvářet milimetrové otvory a miniaturní prvky. Nevýhodou je problematika tištění dutých součástí, jakmile je součást dutá, musí obsahovat určitý otvor, kterým by vytekl nevytvrzený fotonpolymer, zcela uzavřené duté díly touto metodou tedy nelze vyrábět. Další nevýhodou metody SLA je, že fotonpolymer jsou mírně toxické. [22; 26]

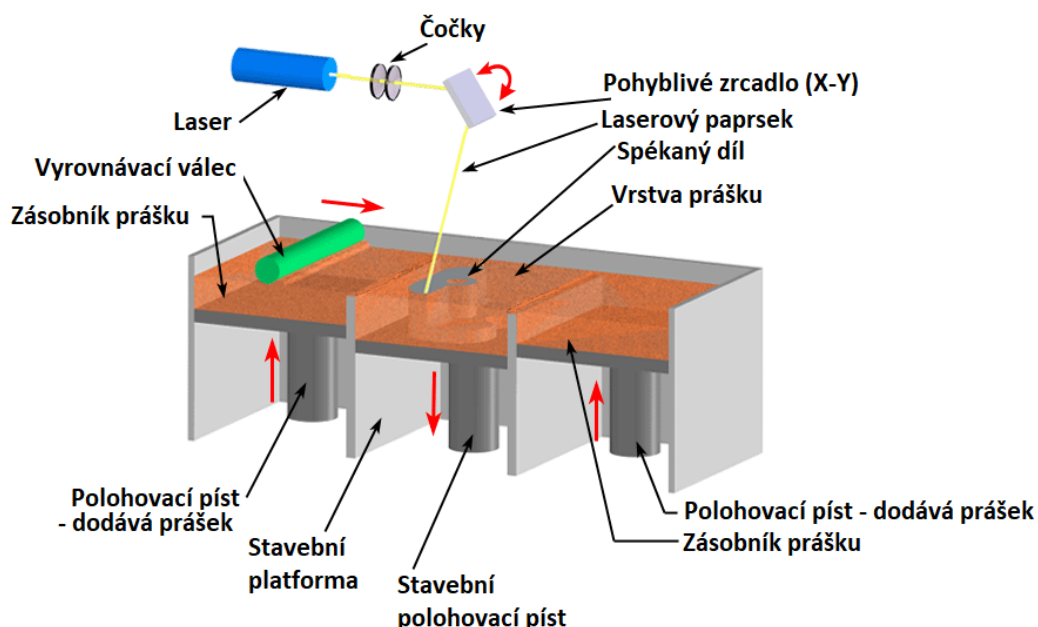


Obr. 20 - Schéma metody SLA [26]

2.2.1.3 Prášek

Selective Laser Sintering (SLS)

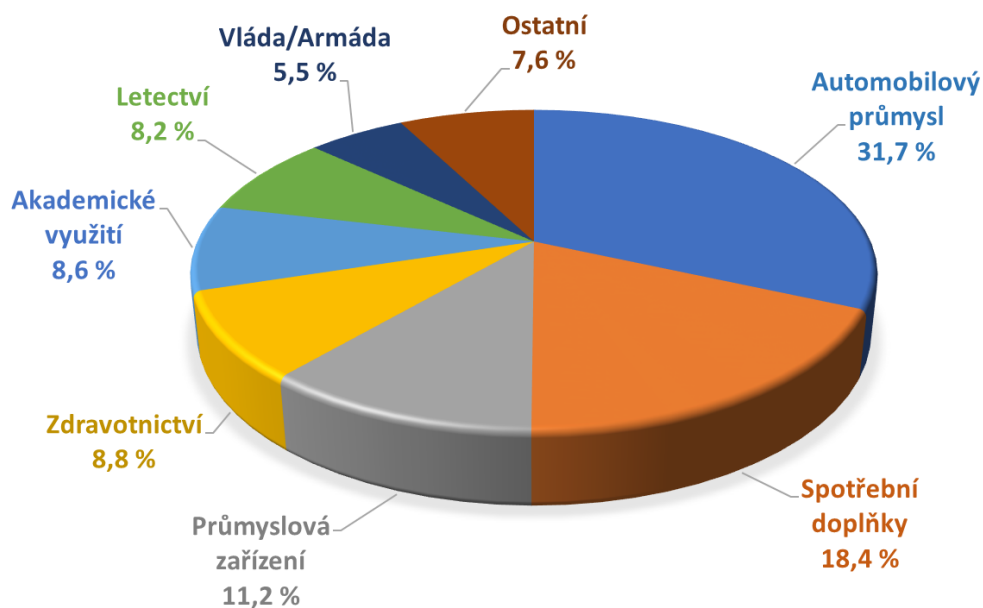
U této technologie dochází ke spékání prášku v inertní atmosféře pouze pomocí laseru. Prášek nemusí být nutně polymerní – může to být i kovový nebo keramický prášek. Pokud se prášek vhodně upraví, je možný i tisk nanokompozitních součástí, které budou mít lepší mechanické a fyzikální vlastnosti. Příkladem by mohl být prášek z PA11 vyztužený nanočásticemi křemíku. [27] Tento prášek je spékáný právě použitím laseru vrstvu po vrstvě. Jak je názorně vidět na Obr. 21, prášek je nanášený na nosnou desku prostřednictvím vyrovnávacího válce, který zaručí, že vrstva bude rovnoměrná. Na nosné desce se prášek díky laseru speče (teplota je blízká teplotě tavení daného materiálu). Po dokončení vrstvy se nosná deska posune směrem dolů o tloušťku vrstvy a vyrovnávací válec opět nanese rovnoměrnou vrstvu prášku. Aby bylo možno prášek dodávat pomocí vyrovnávacího válce, jsou po stranách prostoru, kde dochází ke spékání, dva zásobníky naplněné práškem. Dno těchto zásobníků se postupně pohybuje nahoru (funguje jako píst) a doplňuje potřebný prášek. Vytisknuté díly jsou velmi pevné a kvalita jejich povrchu je dána hrubostí prášku. Na rozdíl od technologie SLA nepotřebuje tato technologie využít podpěry, protože přebytečný prášek slouží právě jako podpůrný materiál. Přetrvává zde ovšem nevýhoda ve výrobě dutých součástí, které lze vyrobit pouze s otvorem, aby se z nich přebytečný prášek mohl vysypat ven. [22; 28]



Obr. 21 – Schéma metody SLS [28]

2.3 Aplikace aditivních technologií ve světě

V dnešní době dochází k obrovskému rozvoji aditivních technologií. Tento rozvoj je zapříčiněn vlastnostmi, které tato technologie nabízí. Jedná se zejména o zkrácení času výroby, čímž dochází také ke snížení nákladů. Dále tyto technologie umožňují výrobu těch nejsložitějších součástí, které jsou těžko vyrobitelné klasickými technologiemi (např. obrábění, svařování). Výhodou této technologie je téměř nulový odpadní materiál. Tyto technologie mají uplatnění v široké škále různých oborů, především je to automobilový průmysl. Pro představu je uveden graf, který je na Obr. 22, zobrazující užití aditivních technologií v různých oborech v roce 2012. [17; 22]



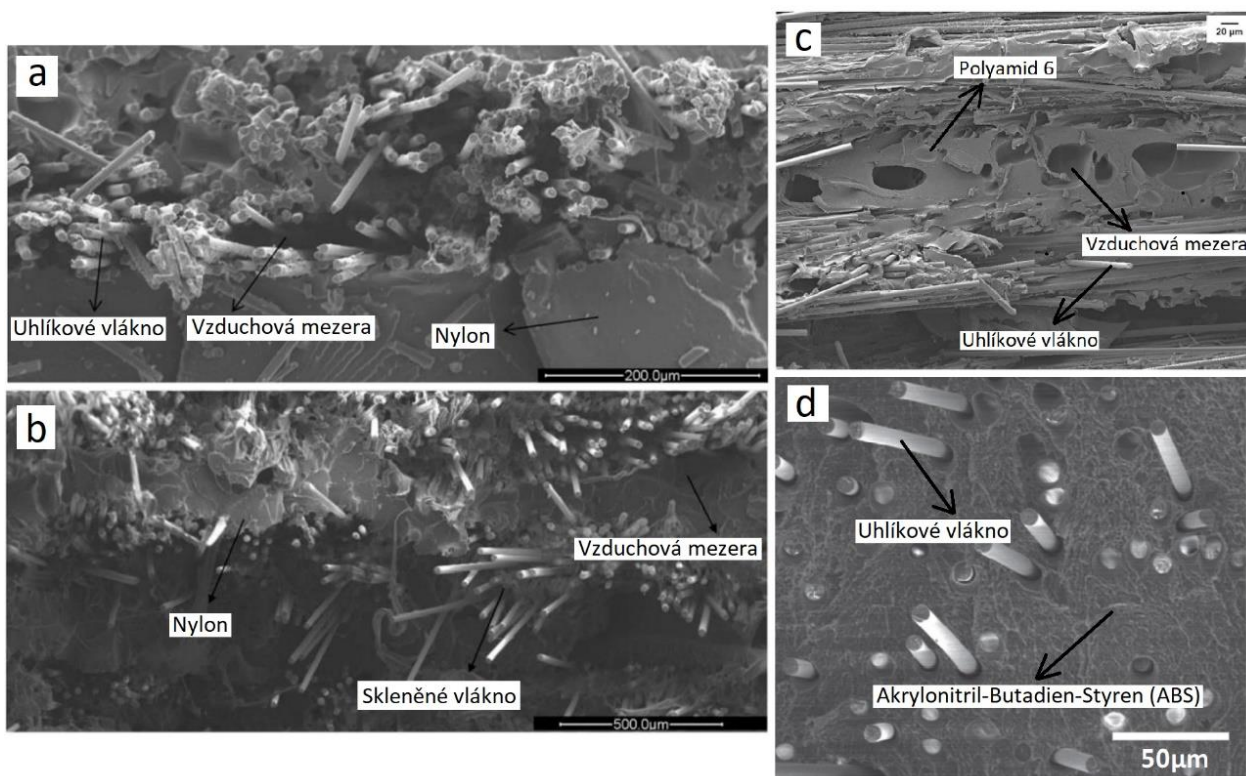
Obr. 22 - Použití aditivních technologií v různých oborech (rok 2012) (data - viz [22])

Zajímavostí, kde mají aditivní technologie velký význam, je jejich použití na Mezinárodní vesmírné stanici (ISS). Astronauti zde mají svou speciální 3D tiskárnu, která je založena na technologii FDM, jako materiál je použito ABS. V listopadu roku 2014 si tak sami astronauti vytiskli potřebné díly. Nyní je věcí testování, jak se liší tištěné díly na Zemi oproti tištěným dílům ve vesmíru při nulové gravitaci. NASA se domnívá, že až 82 % chybných dílů na ISS by mohlo být vyrobeno nebo opraveno pomocí aditivní výroby. 3D tisk ve vesmíru má velký potenciál, a to zejména z toho důvodu, že odeslání jednoho kilogramu materiálu na oběžnou dráhu stojí 10 000 dolarů (tj. údaj z roku 2014) a doprava nějakou dobu trvá. Výroba součásti přímo ve vesmíru by tedy byla mnohem operativnější a ekonomičtější. [1]

PRAKTICKÁ ČÁST

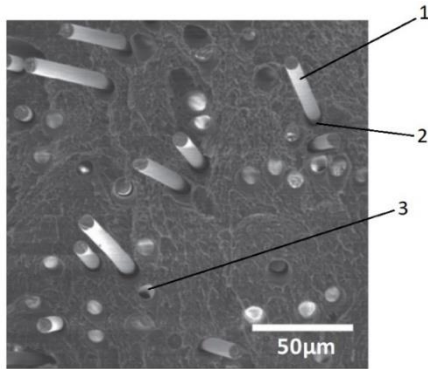
Úvod do problematiky

Cílem praktické části je tisk vlastního kompozitního filamentu metodou FDM. Samotnému tisku předchází výroba tohoto filamentu, jehož matici tvoří termoplast, výztuž pak uhlíková vlákna. Co se týče tisknutí kompozitního materiálu metodou FDM, popřípadě metodou CFF, odborné články (viz [29 – 32]) se zejména opírají o problematiku vzduchových mezer, které jsou v nich považovány za hlavní problém nedosažení dostatečného zlepšení mechanických vlastností. Vznik vzduchových mezer je ovšem obecná potíž pro 3D tisk metodou Fused Deposition Modelling. Dle mého názoru je při tištění kompozitního materiálu stěžejním problémem docílení dobré adheze mezi vlákny a maticí. Carneiro a kol. v odborném článku [32] předpokládali dokonalou adhezi. Tato úvaha však nemusí být správná. Při prostudování odborných článků (viz [29; 31; 33]) zabývajících se mechanickými vlastnostmi kompozitních materiálů vytištěných na 3D tiskárně, bylo na některých snímcích z elektronového mikroskopu zpozorováno (viz Obr. 23), že použitá vlákna jsou obnažená, a tudíž je evidentní, že adheze zde není dobrá, čímž nedochází k dostatečnému navýšení mechanických vlastností. Z tohoto důvodu bude pozornost věnována navýšení mechanických vlastností prostřednictvím modifikace matrice, za účelem dosažení lepší adheze na rozhraní fází.



Obr. 23 - Ukázka nedostatečné adheze; a, b - [31]; c - [29]; d - [33]

Popis nedokonalé adheze a špatné smáčivosti je názorně vidět na obr. 24.



Legenda k obr. 24

- 1 – vlákno zcela obnažené
- 2 – vlákno se odtrhuje bez známky interakce s matricí
- 3 – dutina po vytaženém vláknu

Obr. 24 - Popis nedostatečné adheze [33]

Praktická část se zabývá zjišťováním mechanických vlastností tištěných kompozitních vzorků z vlastního filamentu. Předpoklad zvýšení adheze je založen na zvýšení povrchové polarizace termoplastu (ve formě prášku), za pomoci plazmové úpravy. Právě u těchto plazmově upravených vzorků se předpokládá dosažení lepších mechanických vlastností.

3. Použité materiály

V této kapitole jsou uvedeny vlastnosti materiálů, které byly použity na výrobu zkoušených vzorků.

Matricí byl zvolen lineární nízkohustotní polyethylen. Pro výztuž byla použita uhlíková vlákna. Kombinací těchto materiálů by mohl vzniknout kompozit, u něhož by vlastnosti byly kompromisem mezi pevností a houževnatostí. Zároveň by určité vyšší množství uhlíkových vláken mohlo zaručit elektrickou vodivost tohoto kompozitu popřípadě i zajistit odvod elektrického náboje. Použitá uhlíková vlákna jsou recyklovaná, čili jejich cena není vysoká. Přestože se jedná o vlákna recyklovaná, tato vlákna disponují stále velkou pevností. Co se týče pevnosti tohoto kompozitního materiálu, jeho pevnost by se mohla blížit pevnosti ABS. Kompozit by nebyl natolik křehký a zároveň by při samotném tisku nevyučoval toxické výpary. Polyethylen byl zvolen z důvodu jeho nízké pořizovací ceny, relativně velké chemické odolnosti a také velmi nízké hustotě (pod 1 g.cm^{-3}). Vzhledem k tomu, že jsou filamenty pro 3D tisk prodávány dle hmotnosti, délka tohoto filamentu bude vyšší. Pro porovnání (orientačně): 1 kg tohoto kompozitního filamentu bude měřit 415,8 metru, kdežto 1 kg z komerčně vyráběného filamentu z PLA bude dlouhý 332,6 metru (uvažuji 1 g.cm^{-3} pro PE plněný 10 % CF a $1,25 \text{ g.cm}^{-3}$ pro PLA, průměr filamentu = 1,75 mm [34]).

3.1 Matrice - polyethylen

Dowlex 2629.10UE (PE1)

Materiál s názvem Dowlex 2629.10UE označuje lineární nízkohustotní polyethylen ve formě prášku. Co se týče zpracování je zejména vhodný pro technologii vstřikování a technologii rotačního spékání. Materiál je stabilizován vůči UV záření a je velmi houževnatý. Jeho další klíčová vlastnost je index toku taveniny (MFI = melt flow index), který je relativně nízký pro extruzi (4 g/10 min) – přehled vlastností tohoto materiálu, které udává výrobce je vidět v tabulce 7. [35]

Tabulka 7 – Přehled vybraných vlastností materiálu Dowlex 2629.10UE [35]

| Vlastnosti - Dowlex 2629.10UE (PE1) | |
|---|-------|
| Index toku taveniny [g/10 min] | 4 |
| Teplota tání [°C] | 124 |
| Pevnost v tahu [N.mm ⁻²] | 17,5 |
| Elastický modul v ohybu [N.mm ⁻²] | 645 |
| Hustota [g.cm ⁻³] | 0,935 |

Dowlex 2629.10UE – plazmově modifikovaný (TPE1)

V tomto případě se jedná o již zmiňovaný materiál PE1, který byl modifikován plazmou za účelem dosažení větší adheze. Z tohoto důvodu je tento materiál označován jako TPE1 (písmeno „T“ znamená „treatment“ – tj. upravený). Bylo zde pracováno s více prášky s různou plazmovou úpravou. Hlavním parametrem je zde čas, po který je materiál vystaven procesu úpravy. Pro nízký čas (tj. pro čas 60 sekund) jsou materiály označovány jako TPE1L (písmeno „L“ znamená „low“ – tj. nízký) a materiály podrobeny vyššímu času úpravy (tj. pro časy 150 sekund) jsou označovány jako TPE1H (písmeno „H“ znamená „high“ – tj. vysoký).

RXP 1001 NATURAL LD/70/600μ (PE2)

Jedná se o materiál na bázi lineárního nízkohustotního polyethylenu, který je dodáván ve formě prášku. Vyznačuje se relativně vysokým indexem toku taveniny a je vhodný pro aplikace, kde je vyžadováno přijetí plniva, nízká viskozita a dobré tokové vlastnosti. Souhrn vybraných vlastností toho materiálu je v tabulce 8. [36]

Tabulka 8 – Přehled vybraných vlastností materiálu RXP 1001 NATURAL LD/70/600μ (PE2) [36]

| Vlastnosti - RXP 1001 NATURAL LD/70/600μ (PE2) | |
|--|-------|
| Index toku taveniny [g/10 min] | 70 |
| Teplota tání [°C] | 104 |
| Hustota [g.cm ⁻³] | 0,919 |

Směsi zmíněných materiálů

Za účelem optimalizace procesu extruze byly experimentálně zvoleny směsi materiálů PE1 s TPE1H v poměru 1:1, tato směs je dále nazývána jako PE3. Další zvolenou směsí byla směs PE1 s PE2 v poměru 1:1, tato směs je dále nazývána jako PE4. Poslední směsí byla směs TPE1L s PE2 v poměru 1:1, tato směs je dále nazývána jako PE5.

3.2 Výztuž – uhlíková vlákna

Uhlíková vlákna

Jedná se o recyklovaná, namletá vlákna, jejichž střední hodnota délky je rovna 125 μm . Rozptyl průměru těchto vláken je v intervalu (6;8) μm (střední hodnota průměru je 7 μm). Na základě mechanických vlastností, které jsou shrnuty v tabulce 10, by se tato vlákna dala zařadit do skupiny HT, tedy do skupiny standardních uhlíkových vláken (viz Obr. 5). Jak již bylo zmíněno v kapitole 1.4.2, uhlíková vlákna se vyznačují svojí vysokou pevností, velmi dobrou elektrickou vodivostí, odolností vůči korozi atd. [37]

3.3 Shrnutí vlastností použitých materiálů

Pro lepší orientaci jsou parametry použitých materiálů vloženy do tabulky (viz tab. 10).

Tabulka 10 – Srovnání vlastností použitých materiálů [34 - 37]

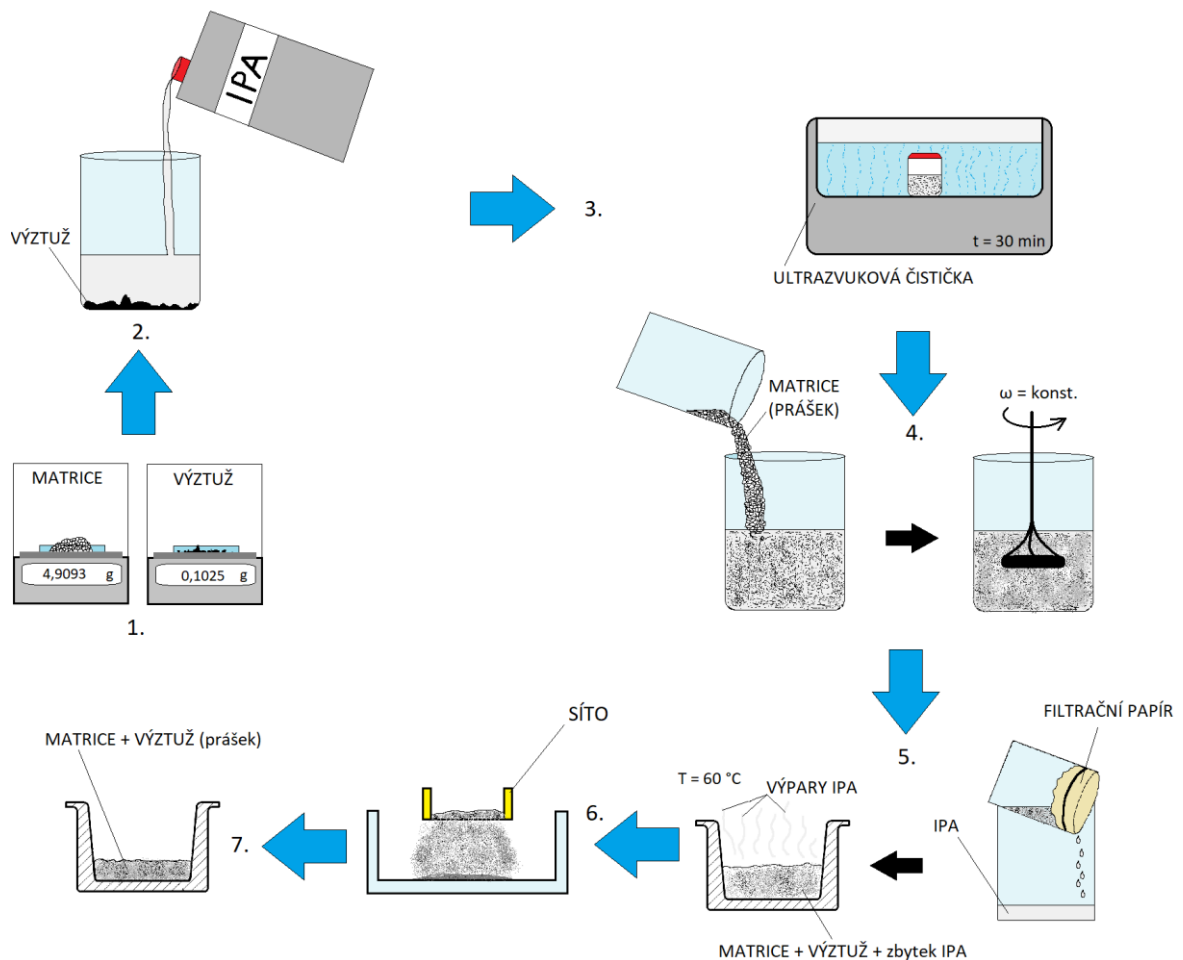
| MATRICE | | |
|---|-----------------|-------|
| Vlastnosti | PE1 | PE2 |
| Index toku taveniny [g/10 min] | 4 | 70 |
| Teplota tání [°C] | 124 | 104 |
| Hustota [g.cm ⁻³] | 0,935 | 0,919 |
| Pevnost v tahu [N.mm ⁻²] | 17,5 | - |
| Elastický modul v ohybu [N.mm ⁻²] | 645 | - |
| VÝZTUŽ | | |
| Vlastnosti | Uhlíková vlákna | |
| Pevnost v tahu [N.mm ⁻²] | > 3500 | |
| Modul pružnosti [N.mm ⁻²] | > 230 | |
| Průměr [μm] | 7 \pm 1 | |
| Hustota [g.cm ⁻³] | 1,8 | |

4. Postup přípravy vzorků k dalšímu zpracování

Postup přípravy vzorků se dá shrnout do těchto následujících sedmi kroků:

1. Navážení složek (matrice a výztuž) v daném poměru
 - obě složky váží dohromady 5 gramů (tj. pro vzorky zpracované v peci)
2. Smíchání výztuže s isopropylalkoholem (IPA)
3. Vložení směsi výztuže a IPA do ultrazvukové čističky na minimálně 30 minut
 - kvůli zamezení aglomerace sekundární fáze (aglomerovaná vlákna by negativně ovlivnila mechanické vlastnosti)
4. Mechanické smíchání matrice a výztuže v IPA – konstantní otáčky mísiče
5. Odstranění IPA – pomocí filtračního papíru a odpařením v peci ($t = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$)
6. Použití síta. Odstranění zbytku aglomerovaných vláken z kompozitní směsi
7. Vzorek (kompozitní prášková směs) připraven k dalšímu zpracování (viz dále - kapitola 5)
 - tavení v peci – vzorky jsou připraveny k mechanickým zkouškám
 - drcení vzorků z pece (k získání granulátu) → extruze filamentu – mechanické zkoušky
 - extruze filamentu → následný 3D tisk – mechanické zkoušky

Postup je vizuálně znázorněn na obr. 25.



Obr. 25 - Postup přípravy vzorků k dalšímu zpracování

5. Technologie zpracování vzorků

Připravená kompozitní směs byla nadále zpracována třemi různými technologiemi:

- Tavením v peci
- Extruzí filamentu
- 3D tiskem (metodou FDM)

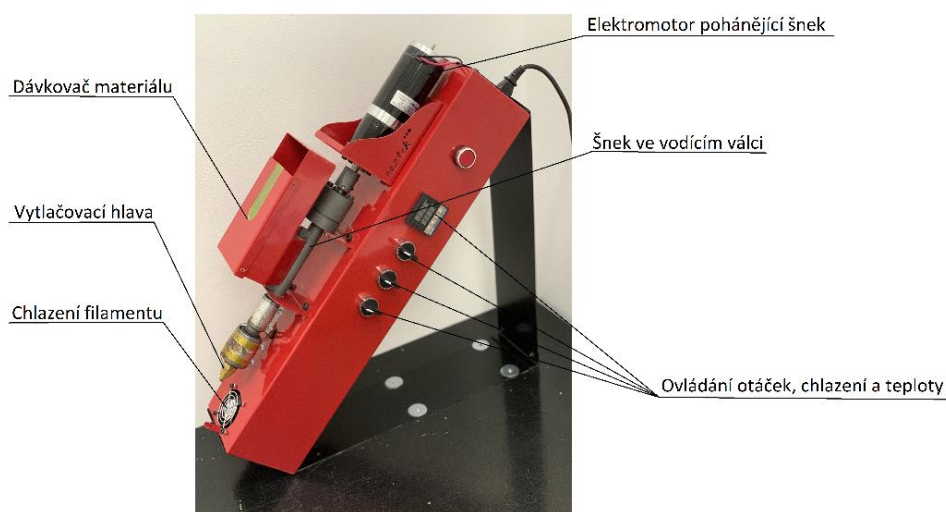
5.1 Tavení v peci

K tavení kompozitní směsi (viz poslední „krok“ kapitoly 4. Postup přípravy vzorků k dalšímu zpracování) byly využity malé ocelové formy. Tyto formy bylo třeba před použitím zejména plazmou upravených prášků ošetřit tekutým separačním přípravkem – byl zde použit „Release Agent – Roto Release RM – 3211+W“. Po nanesení separačního přípravku byla kompozitní směs o hmotnosti 5 gramů nasypána do formy. Forma, obsahující kompozitní směs, byla vložena do pece. V peci byla nastavena teplota 180 °C, kde se vzorky ponechaly po dobu 20 minut, aby byl polyethylenový prášek dostatečně roztaven. V této etapě se formy s připravenými vzorky nechaly vychladnout v laboratorním prostředí při laboratorní teplotě. Následně byly vzorky z formy vyjmuty a byly zbaveny nežádoucích otřepů tak, aby byl zachován tvar průřezu vnitřní dutiny formy - tj. lichoběžník. Takto zpracované testovací vzorky byly podrobeny mechanickým zkouškám. Po změření mechanických vlastností se tyto vzorky rozdrtily, a ve formě granulátu byly vloženy do násypky extrudéru.

5.2 Extruze filamentu

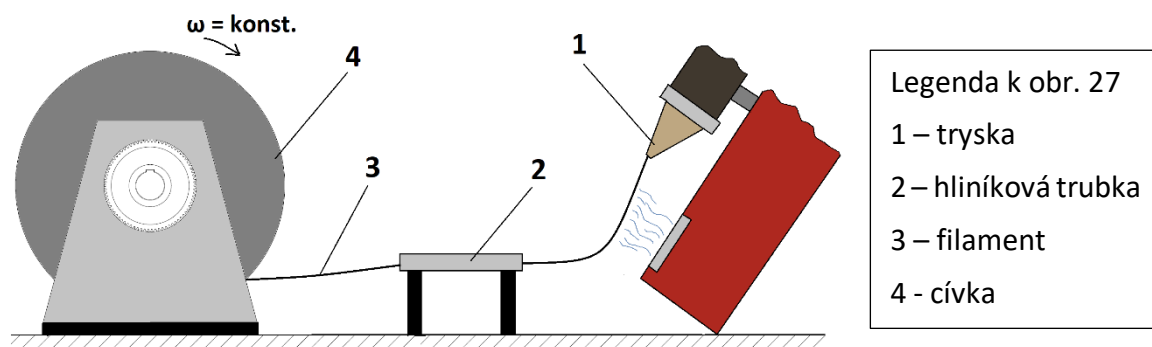
Další možností, jak kompozitní směs zpracovat, je extruze filamentu. Technologie extruze (vytlačování) se řadí mezi technologie tváření plastů, kde se výchozí tvar polymeru za působení tepla a tlaku mění na zásadně odlišný tvar (v tomto případě filament = vlákno). Tato technologie se provádí na extrudéru, který se skládá z tuhého rámu, uvnitř kterého je uložen pohonný elektromotor s říditelným počtem otáček. Hřídel elektromotoru je spojen s pracovním šnekem, který se otáčí v ocelovém zahřívaném válci, jehož teplotu lze regulovat. Na začátku tohoto válce je násypka pro připravený materiál ve formě granulátu. Doprava granulátu od násypky až k vytlačovací hlavě je zajišťována šnekem. Granulát je uvnitř vyhřívaného válce roztaven a promícháván. Vytlačovací hlava je tvořena tryskou, která určuje výsledný tvar a rozměr výrobku. Produktem je zde filament s průměrem 1,75 mm, určený pro 3D tisk metodou FDM/FFF. Aby se mohl extrudovaný filament navíjet na cívku, ihned za tryskou je umístěn malý větrák, který filament chladí okamžitě po výstupu z trysky. Použitý extruder je zobrazen

na obr. 26. Díky nepřetržitému tavení materiálu a konstantních otáček šneku je zajištěn homogenní tok taveniny. Homogenizaci kompozitního materiálu přispívá diferenciální šnek. Vzhledem k tomu, že se extruduje plněný filament – tedy filament s krátkými vlákny, je možné zde předvídat abrazivní opotřebení trysky (zejména při použití uhlíkových vláken). Proto zde bylo zapotřebí vyměnit standardní relativně měkkou mosaznou trysku za tvrdou trysku z oceli. Takto extrudovaný filament je připraven na mechanické zkoušky, popřípadě je z něho možné vytisknout zkušební tělísko na 3D tiskárně, a to následně mechanicky zkoušet. [9]



Obr. 26 – Použitý extruder

Schéma extruze a navíjení filamentu na cívku je zobrazeno na obr. 27.



Obr. 27 - Schéma extruze a navíjení filamentu na cívku

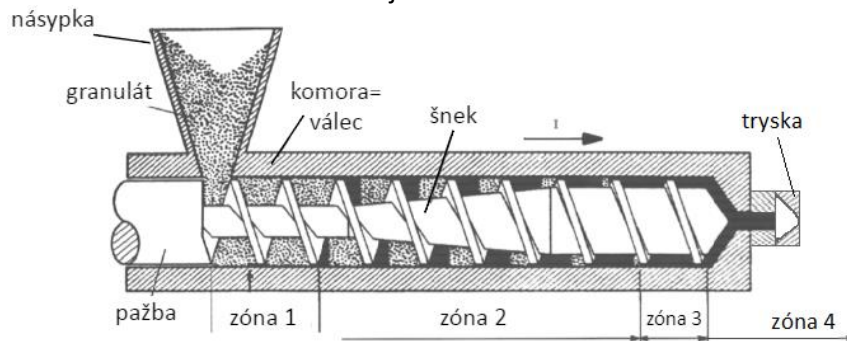
Pozn.: Hliníková trubka má funkci podepření filamentu, resp. zamezení jeho průhybu (aby se nedeformoval), zároveň trubka neklade velký odpor a má také funkci dodatečného pasivního chlazení.

Materiál, který byl extrudován, byl polyethylen plněný uhlíkovými vlákny, jejichž vlastnosti jsou zmíněny v kapitole 3. Použité materiály. Extruze tohoto materiálu je zřejmá z obr. 27. Teplota, která byla v extruderu nastavena se zvolila dle tabulky 11. Filament navinutý na cívce měl relativně homogenní průměr, který byl vhodný k použití do 3D tiskárny (tj. průměr – 1,75 mm). Fotografie filamentu navinutého na cívce je zobrazena na obr. 29, měření průměru filamentu pak na obr. 30.

Tabulka 11 – Parametry pro extruzi [38]

| | |
|-------------|--------|
| T_{Zone1} | 190 °C |
| T_{Zone2} | 200 °C |
| T_{Zone3} | 200 °C |
| T_{Zone4} | 190 °C |

Pozn. Pozice zón je názorně vidět na obr. 28



Obr. 28 – Pozice vyhříváných zón v extruderu [9]



Obr. 29 – Plněný filament navinutý na cívce



Obr. 30 - Měření průměru filamentu

6. Použití připraveného filamentu

Postup aplikace vlastního filamentu do 3D tiskárny lze shrnout do těchto pěti kroků, které jsou doplněny schematickým obrázkem (tj. Obr. 31).

1. Extruze vlastního filamentu (viz kapitola 5.2 Extruze filamentu)
2. Navržení zkušebních tělísek pro mechanické zkoušky v CAD softwaru

Pro vymodelování zkušebních tělísek byl použit Autodesk Inventor Professional 2021.

- Zkouška tahem – dle ISO 527 - 2
- Zkouška rázem v ohybu – dle ISO 179 - 1

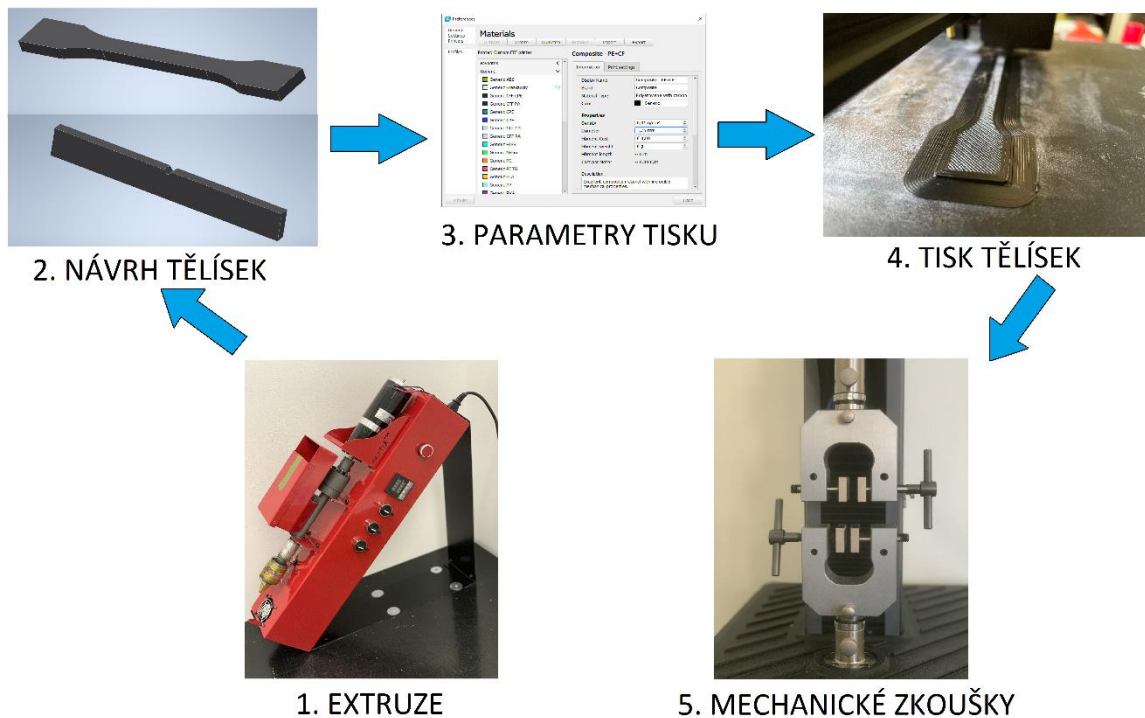
3. Vložení navržených tělísek do Sliceru → nastavení parametrů tisku

Pro nastavení parametrů tisku byl použit program Ultimaker Cura 4.8.0

4. Samotný tisk zkušebních tělísek

Použitá tiskárna: Ender 3 Pro

5. Zkoušení vytištěných tělísek



Obr. 31 – Schéma postupu při aplikování vlastního filamentu

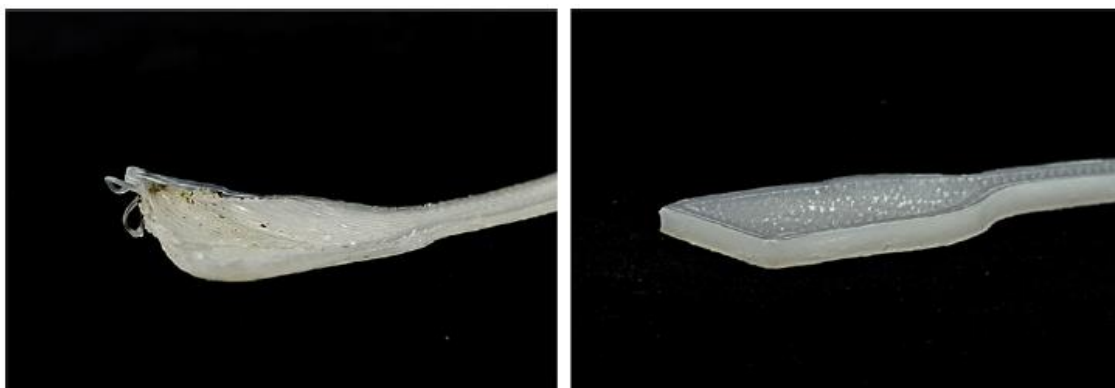
Nyní bude popsán postup při tisku zkušebních těles.

6.1 Tisk vlastního materiálu

Tisk z vytvořeného kompozitního materiálu, jehož matrici tvoří polyethylen je velmi obtížný a málo častý. Důvodem je značné smršťování polyethylenu při tuhnutí. Zároveň je tento materiál nepolární, čili má velmi špatnou adhezi k tiskové podložce, respektive od ní odléhá. Jak bylo zmíněno – tisk polyethylenu je obtížný, nicméně není nemožný. Volbou vhodných tiskových parametrů a vhodné tiskové podložky, lze popsané problémy při tisku potlačit.

6.2 Požadavky na tiskovou podložku

Pro docílení co nejlepší adheze byla použita tisková podložka s velmi drsným povrchem, na kterou bylo aplikováno adhezivum (v této práci byl použit adhezivní sprej – 3DLAC). Druhou možností je zvolit tiskovou podložku z vhodného materiálu – takovýmto materiálem může být například SEBS, což je pružný, velmi polární plast, díky čemuž se dosáhne nejen lepší adheze, ale také lepší kvality povrchu výtisku. Na obr. 32 lze vidět rozdíl vytištěného tělíska při použití hladké tiskové podložky bez použití adheziva (obr. 32 – vlevo) a při použití tiskové podložky z polárního materiálu SEBS (obr. 32 – vpravo). [38]



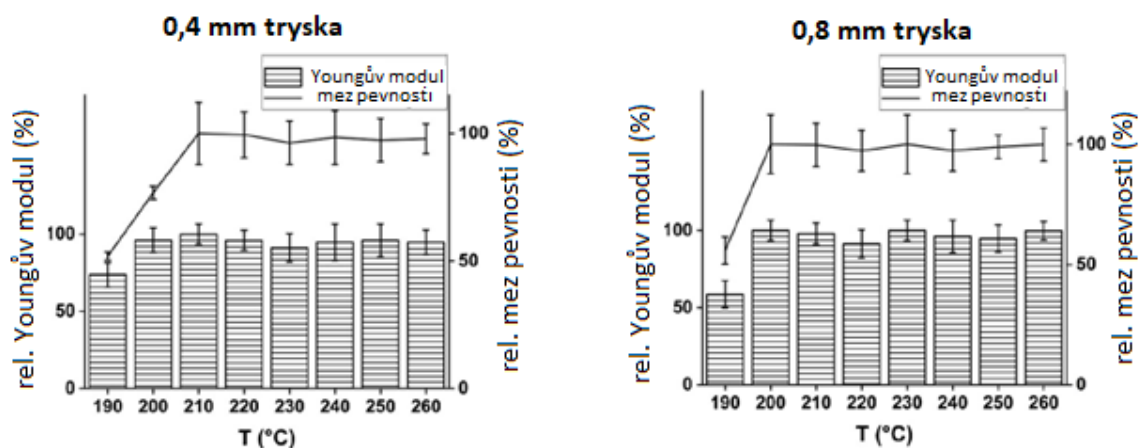
Obr. 32 – Porovnání vytištěných tělísek při použití různých tiskových podložek [38]

6.3 Nastavení parametrů tisku

Jak již bylo zmíněno, nastavení parametrů tisku bylo provedeno v programu Ultimaker Cura 4.8.0. V tomto Slicer programu lze nastavovat řadu různých parametrů, avšak těmi nejdůležitějšími parametry jsou obecně: teplota, rychlost a výška vrstvy. Tyto zmiňované parametry byly určovány na základě odborné literatury, popřípadě upravovány dle vlastních zkušeností, za účelem dosažení lepší kvality tisku.

6.3.1 Nastavení teplot

Základními teplotami, které je třeba nastavit pro vlastní materiál, jsou teplota tiskové podložky a teplota trysky extruderu. Teplota tiskové podložky byla na základě odborné literatury (viz [38]) nastavena na 60 °C, nicméně při této teplotě materiál tuhne relativně rychle a docházelo tak k jeho smršťování, proto byla teplota tiskové podložky později experimentálně nastavena na 75 °C, při níž materiál tuhne pomaleji, což zabránilo nežádoucímu smršťování. Tímto se přispělo k lepšímu průběhu samotného tisku. Druhou důležitou teplotou je teplota trysky, která ovlivňuje pevnost výtisku. Na obr. 33 lze vidět, že je od teploty trysky 210 °C dosahováno hodnot pevnosti i modulu pružnosti relativně stejných a statických pro průměry trysky 0,4 mm i 0,8 mm. Pro tisk byla použita tryska s průměrem 0,8 mm a nastavena teplota 210 °C. [38]



Obr. 33 - Vliv teploty trysky na mechanické vlastnosti vytištěného dílu [38]

Program Ultimaker Cura 4.8.0 umožňuje nastavit různé teploty trysky v průběhu tisku, což lze vidět na obr. 34 (např. „Printing Temperature Initial Layer“ – tj. teplota pro tištění první vrstvy). Teploty trysky byly nastaveny po celou dobu tisku na 210 °C, jakmile teplota klesla pod tuto hranici, začala se okamžitě zvyšovat (touto hraniční teplotou je teplota „Initial Printing Temperature“ – viz obr. 34). Jediná teplota v rozhraní programu, která nenabývala hodnoty 210 °C je teplota „Final Printing Temperature“, na kterou se má začít ochlazovat těsně před koncem tisku – tuto teplotu program vypočítal na základě hodnoty „Printing Temperature“, která byla zvolena na základě odborné literatury (210 °C). Stejně jako teplota trysky se od první vrstvy až do konce tisku neměnila teplota tiskové podložky, jak lze vidět z obr. 34, tato teplota byla nastavena na 75 °C.

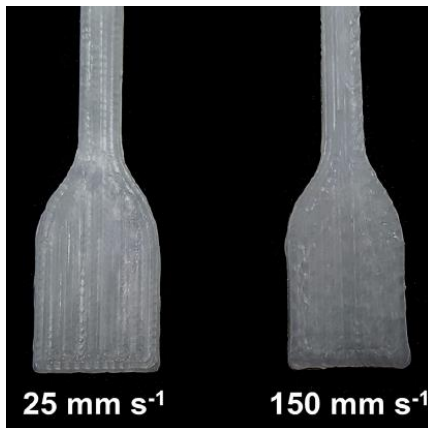
| Material | | |
|---------------------------------------|-----|----|
| Printing Temperature | 210 | °C |
| Printing Temperature Initial Layer | 210 | °C |
| Initial Printing Temperature | 210 | °C |
| Final Printing Temperature | 195 | °C |
| Build Plate Temperature | 75 | °C |
| Build Plate Temperature Initial Layer | 75 | °C |

Obr. 34 – Nastavení teplot - Ultimaker Cura 4.8.0

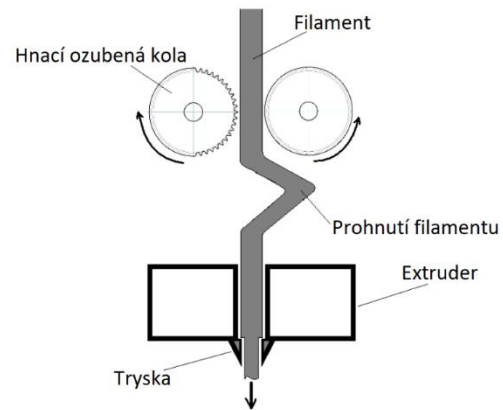
6.3.2 Nastavení rychlostí

Nejpodstatnější rychlostí je tzv. rychlost tisku (tj. „Print Speed“ – viz obr. 37). Rychlost tisku má podstatný vliv na kvalitu povrchu výtisku, a to zejména v jeho okrajových vrstvách. [38] Také má pochopitelně vliv na čas samotného tisku. Lze konstatovat, že v aplikacích, kde není nutný kvalitní povrch součásti, lze dobu tisku zkrátit (dle [38] až o 70 %) při čemž zároveň nedojde k významné ztrátě mechanických vlastností. V této práci byl kladen důraz na kvalitní povrch vytisknutých zkušebních těles, z důvodu zamezení výskytu vrubů, v kterých by se při zkoušce tahem mohlo koncentrovat napětí, což by vedlo k nepříznivým mechanickým vlastnostem. Porovnání kvality povrchu vytištěné součásti při dvou značně různých rychlostech je znázorněno na obr. 35. Dle [38] byla rychlost tisku zvolena na 25 mm/s, avšak později byla tato rychlost zvýšena na 35 mm/s. Při této rychlosti byla zachována kvalita povrchu a zároveň byl zefektivněn samotný tisk, neboť trval kratší dobu.

Značně vyšší rychlost tisku má u měkkých materiálů (jako je i polyetylen) ještě další nežádoucí důsledek, a to ten, že se filament může prohnut v místech mezi hnacími ozubenými koly a extruderem, jak je znázorněno na obr. 36. Toto prohnutí by mělo negativní vliv na samotný tisk. [39]



Obr. 35– Porovnání kvality povrchu vytištěných tělísek při různých rychlostech tisku [38]



Obr. 36 – Prohnutí filamentu vlivem velké rychlosti tisku [39]

V softwaru Ultimaker Cura 4.8.0 lze upravovat velké množství rychlostí – jako například i rychlost posuvu tiskové hlavy při přemístování v momentu, kdy neklade filament (tj. „Travel Speed“). Avšak tato rychlost nemá vliv na kvalitu povrchu vytištěné součásti, její hodnota je co nejvyšší, aby tisk trval co nejkratší dobu. Daleko důležitější rychlostí pro úspěšné vytištění součásti je rychlost, při které je kladena první vrstva tištěné součásti (tj. „Initial Layer Speed“). Tuto rychlost program spočítal na základě zvolené rychlosti tisku. Rychlost tisku první vrstvy je oproti rychlosti tisku o polovinu menší (tj. 17,5 mm/s). Důvodem je dosažení lepší adheze k podložce (druhá vrstva se bude tisknout již s rychlostí 35 mm/s). Další rychlosti, které byly programem navrženy na základě mnou nastavené rychlosti tisku, je rychlost tisku výplně (tj. „Infill Speed“) a rychlost tisku okraje tištěné součásti (tj. „Wall Speed“). Nastavení těchto parametrů v prostředí programu Ultimaker Cura 4.8.0 je znázorněno na obr. 37.

| Speed | |
|---------------------|-----------|
| Print Speed | 35 mm/s |
| Infill Speed | 35 mm/s |
| Wall Speed | 17.5 mm/s |
| Travel Speed | 100 mm/s |
| Initial Layer Speed | 17.5 mm/s |

Obr. 37 – Nastavení rychlostí - Ultimaker Cura 4.8.0

6.3.3 Nastavení výšky vrstev

Výška vrstvy (tj. „Layer Height“) má vliv na kvalitu povrchu součásti a na rychlost tisku. Čím je její hodnota větší, tím bude součást vytištěna rychleji, ale v nižší kvalitě a naopak. Výška vrstvy byla nastavena na 0,32 mm. Dalším důležitým parametrem je výška první vrstvy (tj. „Initial Layer Height“) – čím bude tato výška menší, tím bude mít lepší adhezi k tiskové podložce. Vzhledem k tomu, že je adheze k podložce zajištěna

použitím adheziva, výška první vrstvy nebyla volena menší. Nastavení těchto parametrů v programu lze vidět na obr. 38.



Obr. 38 – Nastavení výšky vrstvy - Ultimaker Cura 4.8.0

6.3.4 Shrnutí nastavených parametrů

Pro lepší orientaci byly důležité nastavené parametry vloženy do tabulky - viz tab. 12.

Tabulka 12 – Shrnutí nastavených parametrů

| Nastavení teplot | |
|-----------------------------|-----------|
| Teplota trysky | 210 °C |
| Teplota podložky | 75 °C |
| Nastavení rychlostí | |
| Rychlost tisku | 35 mm/s |
| Rychlost tisku první vrstvy | 17,5 mm/s |
| Nastavení výšky vrstev | |
| Výška vrstvy | 0,32 mm |
| Výška první vrstvy | 0,32 mm |



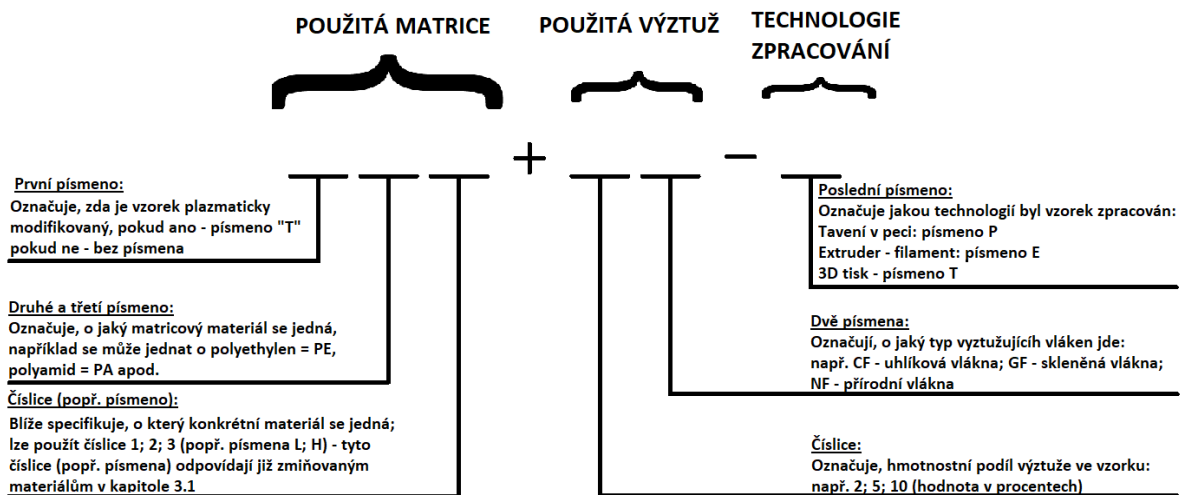
Obr. 39 – Tisk zkušební tělíska pro zkoušku tahem



Obr. 40 – Vytištěné zkušební tělíska pro zkoušku rázem v ohybu

7. Systém označování vzorků

K lepší orientaci v následujících kapitolách byl vytvořen systém vlastního značení vzorků, který je znázorněn na obr. 41, díky jemuž se snáze pozná, o jaký vzorek se jedná.



Obr. 41 - Systém vlastního značení vzorků

Například: PE2 + 10CF – P → Jedná se o polyethylen – RXP 1001 NATURAL LD/70/600 μ , do kterého bylo přidáno 10 hmotnostních procent uhlíkových vláken, vzorek byl zpracován tavením v peci.

8. Mechanické zkoušky

8.1 Zkouška tahem

Tato zkouška, vyvozená statickým namáháním, slouží k určení meze pevnosti v tahu, modulu pružnosti v tahu a dalších tahových charakteristik vyplývajících z deformační křivky (tj. závislost napětí v tahu na poměrném prodloužení). [40; 41]

8.1.1 Princip zkoušky

Zkušební těleso je namáháno silou F , která je ve směru hlavní podélné osy. Je pevně upnuto do čelistí zkušebního stroje, které se od sebe oddalují konstantní rychlostí až do okamžiku porušení. Zatěžující síla postupně narůstá až do maximální hodnoty, ze které se určuje mez pevnosti. [41; 42]

Tato síla se během zkoušky zaznamenává v závislosti na přírůstku poměrného prodloužení. Použitá zkušební tělesa zde budou různá – v případě vzorku zpracovaného tavením v peci se bude jednat o hranol s průřezem tvaru lichoběžníku, v případě zpracování pomocí extruderu se bude jednat o již zmiňovaný filament s kruhovým průřezem a v případě použití technologie 3D tisku se bude jednat o zkušební těleso dle normy ISO 527 – 2 (tj. dle [43]). Aby bylo možno měření vyhodnotit statisticky, je třeba vyzkoušet minimálně 5 zkušebních těles. Před začátkem zkoušky je třeba nastavit upínací vzdálenost mezi čelistmi L , do kterých se vloží zkušební těleso tak, aby se podélná osa zkušební tělesa shodovala se směrem síly F . Poté se nastaví rychlost, kterou se budou

čelisti oddalovat – volí dle příslušné normy pro daný materiál – standardně se volí z řady: 1, 2, 5, 10, 50, 100, 200, 300 a 500 mm/min. [40 – 42]

8.1.2 Vyhodnocení tahových vlastností

Z naměřených hodnot (tj. hodnoty sil a změny velikosti měřených délek) se vypočítají napětí a poměrná prodloužení. Vyhodnocuje se zde takzvané technické napětí, které se od skutečného napětí liší v tom, že se nevztahuje ke skutečnému průřezu (v daným okamžik), ale vztahuje se k průřezu počátečnímu. Ze zkoušky tahem lze vyhodnocovat vícero tahových vlastností (napětí na mezi kluzu σ_y , napětí při přetržení σ_b , poměrné prodloužení na mezi kluzu ϵ_y , modul pružnosti E a další), v této práci byla však vyhodnocována pouze mez pevnosti σ_m [$N \cdot mm^{-2}$]. Mez pevnosti je napětí, kterého je dosaženo při prvním lokálním maximu na deformační křivce. V případě zkoušení houževnatého materiálu, je toto napětí rovno hodnotě napětí na mezi kluzu. Pokud je zkoušen materiál křehký, toto napětí je rovno hodnotě napětí při přetržení. Výpočet meze pevnosti popisuje rovnice 8.1, kde A značí počáteční průřez vzorku [mm^2] a F_m maximální působící sílu [N]. [40 – 42]

$$\sigma_m = \frac{F_m}{A} \quad [N \cdot mm^{-2}] \quad (8.1)$$

Zkouška tahem byla provedena na trhacím stroji s označením MTS E42 (MTS Exceed® Series 40). Jde o elektromechanické univerzální zařízení, které je určeno k mechanickým zkouškám plastů, kompozitů, vláken a dalších materiálů. Tento stroj je schopen zatížit testované vzorky silou, která je v rozmezí 5 N až 5 kN. Naměřené hodnoty z provedených zkoušek byly vyhodnoceny v programu MTS TestSuite TW. [44]

8.2 Zkouška rázem v ohybu

Jedná se o zkoušku, která je vyvozena dynamickým namáháním. Za dynamické (popřípadě rázové) namáhání je považováno namáhání, které probíhá při rychlostech v intervalu $\langle 1; 10 \rangle$ m/s. Materiál, který se při statickém namáhání chová houževnatě, se může začít chovat křehce, což se projeví deformací nebo porušením zkušebního tělesa již při malém průhybu. Zkouška rázem v ohybu slouží k vyhodnocení rázové nebo vrubové houževnatosti materiálu (těleso bez vrubu nebo s vrubem). Rázová (vrubová) houževnatost materiálu vyjadřuje, jak moc dokáže materiál absorbovat energii (tzn. deformovat se danou rychlostí). [45; 46]

8.2.1 Princip zkoušky

Zkouška rázem v ohybu je založena na přeražení zkušebního tělesa, které může a nemusí obsahovat vrub. Při rázovém namáhání plastů se zkoušené materiály mohou

chovat různě – v zásadě může dojít ke dvěma základním chováním: zkušební těleso se přeruší křehce anebo houževnatě. Zda dojde ke křehkému či houževnatému lomu, bude záviset na teplotě skelného přechodu zkoušeného materiálu – pokud je tato teplota vyšší než standardní teplota okolí (tj. 23 °C), nastane křehký lom, pokud je tomu naopak, zkušební těleso se nepřerazí anebo dojde k lomu houževnatému. Jestliže se zkušební těleso nepřerazí, je třeba v něm vytvořit vrub (přesně v polovině délky zkušební tělesa). Tento vrub má funkci koncentrátoru napětí – v důsledku tohoto vrubu je možno porušit i houževnaté plasty, a tím vyhodnotit i houževnatost materiálu, v tomto případě se vyhodnocuje houževnatost vrubová. [46]

U plastů se rázové zkoušky v ohybu provádí především pomocí kyvadlového kladiva metodou Charpy (existují i další metody – např. Izod). Aby bylo možné vyhodnotit velký počet plastů s odlišnou houževnatostí, kladiva lze vyměnit – každé toto kladivo má svou charakteristickou nominální energii, pomocí které se určuje rázová houževnatost plastu. [45; 46]

8.2.2 Zkušební tělesa a vyhodnocení zkoušky

Pokud využíváme metody Charpy, zkušebním tělesem je hranol předepsaných rozměrů (dle [45]) umístěný vodorovně na podpěrách, který je posléze kladivem přeražen. Místo, kde k rázu dojde, je ve středu vzdálenosti mezi podpěrami na užší nebo širší straně (jak již bylo zmíněno, v tomto místě se může nacházet i vrub). V průběhu zkoušky je zaznamenávána energie, která se spotřebuje na přeražení zkušební tělesa, dále se hodnotí typ přeražení, který se označuje následovně: [46]

- **C** – tj. úplné přeražení, při kterém je těleso rozděleno na dva a více kusů
- **H** – tj. kloubové přeražení – obě části zkušební tělesa drží pohromadě pouze tenkou obvodovou vrstvou v podobě kloubu bez zbytkové tuhosti
- **P** – tj. částečné přeražení (nesplňuje definici kloubového přeražení)
- **N** – tzn. zkušební těleso se nepřerazilo, je pouze ohnuto [45]

Po změření rozměrů zkušební tělesa (h , b) a odečtení kinetické energie (E_c), která se spotřebovala na přeražení tohoto tělesa (vztahuje se na původní průřez zkušební tělesa) se vyhodnocuje rázová houževnatost (a_{cU}), která je dána vztahem 8.2. [45; 46]

$$a_{cU} = \frac{E_c}{h \cdot b} \quad \left[\frac{kJ}{m^2} \right] \quad (8.2)$$

, kde: b – tloušťka vzorku

h – šířka vzorku pod vrubem

9. Vyhodnocení naměřených dat

V této kapitole jsou vyhodnocena data, která byla naměřena při mechanických zkouškách zmíněných v kapitole 8. Mechanické zkoušky. Jsou zde porovnávány zejména plazmou modifikované a plazmou nemodifikované materiály.

U všech experimentálně zjištěných hodnot byl stanoven aritmetický průměr (viz rovnice 9.1) a směrodatná odchylka (viz rovnice 9.2).

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (9.1)$$

, kde:

\bar{x} – aritmetický průměr

x_i – prvek statistického souboru s indexem i

n – počet prvků statistického souboru

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (9.2)$$

, kde:

s – směrodatná odchylka

Aritmetický průměr a směrodatná odchylka jsou zobrazeny v grafech, které jsou výstupem vyhodnocených dat.

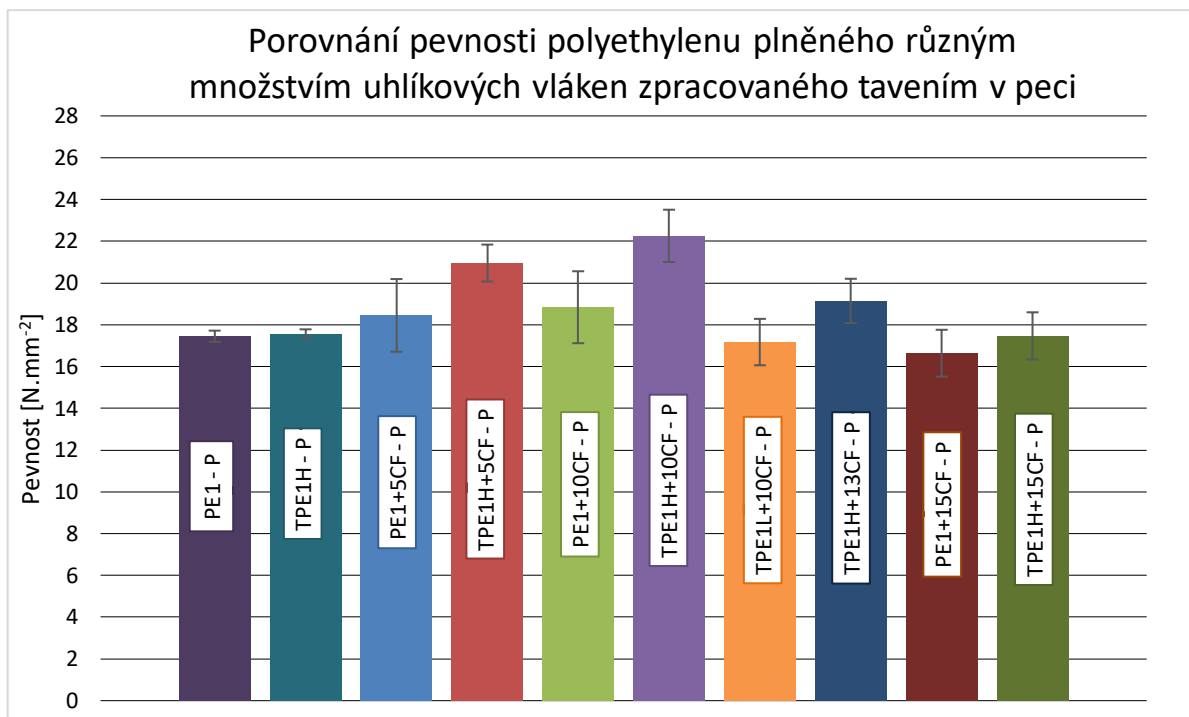
Aby byly hodnoty dostatečně vypovídající je třeba provést aspoň 5 měření pro každý připravený materiál. 3D tisk zkušebních tělísek byl však časově náročný a proto u některých vzorků zpracovaných 3D tiskem bylo bohužel provedeno méně než 5 měření, avšak vždy více než 1 měření (toto se týká dat na Obr. 46 – pro vzorky PE1 – T, PE5+10CF – T a na Obr. 47 – pro vzorky PE1+10CF – T, PE3+10CF – T a TPE1L+10CF – T.)

9.1 Zkouška tahem

Zkouška tahem byla provedena na vzorcích stejného materiálu, ale připravených odlišným způsobem.

9.1.1 Tahová zkouška zkušebních těles zpracovaných tavením v peci

V následujícím grafu (Obr. 42) je znázorněno porovnání pevnosti polyethylenu zpracovaného tavením v peci a plněného různým množstvím uhlíkových vláken. Tabulka hodnot, z kterých je tento graf vytvořen, je k dispozici v příloze č. 1.



Obr. 42 - Porovnání pevnosti polyethylenu plněného různým množstvím uhlíkových vláken zpracovaného tavením v peci

9.1.2 Tahová zkouška zkušebních těles zpracovaných v extruderu

V této kapitole je popsáno provedení zkoušky tahem filamentů získaných z extruderu. Pro upnutí filamentu byly použity speciální čelisti (viz Obr. 44), které jsou používány pro zkoušení vláken.

Přestože plocha průřezu není dokonalý kruh, jak je vidět na Obr. 43 (tj. fotografie pořízená na světelném mikroskopu), plocha byla vypočtena jako obsah kruhu, a to na základě opakovaného měření průměru na více místech každého vzorku filamentu. Z těchto měření se dále vypočítal aritmetický průměr (viz rovnice 9.1), z čehož byla vypočtena plocha. Jak lze vidět z Obr. 43, vlákna jsou v matrici rozmístěna rovnoměrně, což pozitivně ovlivňuje mechanické vlastnosti filamentu.

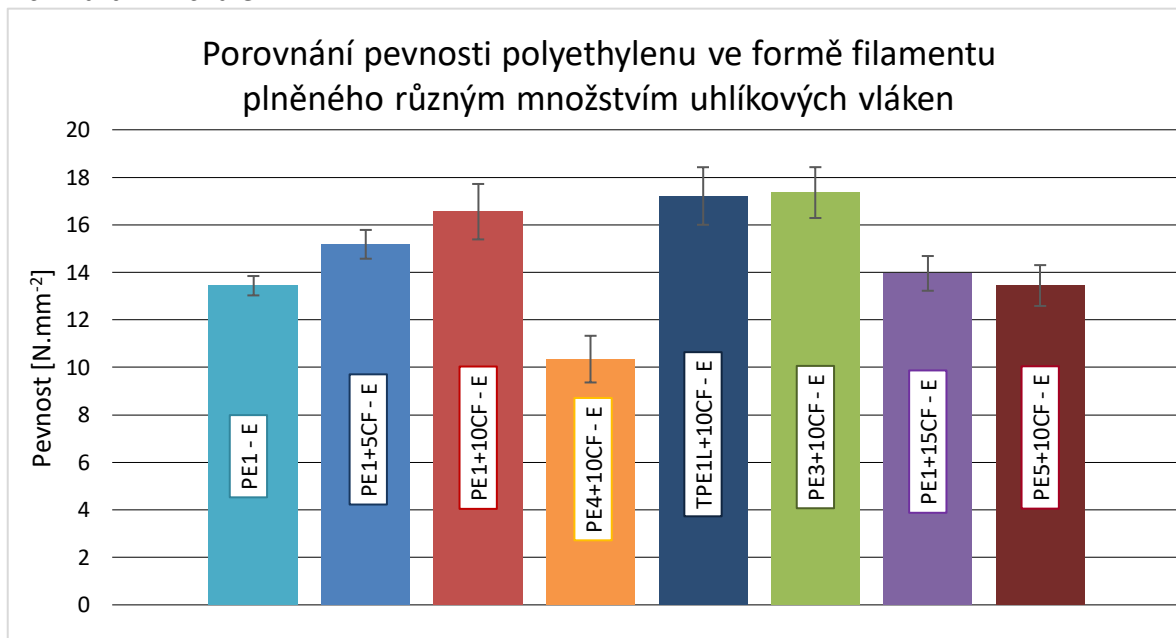


Obr. 43 – Řez filamentem PE+15CF



Obr. 44 – Upnutí filamentu do speciální čelisti

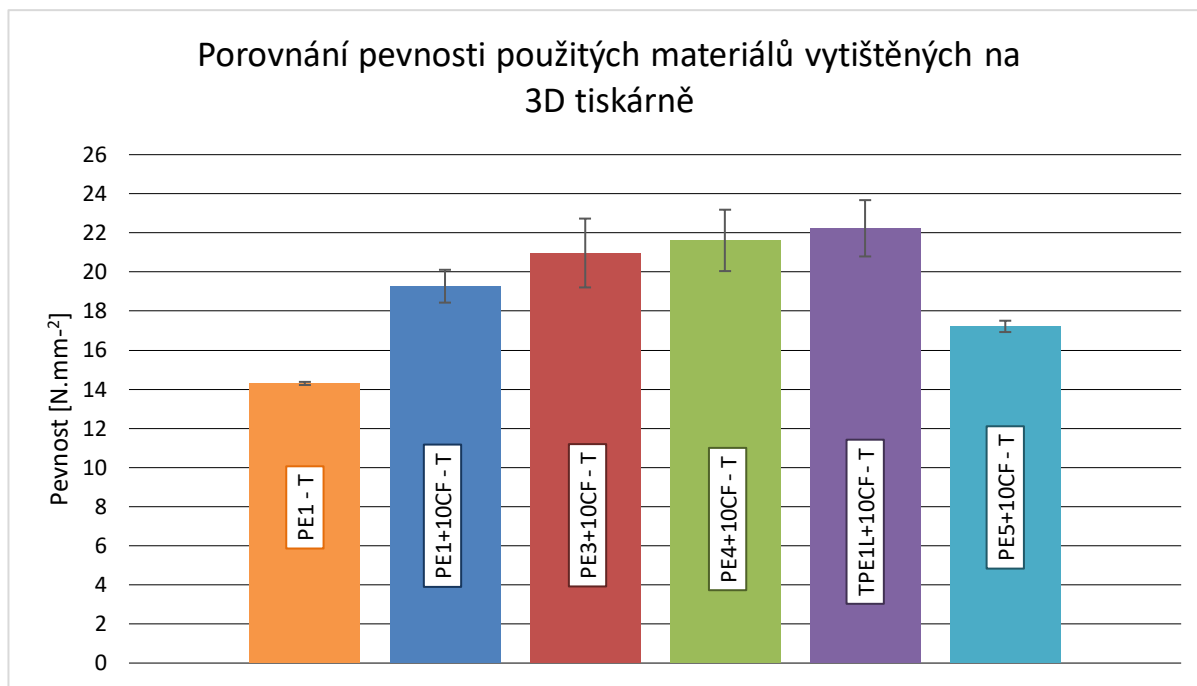
V následujícím grafu (Obr. 45) je znázorněno porovnání pevnosti polyethylenu zpracovaného extruderem, plněného různým množstvím uhlíkových vláken. Tabulka hodnot, z kterých je graf vytvořen, je k dispozici v příloze č. 2. Data jsou převzata z letošní diplomové práce s názvem 3D tisk kompozitních materiálů, jejíž autorem je pan Bc. Martin Michálek.



Obr. 45 - Porovnání pevnosti polyethylenu ve formě filamentu plněného různým množstvím uhlíkových vláken

9.1.3 Tahová zkouška zkušebních těles vytištěných na 3D tiskárně

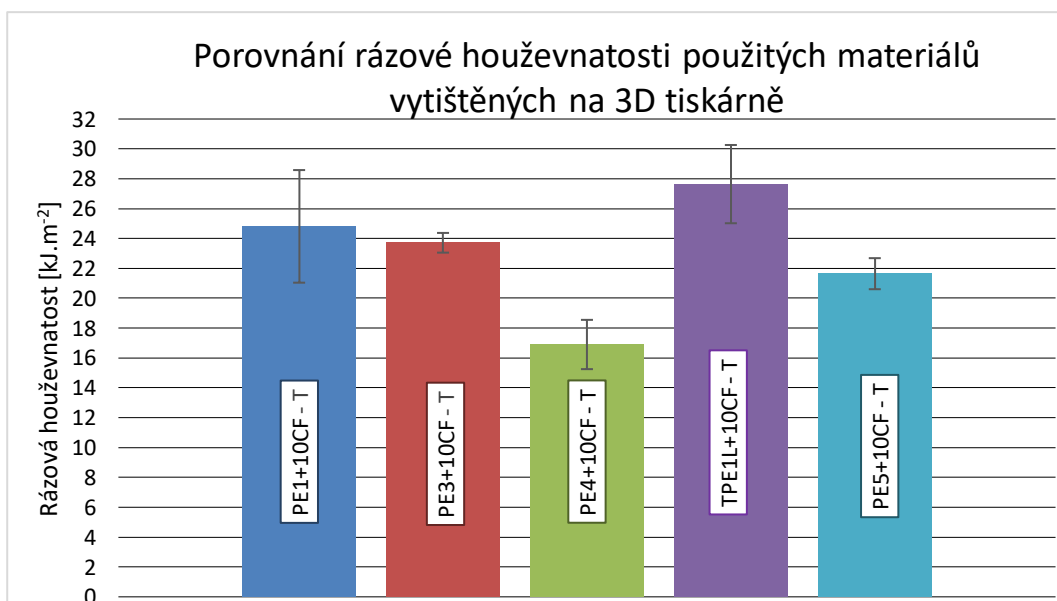
V této kapitole je popsáno provedení zkoušky tahem tělísek vytištěných na 3D tiskárně. Zkušební tělíska byla tištěna dle normy ISO 527 – 2 (tj. dle [43]), nicméně z důvodu efektivního tisku, a také ušetření přebytečného materiálu byly tištěny pouze prostřední části tělísek dle normy ISO 527- 2. Tělíska s průřezem 10 x 4 mm byla dlouhá 100 mm. V následujícím grafu (viz Obr. 46) je zobrazeno porovnání pevnosti použitých materiálů vytištěných na 3D tiskárně. Vzhledem k tomu, že pevnost vzorků tavených v peci byla nejvyšší pro koncentraci 10 % CF (viz Obr. 42), byl zde kladen důraz zejména na tuto koncentraci. Tabulka hodnot, z kterých je tento graf vytvořen, je k dispozici v příloze č. 3.



Obr. 46 - Porovnání pevnosti použitých materiálů vytištěných na 3D tiskárně

9.2 Zkouška rázem v ohybu

Zkouška rázem v ohybu byla provedena pouze pro vzorky zpracované technologií 3D tisku. Geometrie tištěných vzorků byla vzata z normy ISO 179 - 1. Pro zkoušený materiál bylo zprvu použito Charpyho kladivo 0,05 kp.m, avšak s tímto kladivem nedošlo k úplnému přeražení vzorků (tyto vzorky nejsou v následujícím grafu uvažovány). Z důvodu neúplného přeražení vzorků bylo třeba použít kladivo větší. Bylo zvoleno Charpyho kladivo 0,1 kp.m – s tímto kladivem došlo u všech vzorků k úplnému přeražení. V následujícím grafu (viz Obr. 47) je zobrazeno porovnání rázové houževnatosti použitých materiálů vytištěných na 3D tiskárně. Tabulka hodnot je k dispozici v příloze č. 4.



Obr. 47 - Porovnání rázové houževnatosti použitých materiálů vytištěných na 3D tiskárně

10. Diskuse

Tato práce je zaměřena na 3D tisk vlastního kompozitního materiálu.

Pro praktickou část byly vybrány dva polyethyleny jako matrice, jejichž hlavní odlišností byl velký rozdíl v MFI. Jako výztuž byla zvolena recyklovaná uhlíková vlákna. Vzhledem k tomu, že se tato vlákna značně aglomerovala, bylo třeba kompozitní směs pečlivě připravit. Obě fáze se navázily, uhlíková vlákna byla smíšena s IPA a dále byla tato směs vložena do ultrazvukové čističky na dobu 30 minut. Po vyjmutí vláken z ultrazvukové čističky byla uhlíková vlákna v IPA důkladně smíšena s polyethylenovou matricí. Dále byla tato kompozitní směs pomocí filtračního papíru zbavena IPA. Poté následovalo dodatečné vypařování IPA. Po odpaření IPA byla kompozitní směs přesítována za účelem zbavení se zbytku aglomerovaných vláken. Tento postup byl funkční, nicméně bylo by možné ho více optimalizovat. Například prodloužit čas, po který byla uhlíková vlákna v ultrazvukové čističce. Mohlo by tak dojít k menší ztrátě těchto vláken v kompozitu a zbytek aglomerovaných vláken by mohl být ještě menší. Také by stálo za zvážení použít jinou sloučeninu vhodnou pro zamezení aglomerace vláken než IPA, jelikož tato sloučenina může člověku způsobit při vdechnutí závratě.

Po přípravě kompozitní směsi následovalo její tavení v peci. Použité materiály byly taveny při teplotě 180 °C po dobu 20 minut. Po vychladnutí byly tyto vzorky mechanicky zkoušeny, po čemž následovalo jejich rozdrčení na granulát, který byl vstupním materiálem pro extruder.

Granulát byl vložen do násypky extruderu. Teploty zón uvnitř extruderu byly nastaveny dle odborného článku (viz [38]). Z důvodu předpokládaného abrazivního opotřebení trysky kvůli použití uhlíkových vláken byla zvolena ocelová tryska namísto standardní měkké trysky z mosazi. Vytlačovaný filament byl navíjen na cívku, která se otáčela konstantní rychlostí. Jelikož se při samotné extruzi vyskytovaly problémy s prověšováním filamentu (tedy jeho deformováním), těsně za trysku byla umístěna hliníková trubka. Tato trubka měla funkci zamezení deformace filamentu. Možnost, jak tomuto problému s deformací filamentu ještě více zabránit, by mohla být použití externího ventilátoru k dodatečnému chlazení vytlačovaného filamentu, za účelem jeho rychlejšího tuhnutí.

Po získání kompozitního filamentu následovala optimalizace tiskových parametrů 3D tiskárny v rozhraní programu Ultimaker Cura 4.8.0. V tomto programu byly nastaveny tři základní parametry, a to: teploty (trysky a podložky), rychlosti tisku a výšky vrstev. Oproti odbornému článku, jehož autorem je Piotr Olesik a kol., (tj. [39]) byla rychlost tisku více než desetinásobná. Oproti odbornému článku, jehož autorem je Carl. G.

Schirmeister a kol., (tj. [38]), byla rychlosti tisku téměř 1,5krát větší. Přestože byla tělíska tištěna značně větší rychlostí, vysoká kvalita na jejich povrchu byla u většiny zachována. Nastává však otázka, zda s těmito parametry lze tisknout i díly značně složitější. Zmiňovaný program nabízí daleko širší spektrum volitelných parametrů, kterými by bylo možné tisk ještě více optimalizovat a zefektivnit. Toto by mohl být námět pro navázání na tuto práci.

Vyrobené testovací vzorky zpracované různými technologiemi bylo třeba charakterizovat. Z tohoto důvodu byly tyto materiály podrobeny dvěma mechanickým zkouškám – zkoušce tahem a zkoušce rázem v ohybu. Mezi první vzorky, které byly podrobeny zkoušce tahem, byly vzorky vyrobené tavením v peci. Těchto vzorků bylo velké množství o čtyřech různých koncentracích uhlíkových vláken. Při vyhodnocení meze pevnosti v tahu bylo zjištěno, že nejvyšší hodnoty pevnosti mají plazmově modifikované vzorky s deseti a pěti procenty uhlíkových vláken. Při vyšších koncentracích těchto vláken dochází k poklesu pevnosti, což je pravděpodobně zapříčiněno přesycením, a také z důvodu, že vlákna nejsou v matrici roz distribuována. Z tohoto důvodu byla na koncentraci 5 a 10 % kladena pozornost. Při vyhodnocování meze pevnosti v tahu filamentů, vyšel nejlépe PE3+10CF – E. Nejmenší pevností zde disponoval filament PE4+10CF – E. Avšak, tištěné vzorky z tohoto filamentu měly druhou nejvyšší pevnost, hned po TPE1L+10CF – T. Všechny tištěné kompozitní materiály měly značně vyšší pevnost než vytištěný polyethylen v základním stavu (vytištěný polyethylen v základním stavu se bohužel podařilo vytisknout pouze dvakrát). Geometrie tištěných tělísek pro zkoušku tahem byla zpočátku totožná jako geometrie tělísek z normy ISO 527 – 2. Nicméně z důvodu nedostatku materiálu a nežádoucímu smršťování okrajových částí tělíska, byla tištěna pouze prostřední část tělíska. Při vyhodnocování pevnosti zde bylo experimentálně zjištěno, že tělíska, která mají lepší kvalitu povrchu a jsou vizuálně lépe vytištěna, vykazují paradoxně menší pevnost než tělíska s horší kvalitou povrchu a ne zcela přesnou geometrií. Patrně z tohoto důvodu mají směrodatné odchylky znázorněné v grafech natolik vysoké hodnoty. Pro zkoušku rázem v ohybu byly vyhodnocovány pouze tělíska vyrobené technologií 3D tisku. V tomto případě byla geometrie tělísek zcela totožná geometrii tělísek z normy ISO 179 – 1 (tj. [45]). Nejvyšší rázovou houževnatost zde měly vzorky TPE1L+10CF – T (PE1 – T má a_{cu} o 40 % vyšší; pozn. jde pouze o jedno měření). Podobně jako u zkoušky tahem zde záviselo, zda vzorky vypadaly vizuálně lépe či nikoliv. Tentokrát ale s tím rozdílem, že vzorky, které vypadaly vizuálně lépe měly rázovou houževnatost vyšší. Tento fakt byl opět důvodem velkých směrodatných odchylek u některých materiálů. Z tohoto důvodu by bylo vhodné zde ještě prozkoušet pevnost i rázovou houževnatost tělísek v závislosti na různých rychlostech tisku.

11. Závěr

Byla vypracována teoretická rešerše rozdělená na dvě hlavní části, a to na kompozitní materiály a na technologie 3D tisku. V kapitole kompozitních materiálů bylo postupováno od základních pojmů až po parametry a srovnání vybraných vláken. V kapitole zabývající se technologií 3D tisku byly vysvětleny jeho metody, problematika tisku kompozitních materiálů a také zmíněna aplikace aditivních technologií ve světě.

Praktická část práce byla zaměřena na přípravu kompozitní směsi, jež byla nadále zpracována různými technologiemi, a poté mechanicky zkoušena. Kompozit byl tvořen polymerní matricí, kterou tvořily různé formy polyethylenu, a výztuží, kterou tvořila recyklovaná uhlíková vlákna.

Tyto kompozitní materiály byly zpracovány technologiemi:

- ✓ Tavením v peci – touto technologií bylo vyrobeno 10 variant vzorků
- ✓ Extruzí - touto technologií bylo vyrobeno 8 variant filamentů
- ✓ 3D tiskem - touto technologií bylo vyrobeno 6 variant tělísek

Tyto materiály byly podrobeny mechanickým zkouškám:

- ✓ Zkoušce tahem (dle ISO 527 – 2)
 - Zkouška tahem byla provedena jak pro tělíska vytištěná na 3D tiskárně, tak pro tělíska zpracovaná tavením v peci.
- ✓ Zkoušce rázem v ohybu (dle ISO 179 – 1)
 - Zkouška rázem v ohybu byla provedena pouze pro tělíska vytištěná na 3D tiskárně.

Mechanické zkoušky ukázaly na obecně nejlepší vlastnosti kompozitu při plnění 10 % uhlíkovými vlákny. Nejdůležitější poznatky z výsledků mechanických zkoušek jsou shrnuty v následujících bodech:

- Zkouška tahem vytištěných tělísek prokázala nejvyšší pevnost u plazmou modifikovaného polyethylenu plněného deseti procenty uhlíkových vláken. Pevnost tohoto materiálu je $23,2 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$, což je o cca 60 % vyšší hodnota než pevnost vytištěného polyethylenu v základním stavu a o 20 % vyšší hodnota než pevnost odpovídajícího polyethylenu bez plazmové modifikace.
- Pomocí zkoušky rázem v ohybu bylo ověřeno, že při navýšení pevnosti vytištěných tělísek nedošlo k významnému poklesu rázové houževnatosti. Tělíska s nejvyšší pevností měla zároveň i největší houževnatost ($a_{cU} = 25,8 \text{ kJ}\cdot\text{m}^{-2}$).

Cílem práce bylo vytisknutí vlastního kompozitního materiálu metodou FDM a zkoušení jeho mechanických vlastností. Cíl práce byl splněn.

12. Bibliografie

- [1] Aerospace Applications. *CompositesLab* [online]. Australia: American Composites Manufacturers Association, 2016 [cit. 2020-11-30]. Dostupné z: <http://compositeslab.com/where-are-composites-used/aerospace-applications/>
- [2] MACEK, Karel a Petr ZUNA. *Nauka o materiálu*. Praha: ČVUT, 1999. ISBN 80-01-01507-6.
- [3] JANOVEC, Jiří, Jiří CEJP a Josef STEIDL. *Perspektivní materiály*. Vyd. 3., přeprac. V Praze: České vysoké učení technické, 2008. ISBN 978-80-01-04167-3.
- [4] DEBORAH, D. L. CHUNG. *Composite materials science and applications*. 2nd edition. London: Springer, 2010. ISBN 978-184-8828-315.
- [5] BAREŠ, Richard A. *Kompozitní materiály*. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, n. p., 1988. ISBN 04-734-88.
- [6] EHRENSTEIN, Gottfried W. *Polymerní kompozitní materiály*. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [7] KAŠPÁRKOVÁ, Kristýna. *3D tisk kompozitů*. Brno, 2020. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Jan Zouhar, Ph.D.
- [8] JANČÁŘ, Josef. *Úvod do materiálového inženýrství polymerních kompozitů*. Vyd. 1. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2003. ISBN 80-214-2443-5.
- [9] KREBS, Stefan, Ladislav KOLAŘÍK a Barbora BRYKSÍ STUNOVÁ. *Teorie zpracování plastů a kompozitů*. 1. vydání. V Praze: České vysoké učení technické, 2020. ISBN 978-80-01-06722-2.
- [10] Přejchodové teploty polymerů. *Publi* [online]. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2015 [cit. 2021-06-22]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/06.html>
- [11] VRBKA, Jan. Mechanika kompozitů. In: *Vysoké učení technické v Brně* [online]. Brno: VUT, 2000 [cit. 2020-10-17]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/predmety/detail/233640>
- [12] DAĐOUREK, Karel. Kompozitní materiály: Definice a rozdělení. *Katedra materiálu* [online]. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2008 [cit. 2020-10-30]. Dostupné z: http://www.kmt.tul.cz/edu/podklady_kmt_magistri/KM/Kompozity%20Dad/02defrozd.pdf
- [13] PARK, Soo-Jin. *Carbon fibers*. 2nd edition. Dordrecht: Springer, 2015. Springer series in materials science. ISBN 978-94-017-9477-0.
- [14] MACHEK, Václav a Jaromír SODOMKA. *Nauka o materiálu - 4. část: Polymery a kompozity s polymerní maticí*. Praha: ČVUT, 2008. ISBN 978-80-01-03927-4.

- [15] DAĐOUREK, Karel. *Kompozitní materiály: Druhy a jejich využití*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2007. ISBN 978-80-7372-279-1.
- [16] KLOSKI, Liza Wallach a Nick KLOSKI. *Začínáme s 3D tiskem*. 1. vydání. Přeložil Jakub GONER. Brno: Computer Press, 2017. ISBN 978-80-251-4876-1.
- [17] VALINO, Arnaldo D., John Ryan C. DIZON, Alejandro H. ESPERA, Qiyi CHEN, Jamie MESSMAN a Rigoberto C. ADVINCULA. Advances in 3D printing of thermoplastic polymer composites and nanocomposites: Progress in Polymer Science. *Advances in 3D printing of thermoplastic polymer composites and nanocomposites* [online]. 2019, **98**, 1-5 [cit. 2020-11-28]. ISSN 0079-6700. Dostupné z: doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2019.101162
- [18] Průvodce materiály. *PRUSA RESEARCH by Josef Prusa* [online]. Prusa research a.s., 2020 [cit. 2020-10-18]. Dostupné z: <https://www.prusa3d.cz/materialy/>
- [19] BĚHÁLEK, Luboš. *Polymery: Termoplasty – základní druhy*. *Publi* [online]. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2016 [cit. 2021-02-17]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/18.html>
- [20] Polyamides. *Knudsen* [online]. Præstø, Denmark: KNUDSEN EXTRUSION [cit. 2020-10-31]. Dostupné z: <https://www.pkkaps.dk/pkk-uk/materialer-uk.html>
- [21] PA11 RILSAN® – SÍLU SI BERE Z PŘÍRODY. *Resinex* [online]. Praha: Resinex, 2020 [cit. 2020-12-05]. Dostupné z: <https://www.resinex.cz/produkty/rilsan.html>
- [22] HODEK, Josef. *Aditivní technologie: Zpráva o stavu 3D tisku pro Českou technologickou platformu STROJÍTENSTVÍ, o.s.* *Docplayer* [online]. Dobřany: COMTES FHT a.s., 2014 [cit. 2020-11-28]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/18792004-Aditivni-technologie-zprava-o-stavu-3d-tisku-pro-ceskou-technologickou-platformu-strojitenstvi-o-s-josef-hodek.html>
- [23] POHOŘELSKÝ, Zbyněk. *FDM technologie (Fused Deposition Modeling)*. *Inventor3Dblog* [online]. Brno: Inventor3Dblog, 2016 [cit. 2020-11-28]. Dostupné z: <https://www.inventor3dblog.cz/fdm-technologie/>
- [24] GOH, Duo Dong, Yee Ling YAP a Schweta AGARWALA. Recent progress in Additive Manufacturing of Fiber Reinforced Polymer Composite. *Advanced Materials Technologies* [online]. 2018, , 1-8 [cit. 2020-11-29]. Dostupné z: [doi:10.1002/admt.201800271](https://doi.org/10.1002/admt.201800271)
- [25] KABIR, S. M. Fijul, Kavita MATHUR a Abdel-Fattah M. SEYAM. A critical review on 3D printed continuous fiber-reinforced composites: History, mechanism, materials and properties. *Composite Structures* [online]. USA: North Carolina State University, 2020, **232** [cit. 2020-11-29]. ISSN 0263-8223. Dostupné z: [doi:10.1016/j.compstruct.2019.111476](https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111476).
- [26] *Stereolithography* [online]. Olney, USA: CustomPartNet, 2008 [cit. 2020-11-29]. Dostupné z: <https://www.custompartnet.com/wu/stereolithography>

- [27] IGNAZIO, Blanco. The Use of Composite Materials in 3D Printing. *Journal of Composite Science* [online]. 2020, , 8-10 [cit. 2020-12-06]. Dostupné z: doi:10.3390/jcs4020042
- [28] *Selective Laser Sintering* [online]. Olney, USA: CustomPartNet, 2008 [cit. 2020-11-29]. Dostupné z: <https://www.custompartnet.com/wu/selective-laser-sintering>
- [29] QINGHAO, He, Wang HONGJIAN, Fu KUNKUN a Ye LIN. 3D printed continuous CF/PA6 composites: Effect of microscopic voids on mechanical performance. *Composites Science and Technology* [online]. 2020, **2020**(191) [cit. 2020-12-06]. ISSN 0266-3538. Dostupné z: doi:10.1016/j.compscitech.2020.108077
- [30] JOYEE, Erina Baynojir Joyee, Lu LU a Yayue PAN. Analysis of mechanical behavior of 3D printed heterogeneous particle-polymer composites. *Composites Part B: Engineering* [online]. 2019, **2019**(173), 1-10 [cit. 2021-02-16]. ISSN 1359-8368. Dostupné z: doi:org/10.1016/j.compositesb.2019.05.051.
- [31] MOHAMMADIZADEH, M., A. IMERI, I. FIDAN a M. ELKELANY. 3D printed fiber reinforced polymer composites - Structural analysis. *Composites Part B: Engineering* [online]. USA, 2019, **2019**(175) [cit. 2020-12-12]. ISSN 1359-8368. Dostupné z: doi:10.1016/j.compositesb.2019.107112
- [32] CARNEIRO, O.S., A.F. SILVA a R. GOMES. Fused deposition modeling with polypropylene. *Materials & Design* [online]. 2015, **2015**(83), 1-9 [cit. 2021-02-16]. ISSN 0264-1275. Dostupné z: doi:org/10.1016/j.matdes.2015.06.053
- [33] TEKINALP, Halil L. KUNC, Gregorio M. VELEZ-GARCIA, Chad E. DUTY, Lonnie J. LOVE a K. AMIT. Highly oriented carbon fiber-polymer composites via additive manufacturing,. *Composites Science and Technology* [online]. 2014, **2014**(105), 144-150 [cit. 2021-02-16]. ISSN 0266-3538. Dostupné z: doi:org/10.1016/j.compscitech.2014.10.009.
- [34] PLA. *Materialpro3d* [online]. Brno: Materialpro3d [cit. 2021-06-30]. Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/materialovy-slovník/pla/>
- [35] Material Data Center Datasheet of DOWLEX™ 2629.10UE - (PE-LLD) - The Dow Chemical Company. *Material Data Center* [online]. Germany: M-Base Engineering + Software GmbH, 2011 [cit. 2021-02-17]. Dostupné z: <https://www.materialdatacenter.com/ms/en/Dowlex/The+Dow+Chemical+Company/DOWLEX%E2%84%A2+2629%252E10UE/e76242af/699>
- [36] RXP 1001 NATURAL (LD/70/600μ). *Resinex* [online].
- [37] MSV STUDÉNKA s.r.o. *MSV STUDÉNKA s.r.o.* [online]. Bílovec: MSV STUDÉNKA s.r.o., 2012 [cit. 2021-06-24]. Dostupné z: <http://www.msvstudenka.cz/>

- [38] SCHIRMEISTER, Carl G., Timo HEES, Erik H. LICHT a Rolf MÜLHAUPT. *3D printing of high density polyethylene by fused filament fabrication: Additive Manufacturing* [online]. 2019, **2019**(28), 152-159 [cit. 2021-05-12]. ISSN 2214-8604. Dostupné z: doi:10.1016/j.addma.2019.05.003.
- [39] OLESIK, Piotr, Marcin GODZIERZ a Mateusz KOZIOŁ. Preliminary Characterization of Novel LDPE-Based Wear-Resistant Composite Suitable for FDM 3D Printing. *Materials* [online]. 2019, **2019**(12), 1-19 [cit. 2021-06-13]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.3390/ma12162520>
- [40] ČSN EN ISO 527 - 1: *Plasty - Stanovení tahových vlastností - Část 1: Obecné principy*. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012.
- [41] ČIŽMÁROVÁ, Elena a Jana SOBOTOVÁ. *Nauka o materiálu I. a II.: cvičení*. 1. vyd. V Praze: České vysoké učení technické, 2014. ISBN 978-80-01-05550-2.
- [42] Mechanické vlastnosti polymerů – statické namáhání. *Publi* [online]. Liberec: Technická univerzita v Liberci [cit. 2021-02-21]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/09.html>
- [43] ČSN EN ISO 527 - 2: *Plasty - Stanovení tahových vlastností - Část 2: Zkušební podmínky pro tvářené plasty*. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012.
- [44] MTS Exceed® Series 40 Electromechanical Universal Test Systems (katalog). *Measure Test Simulate (MTS)* [online]. Eden Prairie, MN 55344 USA: MTS, 2017 [cit. 2021-03-14]. Dostupné z: https://www.mts.com/cs/groups/public/documents/library/mts_2011071.pdf
- [45] ČSN EN ISO 179 - 1: *Plasty - Stanovení rázové houževnatosti metodou Charpy - Část 1: Neinstrumentovaná rázová zkouška*. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.
- [46] Mechanické vlastnosti polymerů – dynamické rázové namáhání. *Publi* [online]. Liberec: Technická univerzita v Liberci [cit. 2021-03-03]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/11.html>

Seznam použitých obrázků

- Obr. 1 – Synergetický efekt uplatňující se u kompozitních materiálů [4]
Obr. 2 – Struktura a detail skleněného vlákna [6]
Obr. 3 – Ideální grafitová struktura uhlíkového vlákna [6]
Obr. 4 - Uhlíkové vlákno - mikrostruktura [6; 13]
Obr. 5 – Rozdělení uhlíkových vláken (inspirováno dle [6])
Obr. 6 – Detail aramidového vlákna [6]
Obr. 7 - Vliv vlastností aramidových, skleněných a uhlíkových vláken na průběh zatěžovacího diagramu jednosměrně vyztuženého laminátu při tahové zkoušce (inspirováno dle [6])
Obr. 8 -Přenos tahového zatížení z matrice do vlákna, průběh napětí podél vlákna (inspirováno dle [15])
Obr. 9 – Rozhraní fází – zaklínění (inspirováno dle [15])
Obr. 10 - Znázornění smáčivosti (resp. nesmáčivosti) dvou látek (inspirováno dle [15])
Obr. 11 - Princip vytrhávací zkoušky (inspirováno dle [15])
Obr. 12 - Princip příčného testu kompozitu (inspirováno dle [15])
Obr. 13 - Princip podélného testu kompozitu s výřezy (inspirováno dle [15])
Obr. 14 - Postup při 3D tisku [17]
Obr. 15 - Princip technologie FDM [22]
Obr. 16 - Vzduchové dutiny [23]
Obr. 17 - Ukázka vytlačování plněného filamentu [24]
Obr. 18 - Schéma tisknutí kontinuálního vlákna prostřednictvím upravené tiskové hlavy [25]
Obr. 19 - Schéma tisknutí metodou Markforged [25]
Obr. 20 - Schéma metody SLA [26]
Obr. 21 – Schéma metody SLS [28]
Obr. 22 - Použití aditivních technologií v různých oborech (rok 2012) (data viz [22])
Obr. 23 - Ukázka nedostatečné adheze; a, b - [31]; c - [29] ; d - [33]
Obr. 24 - Popis nedostatečné adheze [33]
Obr. 25 - Postup přípravy vzorků k dalšímu zpracování
Obr. 26 - Použitý extruder
Obr. 27 - Schéma extruze a navíjení filamentu na cívku
Obr. 28 – Pozice vyhřívaných zón v extruderu [9]
Obr. 29 – Plněný filament navinutý na cívce
Obr. 30 - Měření průměru filamentu
Obr. 31 - Schéma postupu při aplikování vlastního filamentu
Obr. 32 – Porovnání vytištěných tělísek při použití různých tiskových podložek [38]
Obr. 33 – Vliv teploty trysky na mechanické vlastnosti vytištěného dílu [38]
Obr. 34 – Nastavení teplot - Ultimaker Cura 4.8.0
Obr. 35- Porovnání kvality povrchu vytištěných tělísek při různých rychlostech tisku [38]
Obr. 36 – Prohnutí filamentu vlivem velké rychlosti tisku [39]
Obr. 37 – Nastavení rychlostí - Ultimaker Cura 4.8.0
Obr. 38 – Nastavení výšky vrstvy - Ultimaker Cura 4.8.0
Obr. 39 – Tisk zkušebního tělíska pro zkoušku tahem

Obr. 40 – Vytištěné zkušební tělísko pro zkoušku rázem v ohybu

Obr. 41- Systém vlastního značení vzorků

Obr. 42 - Porovnání pevnosti polyethylenu plněného různým množstvím uhlíkových vláken zpracovaného tavením v peci

Obr. 43 - Řez filamentem PE+15CF

Obr. 44 - Upnutí filamentu do speciální čelistí

Obr. 45 – Porovnání pevnosti polyethylenu ve formě filamentu plněného různým množstvím uhlíkových vláken

Obr. 46 - Porovnání pevnosti použitých materiálů vytištěných na 3D tiskárně

Obr. 47 - Porovnání rázové houževnatosti použitých materiálů vytištěných na 3D tiskárně

Seznam použitých tabulek

Tabulka 1 – Důležité vlastnosti neupravených skleněných vláken [6]

Tabulka 2 - Vlastnosti jednosměrně vyztuženého epoxidového laminátu vysokomodulovým aramidovým vláknem (obsah výztuže 65 až 70 objem. %) [6]

Tabulka 3 - Elastické charakteristiky různých vláken, názorná míra anizotropie [6]

Tabulka 4 - Přehled vlastností skleněných, uhlíkových a aramidových vláken [6]

Tabulka 5 - Orientační ceny jednotlivých vláken [6]

Tabulka 6 - Shrnující tabulka - všeobecné srovnání kompozitů vyztužených různými vlákny [6]

Tabulka 7 – Přehled vybraných vlastností materiálu Dowlex 2629.10UE [35]

Tabulka 8 – Přehled vybraných vlastností materiálu RXP 1001 NATURAL LD/70/600 μ (PE2) [36]

Tabulka 9 - Přehled vybraných vlastností použitých uhlíkových vláken

Tabulka 10 – Srovnání vlastností použitých materiálů

Tabulka 11 – Parametry pro extruzi [38]

Tabulka 12 – Shrnutí nastavených parametrů

Seznam příloh

Příloha č. 1 – Tabulka hodnot pro pevnosti polyethylenu zpracovaného tavením v peci

Příloha č. 2 – Tabulka hodnot pro pevnosti polyethylenu zpracovaného extruzí

Příloha č. 3 – Tabulka hodnot pro pevnosti polyethylenu zpracovaného 3D tiskem

Příloha č. 4 - Tabulka hodnot rázových houževnatostí polyethylenu zpracovaného 3D tiskem