

Skúmanie materiálových vlastností kompozitných materiálov na báze dreveného odpadu pre FDM Aditívnu výrobu

Juraj BENIAK, Klaudia KLEPOCHOVÁ, Michal HOLDY, Ľubomír ŠOOŠ
Strojnícka fakulta, Slovenská Technická Univerzita v Bratislave, Nám. Slobody 17,
812 31 Bratislava, Slovenská republika,
e-mail: juraj.beniak@stuba.sk

Abstrakt

Kompozitné materiály sú bežne vyžívané v technickej praxi. Skladajú sa z dvoch alebo viacerých materiálov s rôznymi chemickými a fyzikálnymi vlastnosťami. Kompozitný materiál sa používa na zlepšenie vlastností základných materiálov. Kompozity ponúkajú významné výhody v rôznych aspektoch materiálového výkonu, čím prevyšujú monomateriálové alternatívy a najmä samostatné použitie jednotlivých častí. Väčšina umelých kompozitov kombinuje vlákna s vysokou pevnosťou v ťahu, ktoré sú flexibilné, s matricou, ktorá formuje vlákna do tuhej štruktúry, ktorá získava pevnosť v tlaku matricového materiálu. Výsledkom je kombinovaný materiál, ktorý ťaží z pevnosti v ťahu vláknovej výstuže, pevnosti matrice v tlaku a pevnosti v ohybe ich spojenia, aby sa vytvoril pevný, tuhý, tuhý a ohyb odolný výsledný materiál.

Kompozitné materiály sa využívajú i v Aditívnej výrobe, kde prinášajú úplne inú kvalitatívnu úroveň vyrábaných dielov. Záleží od využívanej technológie aditívnej výroby, aký kompozitný materiál sa využíva. V tomto príspevku sa budeme venovať technológii FDM (Fused Deposition Modeling), ktorá je založená na extrúdovaní vlákien polymérov, ktoré sa vrstva po vrstve na seba ukladajú aby vytvorili požadovaný tvar vyrábaného dielu. Keďže ide o technológiu založenú na polymérnych materiáloch (presnejšie povedané na termoplastoch), budeme sa venovať kompozitným materiálom práve na tomto základe. Čiže základnou matricou bude termoplast.

Kľúčové slová: kompozitné materiály, Aditívna výroba, drevený odpad, FDM technológia, 3D tlač.

Úvod

Pre lepšie rozptýlenie aditívnych častíc v kompozitnej tlačovej strune je vhodné sa pri vývoji takejto tlačovej struny zaoberať aj rozdrvením a opätovným pretláčaním materiálu cez extrúder v zariadení na to určenom. Avšak tu vzniká otázka, či bude mať takto recyklovaný materiál postačujúce mechanické vlastnosti. Preto sa treba bližšie pozrieť na degradáciu polymérov.

Väčšina plastov sa rozkladá najprv na povrchu polyméru, ktorý je vystavený a prístupný chemickému alebo enzymatickému pôsobeniu. Preto degradácia mikroplastov prebieha rýchlejšie ako mezoplastov a makroplastov, keďže mikroplasty majú vyšší pomer povrchu k objemu. Prvými vizuálnymi účinkami degradácie polyméru sú zmeny farby a popraskanie povrchu. Povrchové praskliny sprístupňujú vnútro plastového materiálu pre ďalšiu degradáciu, čo nakoniec vedie ku krehkosti a rozpadu ¹.

Spracovanie polymérov často aktivuje degradáciu materiálu, ktorá do určitej miery ovplyvňuje vlastnosti alebo životnosť vyrobených produktov. Degradácia polymérov sa zvyčajne prejavuje zmenami molekulovej hmotnosti v dôsledku vystavenia vysokým teplotám pri spracovaní a príslušnému mechanickému namáhaniu. V práci autora C. Capone a kol. sa zistilo, že materiály spracované pri najvyššej rýchlosti extrudéra vykazovali najnižšiu redukciu molekulovej hmotnosti. Pripisuje sa to kratšiemu času zotrvania v extrudéri a možnosti lepšieho kĺzania materiálu po stenách extrudéra, čo pravdepodobne znižuje skutočné šmykové napätie a viskóznou rozptýliteľnosť pri podmienkach technológie RP (rapid prototyping - rýchla tvorba prototypov) ².

Degradácia polyméru znamená nekontrolovanú redukciu molekulovej hmotnosti alebo zmenu konštrukcie polyméru. V technologickom zmysle sa akákoľvek nežiaduca zmena vlastností polyméru v dôsledku vystavenia degradačnému pôsobeniu nazýva degradácia polyméru. Polymér môže degradovať najmä v dvoch fázach svojej existencie, počas výrobného procesu a počas jeho každodenného používania. Degradácia je spôsobená teplom, mechanickým namáhaním, slnečným žiarením, atmosférickým kyslíkom, vlhkosťou a inými javmi³.

Degradáciu polymérov vo všeobecnosti rozdeľujeme do dvoch typov:

- náhodná degradácia,
- degradácia na konci reťazca.

K náhodnej degradácii dochádza v ľubovoľnom náhodnom bode polymérneho reťazca, je to opačný proces ako poly-kondenzácia. Polymér sa pri náhodnej degradácii rozkladá na fragmenty s nižšou molekulovou hmotnosťou, ale nedochádza k čiastočnému uvoľňovaniu monoméru.

Pri druhom type sa degradácia začína na konci reťazca, čo vedie k postupnému uvoľňovaniu monomérnych jednotiek. Tento jav je vlastne opačným procesom propagácie v reťazci polymerizácie. Z tohto dôvodu sa tento typ degradácie nazýva aj depolymerizácia. Pri degradácii na konci reťazca sa molekulová hmotnosť polyméru znižuje pomaly a súčasne sa uvoľňuje veľké množstvo monoméru³.

Degradácia polyméru môže byť spôsobená:

1. fyzikálnymi činiteľmi:
 - a) teplom,
 - b) mechanickým namáhaním,
 - c) ultrazvukovými vlnami,
 - d) svetlom,
 - e) vysoko-energetickým žiarením.
2. chemickými činiteľmi:
 - a) oxidáciou/Koróziou,
 - b) hydrolýzou (rozklad látky pôsobením vody),
 - c) alkoholom,
 - d) kyselinou.
3. biologickými činiteľmi (pôsobením enzýmov a baktérií)³.

Tepelná degradácia polymérov je komplexný proces, ktorý môže zahŕňať náhodné štiepenie, depolymerizáciu a elimináciu bočných skupín, čo vedie k zmenám molekulovej hmotnosti polyméru a strate užitočných vlastností, ako je farba, mechanická pevnosť a odolnosť proti nárazu. Rýchlosť a rozsah degradácie, prebiehajúcej radikálovými, iónovými cestami, alebo ich kombináciou, možno monitorovať pomocou zmien hmotnosti vzorky, zmien jej molekulovej hmotnosti, detekcie a kvantifikácie zmeny reakčnej entalpie a kvalitatívnej analýzy vedľajších prchavých produktov. Pochopenie mechanizmov degradácie v polymérnych materiáloch ďalej komplikujú faktory, ako sú komplexná morfológia, difúzne procesy a interakcie medzi prísadami. Poznanie mechanizmov tepelnej degradácie polymérov zohráva kľúčovú úlohu pri ich stabilizácii s cieľom predĺžiť životnosť polymérov, alebo sa využíva na urýchlenie rozkladu počas procesov tepelnej recyklácie⁴.

Mechanická degradácia - Jednoduchú zlúčeninu, ako je voda a benzén, nie je možné degradovať mechanickým namáhaním. Nevieme to dosiahnuť napríklad ani miešaním či mletím pri vysokej rýchlosti. Naopak polymér, ako je polystyrén, ktorý je rozpustený v rozpúšťadle a je vystavený silnému miešaniu alebo mletiu, prechádza značnou molekulovou degradáciou, alebo fragmentáciou. Tento jav sa nazýva mechanická degradácia. Napríklad v gumárenskom priemysle sa kaučuk lisuje prechodom cez dva rotujúce valce, aby sa znížila jeho molekulová hmotnosť a aby sa dal lepšie spracovať. Pri lisovaní sa tvrdá a húževnatá guma mení na pružnú a dokonca polotuhú hmotu³.

Degradácia pôsobením svetla – fotodegradácia - Proces rozkladu molekulovej hmotnosti vyvolaný ultrafialovým svetlom sa nazýva fotodegradácia. Žltnutie priehľadných plastov alebo farebných gumových článkov je spôsobené ich interakciou s ultrafialovým svetlom. Fotostabilizátory v značnej miere chránia polyméry pred znehodnocujúcim účinkom svetla. Funkciou fotostabilizátora je absorbovať

UV žiarenie a takto absorbovanú energiu rozptýliť do prostredia v neškodnej forme. Absorbovaná energia sa odovzdáva späť ako teplo alebo žiarenie s dlhšou vlnovou dĺžkou. Stabilizátor pritom pôsobí ako tlmič a neumožňuje, aby energia žiarenia zasiahla molekuly polyméru.

Experimentálna časť

Praktická časť sa skladá z prevedenia experimentov, v ktorých sa skúmajú materiálové vlastnosti vyrobených vzoriek z kompozitných materiálov, FDM technológiou 3D tlače. Materiálové vlastnosti sa menia na základe parametrov tlače. Parametrami sú: výška vrstvy, priemer dýzy a teplota tlače. Faktory a ich úrovne sú v jednotlivých experimentoch prehľadne zobrazené v tabuľkách.

Na základe rešerše vedeckej literatúry, bol stanovený predpoklad, že na mechanické vlastnosti vo veľkej miere vplyva hustota výplne. Z tohto dôvodu sa rozhodlo pri experimente použiť pri všetkých vzorkách 100 % hustoty výplne. Teplota, rýchlosť tlače a ostatné parametre boli zvolené v rozmedzí odporúčania výrobcu daného materiálu.

Plánom experimentu môžeme pomenovať súbor pokusov (meraní), určenie počtu opakovaní týchto meraní, prípadne aj určenie poradia v akom budú merania vykonávané. Účelom takéhoto návrhu je dosiahnuť čo najefektívnejšie, najúčinnnejšie a najúspornejšie metódy na dosiahnutie relevantných záverov na základe meraní⁵. Na to, aby mohli byť určené kritéria na návrh experimentu je potrebné si stanoviť cieľ experimentu. Pri stanovení cieľa je potrebné zadefinovať aké parametre budú v experimente skúmané. Tieto parametre nazývame faktormi experimentu, pričom hodnoty jednotlivých faktorov sa nazývajú úrovne faktora. Pokiaľ dochádza k situácií, že jeden faktor je ovplyvňovaný úrovňou druhého faktora, môžeme povedať že je medzi nimi interakcia. Po ukončení experimentu a jeho vyhodnotení sa môže stať, že niektoré zo zvolených faktorov, prípadne niektoré interakcie neovplyvňujú na stav vyhodnocovanej veličiny. V takom prípade môžu byť tieto faktory z modelu vylúčené. Môže nastať aj opačná situácia, kedy do modelu nie je zaradený faktor alebo interakcia, ktorá má značný vplyv na výstupnú veličinu. V takom prípade model nebude zodpovedajúci realite. Pri plánovaní experimentu môžeme uvažovať s úplným alebo neúplným plánom experimentu⁶. Úplným plánom (návrhom) experimentu, nazývame taký návrh, ktorý obsahuje všetky možné kombinácie všetkých úrovní všetkých faktorov. Je vhodné ho využívať pri experimentoch s menším počtom meraní kde je možné realizovať všetky tieto merania. Úplný návrh experimentu je najkomplexnejší a zároveň najjednoduchší. Umožňuje odhadnúť všetky parametre modelu, čím umožňuje zistiť vplyv dôležitosti faktora na výsledok merania⁷.

Pri spracovaní experimentu bolo použitých niekoľko zariadení.

3D tlačiareň

Na výrobu skúšobných vzoriek bola použitá 3D tlačiareň od českého výrobcu Prusa (obrázok 1), ktorá pracuje na princípe technológie FDM. Tlačovú dýzu je možné manuálne vymieňať, podľa toho aký priemer pre danú aplikáciu potrebujeme. Tlačiareň je kompatibilná s 1,75 mm priemerom tlačovej struny. Výhodou tejto tlačiarne je, že nie je náročná na obsluhu a dokáže spracovať široké spektrum dostupných materiálov, čo je dôležité pre experimentálnu činnosť. Je veľmi jednoduché meniť i technologické parametre, ktoré ovplyvňujú kvalitu a rýchlosť produkcie vyrábaných dielov.

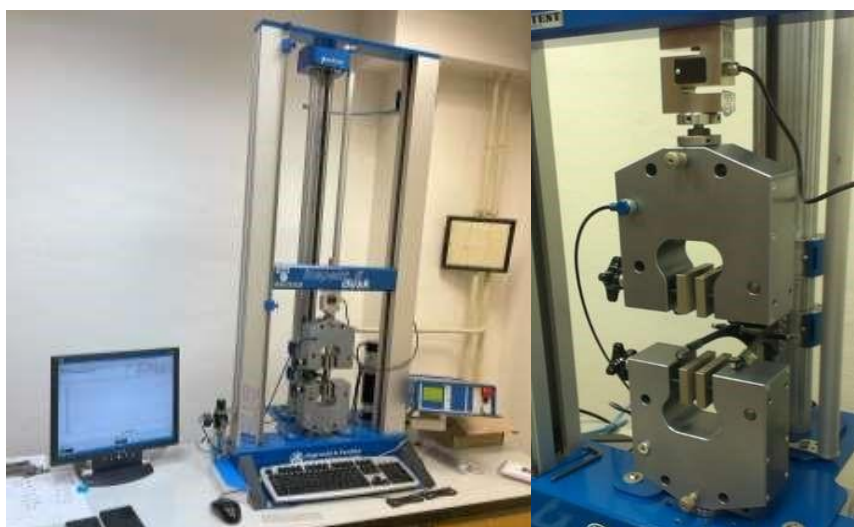
Je zariadenie, ktoré dokáže vyrábať diely maximálnych rozmerov 25×21×21 cm. Rozsah možnej hrúbky tlačných vrstiev je 0.05 - 0.35 mm. Použiteľné sú tlačové struny celého spektra materiálov ako je napríklad PLA, ABS, PETG a iné. Ale je schopné spracovávať aj kompozitné materiály, kde sú do základného materiálu primiešavané častice iných materiálov, ako je napríklad drevo, uhlíkové vlákna, sklo a podobne. Priemer takýchto tlačových strún je 1,75mm. Maximálna použiteľná rýchlosť posuvov je 200 mm/s. Teplotný rozsah pre natavenie tlačovej struny je do 300 stupňov celzia. Maximálna teplota ohrevu tlačovej platformy je do 120 stupňov celzia.



Obrázok 1: 3D Tlačiareň Prusa i3MK3s+

Univerzálny skúšobný prístroj

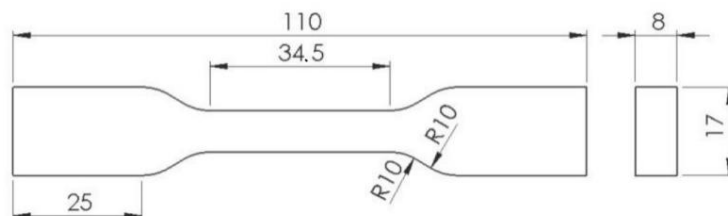
Pre realizáciu merania pevnosti v ťahu na vyrobených skúšobných vzorkách, bol k dispozícii univerzálny skúšobný prístroj Inspekt 5 Desk (obrázok 2). Názov napovedá, že maximálna vyvodená sila tohto zariadenia je 5kN. Univerzálnosť stroja spočíva v tom, že okrem skúšky ťahu, je na ňom možné realizovať aj skúšku ohybom a tlakom. Zariadenie je prepojené s počítačom, aby bolo možné zaznamenávať dáta z experimentu on-line. Skúšobná vzorka sa upne do klieštin zariadenia a softvérovo sa spusti nový test. Vrchná klieština začne stúpať nahor, v programe sa začne vykresľovať deformačná krivka napätia a predĺženia v ťahu. Keď sa prekročí medza pevnosti a vzorka sa poruší, test sa ukončí. Namerané dáta z experimentu sa zapisujú do súboru, následne sa vyexportujú, aby ich bolo možné ďalej štatisticky analyzovať a vyhodnocovať.



Obrázok 2: Univerzálny skúšobný stroj Inspekt 5 Desk

Skúšobná vzorka

Keďže na vykonanie ťahovej skúšky k dispozícii zariadenie Inspekt 5 Desk, kde maximálna prípustná vyvodená sila je 5 kN, skúšobná vzorka, ktorá má stanovené rozmery normou STN ISO 527-2, musela byť rozmerovo upravená, tak aby sa dala na zariadení patrične otestovať (obrázok 3). Menil sa predovšetkým prierez vzorky. Vzorka bola vymodelovaná v CAD programe CATIA, následne sa vykonal export do súboru STL, v programe PrusaSlicer sa zadefinovali parametre tlače, vzorka sa takzvané narezala na patričné vrstvy a vygeneroval sa tlačový súbor (.gcode).



Obrázok 3. Dizajn testovacej vzorky

Experiment komerčných kompozitných tlačových strún PLA/DREVO

Drevné materiály majú veľký potenciál, ako surovina v aplikáciách 3D tlače vďaka nízkym nákladom a dostatočným zásobám. Použitie drevených práškov môže čiastočne vyriešiť nákladové, environmentálne a udržateľné problémy pri výrobe. Okrem toho, používanie bio lepidiel ako spojív v kombinácii s drevenými práškami môže ďalej zvýšiť environmentálne výhody. Avšak ako už bolo spomenuté v teoretickej časti, pri tlači z kompozitov obsahujúcich drevené častice vzniká viacero technických úskalí. Príliš veľké rozmery drevených častíc a nesprávna voľba priemeru dýzy vedie k jej upchávaniu. Najväčším problémom, ktorý sa pri tlači vyskytoval bolo nezastavenie pohonu tlačiarne, aj keď materiál cez dýzu nepreteká, pretože ak nie je obsluha danej tlačiarne práve pri stroji, alebo si len nevšimne, že materiál cez dýzu neprechádza, tlačová hlava stále stúpa nahor o výšku vrstvy a následne po odstránení problému s upchanou dýzou nie je možné kontinuálne pokračovať v nanášaní materiálu v mieste, kde sa prietok zastavil. Takéto chyby v procese rapídne predlžujú čas výroby dielu, respektíve je nutné celú výrobu opakovať. Preto je dobré uvažovať proaktívne a výber priemeru dýzy, ale aj výšky vrstvy patrične zvážiť. Výška vrstvy by mala byť volená so zreteľom na priemer dýzy. Nemala by presahovať 80 % priemeru dýzy.

Cieľom experimentu je po prvé pozorovať správanie kompozitného materiálu pri tlači, po druhé získať a porovnať pevnostné vlastnosti kompozitu statickou skúškou v ťahu. Všetky tieto vyhodnotenia uskutočniť vzhľadom na meniace sa parametre tlače.

Výber materiálov

Pre účelu experimentu bol vybraný kompozitný materiál na báze PLA materiálu, obohatený o drevené častice. Použité boli dva druhy materiálov. Jeden z nich bol staršej šarže a aj keď bol patrične hermeticky uzavretý a skladovaný pri odporúčaných podmienkach, materiál časom degradoval a vytlačiť z neho vzorky primeranej kvality bolo obtiažne, respektíve kvalita vyrobených dielov bola veľmi zlá.

Tieto kompozitné tlačové struny sú na báze PLA a obsahujú 40% borovicových drevených častíc. Veľkosti používaných drevených častíc nie sú verejne známe, tieto údaje si výrobca chráni. Zafarbenie jednotlivých druhov materiálov sa vykonáva pridávaním farbiva, samotný druh použitých drevených častíc sa nemení. V tabuľke 1 sú uvedené odporúčané parametre tlače pre vybrané kompozitné materiály. Typ materiálu PLA/Drevo-2 bol dostupný na pracovisku, pre účely experimentu. Materiál časom podliehal degradácii, ale bolo možné z neho vyrobiť potrebný počet vzoriek na základe pripraveného úplného plánu experimentu. Z tohto potreby poznať materiálové vlastnosti degradovaného a nedegradovaného materiálu sme sa rozhodli porovnať vlastnosti PLA/Drevo-2-degra. a PLA/Drevo-2-nový.

Tabuľka 1: Odporúčané parametre tlače výrobcu FormFutura pre materiál EasyWood

Priemer dýzy: $\geq 0.4\text{mm}$	Výška vrstvy: $\geq 0.2\text{mm}$	Prietok: $\pm 100\%$
Odporúčaná teplota tlače: $210 - 240^\circ\text{C}$	Rýchlosť tlače: 30 – 40 mm/s	Retrakcia: Áno $\pm 5\text{mm}$
Odporúčaná teplota podložky: $0 - 60^\circ\text{C}$	Ventilátor: 50-100%	

Faktory a úrovne experimentu

Pre daný experiment boli zvolené 4 faktory a ich dve úrovne.

Faktor A – materiál zahŕňa dve varianty toho istého druhu materiálu. Jedná sa o PLA kompozitný materiál. Základná matrica je PLA termoplast. Prídavnými časticami sú drevené častice. Jeden z materiálov je nový, respektíve novo vyrobený. Druhý materiál je 6 rokov starý a bude skúmaný vplyv degradácie na jeho pevnostné vlastnosti a porovnanie s novým materiálom.

Faktor B – Výška vrstvy má dve úroveň 0,25 mm a 0,45 mm. Ako bolo spomenuté vyššie, pri voľbe výšok sa bral ohľad na priemer použitej dýzy, tak aby výška vrstvy nepresiahla 80 % priemeru dýzy. Hodnota 0.45 mm je mierne hraničná, keďže tolerancia do plusu je len 0,03 mm. Správanie materiálu pri tomto nastavení bolo pri tlači patrične sledované a nebol pozorovaný žiadny problém. Avšak predpokladá sa, že na pevnosť skúšobnej vzorky to môže mať mierny dopad. Vierohodným predpokladom je, že výška vrstvy má najväčší vplyv na drsnosť povrchu vzorky.

Faktor C – Priemer dýzy - Z dôvodu obsahu drevených prísad v matrici PLA boli volené väčšie priemery dýz, 0,6 mm a 0,8 mm. Väčší priemer dýzy môže negatívne pôsobiť na pevnosť a drsnosť skúmanej vzorky.

Faktor D -Teplota tlače bola zvolená v rozmedzí odporúčaných teplôt tlače výrobcu. Nepredpokladá sa, že teplota bude mať zásadný vplyv na pevnosť vzoriek, avšak môže vplyvať na extrudovateľnosť kompozitného materiálu. Pri vyššej teplote môže dochádzať k prepaľovaniu drevených častíc a vzniknuté sadze môžu upchávať a rýchlejšie opotrebiť dýzu.

Výsledky a diskusia

Vplyv prirodzenej degradácie na pevnosť v ťahu

Experimentálna činnosť sa týkala vplyvu prirodzenej degradácie materiálu na pevnosť v ťahu. Ako už bolo spomenuté vyššie materiál degradoval približne po dobu 6 rokov od výroby. Bol skladovaný vo vhodných podmienkach a hermeticky uzatvorený v obale. Avšak aj napriek tomu bola badateľná degradácia hneď na prvý pohľad. Od nového materiálu toho istého výrobcu, toho istého druhu a farby sa líšil práve poslednou spomenutou farbou, čo nasvedčovalo tomu, že prišlo k degradácii materiálu. Preto sme sa túto skutočnosť rozhodli aj adekvátne potvrdiť experimentom, statickou skúškou ťahom.

Plán experimentu bol vytvorený na základe zvolených faktorov uvedených v tabuľke 2, a ich úrovni. Bol pripravený plnofaktorový plán experimentu. Všetky kombinácie faktorov a ich úrovni sú uvedené v tabuľke 3.

Tabuľka 2. Tabuľka faktorov a ich úrovni pre experiment vplyvu prirodzenej degradácie na pevnosť v ťahu

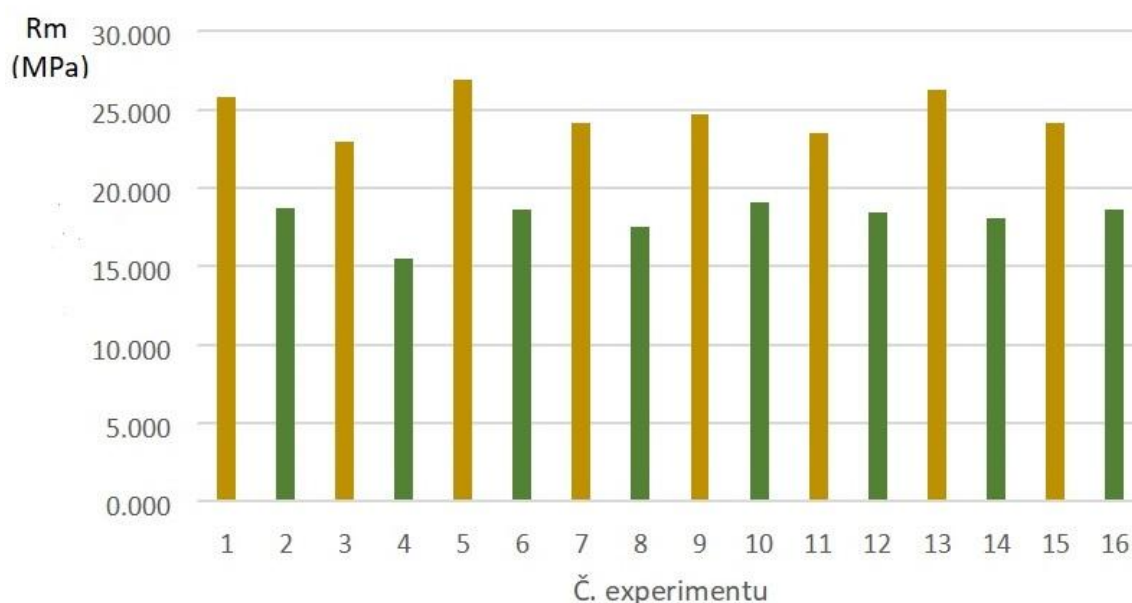
Faktor	Úroveň 1	Úroveň 2
A - Materiál	PLA/Drevo-2	PLA/Drevo-2-degra.
B - Výška vrstvy (mm)	0,25	0,45
C - Priemer dýzy (mm)	0,6	0,8
D - Teplota tlače ($^\circ\text{C}$)	220	240

Rovnako záznam nameraných údajov pevnosti dielov v ťahu, na základe pripraveného experimentu, je uvedený v tabuľke 3. Nepárne čísla experimentu predstavujú dáta získané pri skúške z nového materiálu a párne z degradovaného.

Tabuľka 3: Tabuľka experimentu a odhadov nameraných hodnôt

Exp.	A	B	C	D	Rm1 (MPa)	Rm2 (MPa)	Rm3 (MPa)	Rm4 (MPa)	\bar{R}_{mj} (MPa)	$s^2 (R_m)$ (MPa)	u_A (MPa)
1	1	1	1	1	26.193	26.157	25.278	25.457	25.771	0.223	0.236
2	2	1	1	1	18.378	18.581	19.052	18.800	18.703	0.084	0.145
3	1	2	1	1	22.292	23.141	23.211	23.163	22.952	0.195	0.221
4	2	2	1	1	15.778	15.230	15.385	15.424	15.454	0.054	0.116
5	1	1	2	1	27.881	27.463	26.179	26.151	26.918	0.786	0.443
6	2	1	2	1	19.828	18.616	19.097	17.052	18.648	1.381	0.588
7	1	2	2	1	25.089	24.179	23.742	23.620	24.158	0.443	0.333
8	2	2	2	1	17.820	17.973	16.884	17.454	17.533	0.234	0.242
9	1	1	1	2	24.976	24.889	24.023	24.826	24.678	0.195	0.221
10	2	1	1	2	18.190	19.159	19.818	19.271	19.110	0.458	0.339
11	1	2	1	2	23.939	24.167	23.886	21.968	23.490	1.045	0.511
12	2	2	1	2	19.249	17.713	18.735	17.966	18.416	0.498	0.353
13	1	1	2	2	27.123	26.866	25.469	25.456	26.229	0.793	0.445
14	2	1	2	2	18.178	17.896	17.684	18.450	18.052	0.111	0.167
15	1	2	2	2	24.219	24.010	24.196	24.196	24.155	0.009	0.049
16	2	2	2	2	18.849	19.463	18.153	17.814	18.570	0.541	0.368

Na obrázku 4 je vidieť rozloženie jednotlivých priemerných hodnôt nameraných v priebehu experimentu.



Obrázok 4: Multivariačný diagram – prehľad nameraných hodnôt

Tak ako v predošlom prípade na porovnanie vplyvu jednotlivých faktorov sa vypočítali aritmetické priemery výberových priemerov $\overline{Rm_j}$, ktorých vplyv zisťujeme. Na to je potrebné vypočítať aritmetické priemery všetkých výberových priemerov pre faktor A na úrovniach 1 a 2. Takto postupujeme u každého z faktorov.

Pre faktory A, B, C, D budú hodnoty pre určenie vplyvu nasledovné:

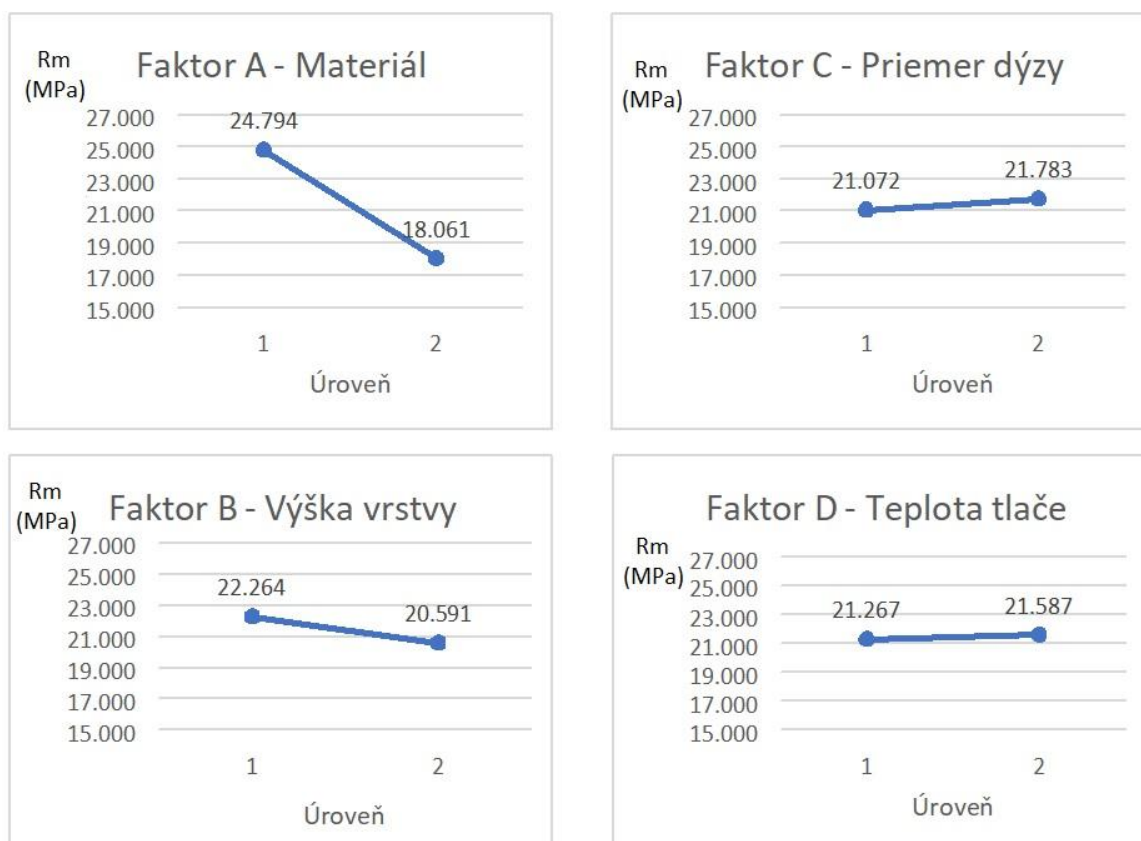
$$\begin{aligned} A1 &= 24.794 \text{ MPa} \\ A2 &= 18.061 \text{ MPa} \\ |A1 - A2| &= 6.733 \text{ MPa} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} B1 &= 22.264 \text{ MPa} \\ B2 &= 20.591 \text{ MPa} \\ |B1 - B2| &= 1.673 \text{ MPa} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} C1 &= 21.072 \text{ MPa} \\ C2 &= 21.783 \text{ MPa} \\ |C1 - C2| &= 0.711 \text{ MPa} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} D1 &= 21.267 \text{ MPa} \\ D2 &= 21.587 \text{ MPa} \\ |D1 - D2| &= 0.320 \text{ MPa} \end{aligned}$$

Z vypočítaných rozdielov aritmetických priemerov jednotlivých úrovní daných faktorov je zrejmé, že najväčší vplyv na pevnosť v ťahu, má faktor A, to jest použitý materiál. Degradovaný materiál vykazuje omnoho nižšie hodnoty pevnosti v ťahu ako nový nedeegradovaný. Taktiež sa analýzou potvrdil vplyv faktoru B (výšky vrstvy), je tam vidieť výraznejší pokles pri aplikovaní vyššej vrstvy aj vzhľadom na neistotu merania. Pre lepšiu prehľadnosť sa spraví grafické znázornenie, ktoré je zobrazené na obrázku 5.



Obrázok 5: Grafické znázornenie vplyvu jednotlivých faktorov na pevnosť v ťahu

Záver

Na základe výsledkov experimentov je možné stanoviť že najväčší vplyv na pevnosť v ťahu má druh materiálu. V tomto prípade degradovaný materiál vykazuje až štvrtinový pokles pevnosti. Dôvodom poklesu hodnôt pevnosti v ťahu je prirodzená degradácia materiálu, ktorá mohla byť spôsobená rôznymi činiteľmi (fyzikálnymi, chemickými alebo biologickými) najpravdepodobnejším fyzikálnym činiteľom je pôsobenie UV svetla, chemickým oxidácia alebo hydrolýza čo je rozklad látky pôsobením vody (vlhkosti). Biologickým činiteľom zapríčiňujúcim rozpad molekulovej štruktúry polyméru je pôsobenie enzýmov alebo baktérii.

Vzorky po pretrhnutí nedegradovaného a degradovaného materiálu PLA/Drevo-2 je možné vidieť na obrázku 6.

Ďalší výskum môže byť zameraný na skúmanie vplyvu UV žiarenia na vyrobené diely pri rôznych podmienkach, ako sú napríklad vlhkosť prostredia, teplota a podobne. Je to vlastne rozšírenie uvedeného výskumu a kvantifikácia podmienok degradácie plastov pri rôznych podmienkach.



Obrázok 6: Vizuálne porovnanie nedegradovaného a degradovaného materiálu

Pod'akovanie

Tento príspevok vznikol za podpory projektu KEGA 024STU-4/2022 - Virtuálne laboratórium aditívnej výroby a reverzného inžinierstva

Literatúra

1. GEWERT, Berit; PLASSMANN, Merle M.; MACLEOD, Matthew. Pathways for degradation of plastic polymers floating in the marine environment. Environmental Science: Processes & Impacts. [Online],

Patronem tohoto čísla je konferencia Technika ochrany prostredia TOP 2023 (14.– 16. 11. 2023, Starý Smokovec, Slovensko) – www.top2023.elfa.sk

2015-09-01, [cit. 20-05-2023]. Dostupné na:

<<https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2015/em/c5em00207a>>.

2. CAPONE, C. et al. Thermal and mechanical degradation during polymer extrusion processing. [online], 2007, [cit: 2023-4-3] Dostupné na: <https://doi.org/10.1002/pen.20882>
3. GOWARIKER, V.R., VISWANATHAN, N.V., SREEDHAR, J., Polymer science, New York: Halsted Press (John Wiley & Sons), 1986. ISBN 0-470-20322-6.
4. PIELICHOWSKI, K., NJUGUNA, J., MAJKA, T.M., Thermal Degradation of Polymeric Materials (Second Edition), Elsevier, 2023. ISBN 9780128230237. Dostupné na: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823023-7.00001-0>
5. CHUDÝ, V. – PÁLENČÁR, R. – KUREKOVÁ, E. – HALAJ, M.: Meranie technických veličín, Vydavateľstvo STU v Bratislave, 1999, ISBN 80-227-1275-2
6. HALAJ, M.: Maticové taktilne snímače, Habilitačná práca, Bratislava 2006
7. BENIAK, J.: Stanovenie vplyvu vybraných parametrov zariadenia rapid prototyping na kvalitu modelov, Bratislava 2014.

Investigation of material properties of composite materials based on wood waste for FDM Additive manufacturing

Juraj BENIAK, Klaudia KLEPOCHOVÁ, Michal HOLDY, Ľubomír ŠOOŠ

Faculty of Mechanical Engineering, Slovak University of Technology in Bratislava,
Nám. Slobody 17, 812 31 Bratislava, Slovak Republic

Summary

Composite materials are commonly used in technical practice. A composite material consists of two or more materials with different chemical and physical properties. Composite material is used to improve the properties of base materials. Composites offer significant advantages in various aspects of material performance, thus surpassing monomaterial alternatives and especially the separate use of individual parts. Most man-made composites combine high-tensile fibers that are flexible with a matrix that forms the fibers into a rigid structure that gains the compressive strength of the matrix material. The result is a composite material that benefits from the tensile strength of the fiber reinforcement, the compressive strength of the matrix and the flexural strength of their connection to create a strong, stiff, rigid and flexurally resistant final material.

Composite materials are also used in Additive Manufacturing, where they bring a completely different quality level of manufactured parts. It depends on the additive manufacturing technology used, which composite material is used. In this post, we will focus on the FDM (Fused Deposition Modeling) technology, which is based on extruding polymer fibers, which are deposited layer by layer to create the desired shape of the manufactured part. Since it is a technology based on polymer materials (more precisely, on thermoplastics), we will focus on composite materials on this basis. So the basic matrix will be thermoplastic.

Keywords: composite materials, additive manufacturing, wood waste, FDM technology, 3D printing.