

Oponentní posudek dizertační práce

Název práce: Kompozitní materiály s vysokou tepelnou vodivostí pro tisk 3D struktur

Autor práce: Ing. Petr Roudný

Dizertační práce obsahuje celkem 127 stran textu, 12 tabulek a 114 obrázků, rozsahem mírně převyšuje podmínky stanovené pro dizertační práci. Její skladba splňuje podmínky vědecké práce. Úvod do problematiky a stav vědeckého poznání je detailně zpracován na 67 stránkách, stěžejní část tvoří experimentální výzkum a vývoj vlastních kompozitních filamentů pro 3D tisk metodou FFF včetně rozsáhlých analýz (60 stran).

Aktuálnost zvoleného tématu

Disertační práce je zaměřena na teoretický i experimentální výzkum tepelně vodivých materiálů tisknutelných metodou FFF. Řešené téma disertační práce je v současné době velmi aktuální, a to zejména ve vztahu k dynamickému rozvoji aditivních výrobních technologií a zejména pak 3D tisku. Aktuálnost prokazuje detailně zpracovaná teoretická rešerše, i vlastní review článek s názvem „Thermal conductive composites for FDM 3D printing: A review, opportunities and obstacles, future directions“.

Zvolené metody zpracování

Tato část obsahuje vyjádření k použitým metodám v rámci řešení problematiky disertační práce, i vyjádření k vlastnímu zpracování disertační práce.

Doktorand využil širokou škálu vyhodnocovacích a diagnostických metod, které umožňují hodnocení klíčových vlastností zkoumaných kompozitních 3D tiskových materiálů. Kladně hodnotím, že nebyla zkoumána pouze teplená vodivost, ale doktorand se snažil hodnotit zkoumané materiály komplexně i z hlediska mechanických vlastností, tiskových vlastností a praktické použitelnosti. Analytické metody hodnocení materiálů považuji za správné. Drobnou výhradu mám pouze k metodě zobrazování a hodnocení dutin a v některých případech i rozložení tepelně vodivých příměsí ve 3D tištěných vzorcích. SEM se mi nezdá jako optimální zobrazovací metoda pro přehledové snímky a pro vizualizaci příměsí na bázi uhlíku, kde SEM neposkytuje dostatečný kontrast. Zde bych viděl jako vhodnější optické pozorování ve viditelném spektru.

Co se týká vlastního zpracování disertační práce, práce naplňuje všechny požadavky na to, jak mají být tyto práce strukturovány. K jednotlivým kapitolám/částem disertační práce zásadní připomínky nemám, kromě chybějící kapitoly s cíli disertační práce.

Splnění stanoveného cíle

Z předložené disertační práce je zřejmé, že se doktorand velmi dobře orientuje v dané problematice. Výhodou doktoranda v tomto bylo i to, že se uvedenou problematikou dlouhodobě zabývá.

Za největší slabinu celé disertační práce pokládám absenci jasně definovaných cílů, které by byly v závěru konfrontovány s dosaženými výsledky. Z tohoto důvodu doporučuji, aby byly během obhajoby cíle disertační práce jasně představeny a byl věnován prostor pro vyjádření doktoranda, zda cíle byly splněny v plném rozsahu.

I přes absenci definice cílů je z práce zřejmé, že doktorand dosáhl celé řady hodnotných výsledků a kompozitní tiskové materiály, které experimentálně připravil jsou velice důkladně analyzovány. Je zde rovněž zřejmá snaha diplomanta o důkladné vysvětlení všech pozorovaných jevů. To osobně považuji za nezbytné k prokázání disertability této práce.

Výsledky disertační práce a novost poznání

Výsledky disertační práce představují významný příspěvek k výzkumu kompozitních materiálů s vysokou tepelnou vodivostí určených pro aditivní výrobu 3D struktur. Autor zhodnocuje současné metody tvorby těchto kompozitů a navrhuje nové přístupy k přípravě vícesložkových tepelně vodivých filamentů, čímž přináší do této oblasti nový pohled. Práce se detailně věnuje vlivu různých modifikací polymerních matric plnivy na jejich mechanické vlastnosti, což je významné pro pochopení vztahů mezi strukturou a funkcí těchto materiálů. Experimentální část, zaměřená na hybridní plnění termoplastických matric tepelně vodivými plnivými, nabízí cenné poznatky o krystalinitě, orientaci makromolekul a plniv, a je podložena rozsáhlými analýzami, které zahrnují měření tepelné vodivosti laserovým paprskem, SEM analýzu, rentgenovou difraktometrii, tahové zkoušky a měření tvrdosti.

V některých případech však autor popisuje nejednoznačné výsledky, které jsou do značné míry ovlivněny nejen materiálovými vlastnostmi vytvořených filamentů, ale i kvalitou tisku. V těchto případech je obtížné rozlišit dominantní vliv na tepelnou vodivost u realizovaných vzorků.

Náročnost vyhodnocení vlivu jednotlivých plniv v kompozitu je také dána značnou materiálovou variabilitou polymerních matric a příměsí a také skutečností, že již od samého začátku (kromě plniv čistě na bázi h-BH) jsou do polymerů přidávány minimálně 3-4 složkové příměsi v různých poměrech. Vzhledem ke skutečnosti, že je zkoumána široká skupina polymerních matric i plniv, je obtížné stanovit a sledovat jednotnou experimentální linii. Student ve snaze o dosažení maximální hodnoty tepelné vodivosti experimentuje i s relativně komplexními a exotickými plnivými, což do značné míry komplikuje systematické experimentování a vyhodnocování. Ačkoliv je výběr materiálů plniv dobře diskutován a podpořen literárními zdroji, široká škála materiálů komplikuje dosažení jednoznačnějších závěrů. Bylo by vhodnější omezit se jen na menší skupinu materiálů a tu detailně charakterizovat.

Práce i přes uvedené drobné výtky přináší nové poznatky, které mohou významně ovlivnit budoucí vývoj kompozitních materiálů pro aditivní výrobu. Perspektivní možností do budoucna

je zejména tzv. koextruze a dále chemická modifikace plniv, která by umožnila současně zlepšení teplo-vodivých i mechanických vlastností.

Význam pro praxi a pro rozvoj vědy

Disertační práce poskytuje výstupy zejména pro rozšíření stavu poznání v oblasti speciálních 3D tiskových materiálů a umožňuje tak další rozvoj vědy v oblasti aditivních výrobních technologií. Díky náročné experimentální přípravě široké škály kompozitních materiálů a detailní analýzy vzorků spolu se zvolenými metodami zpracování se doktorandovi podařilo prohloubit stav vědeckého poznání ve sledované oblasti.

Z hlediska přínosů pro praxi je hodnocení práce obtížnější, protože jsou testovány pouze vlastní laboratorně přípravné vzorky, které nejsou z hlediska vlastností porovnány s komerčními materiály. Z hlediska praxe by bylo zajímavé otestovat a popsat i komerční tepelně vodivé filamenty (např. TCPOLY Ice9™ TPU s katalogovou tepelnou vodivostí 6 W/m*K).

Rozsah a kvalita publikací ve vztahu k tématu disertační práce

V disertační práci nejsou uvedeny publikace doktoranda. Na WoS je však možné dohledat dvě publikace významného charakteru v prestižních Q1 časopisech s vysokým IF (Journal Of Manufacturing Processes IF6,2 a Additive Manufacturing IF12,4), které se přímo vztahují k tématu disertační práce. Těmito publikacemi doktorand prokázal schopnost přípravy a obhajoby vlastních vědeckých textů. Dle Scopus je spoluautorem dalších dvou příspěvků ve sbornících. Další publikace mi nejsou známy.

Úprava práce po stránce formální a odborné

Po stránce formální nepřekračuje počet nedostatků obvyklou míru, i když se v práci místy vyskytují jisté formální nedostatky, překlepy, nebo chyby ve skloňování a shodě podnětu s přísudkem.

Z hlediska odborné terminologie nejsou k práci zásadní připomínky. Doktorand si velmi dobře osvojil terminologii ze své oblasti odborného zaměření. Nejednotným dojmem však působí používání celkem tří výrazů pro tepelnou vodivost či měrnou tepelnou vodivost a to k , TC a STC.

Otázky pro doktoranda při obhajobě

1. Na str. 29 popisujete, že u kovů dominuje přenos tepla vedením pomocí příspěvku elektronů. Je možné na základě elektrické vodivosti určit i tepelnou vodivost? Pokud ano, dá se takto přistupovat i ke stanovení tepelné vodivosti kompozitních materiálů s vodivým plnivem? Pokud ano, za jakých předpokladů?
2. Na str. 46 popisujete, že Polymerní plniva ve formě nanovláken na bázi polyamidu a polythiofenu vykazují tepelnou vodivost 100 resp. 63 W.m⁻¹.K⁻¹. Čím je to způsobeno a dá se toho využít pro realizaci vysoce tepelně vodivých filamentů?

3. Na str. 95 popisujete měření na přístroji na testování filamentů. Vysvětlete detailněji princip tohoto přístroje.
4. Jaké byly důvody k tomu, že jsou již v úvodu experimentálních prací používány poměrně komplikované směsi plniv v polymerní matici?
5. Na str. 106 popisujete možné důvody rozdílné měrné tepelné vodivosti u jednotlivých polymerů a jako jeden z hlavních důvodů uvádíte krystalizaci. Očekával bych, že krystalizace bude ovlivňovat tepelnou vodivost pouze samotné polymerní matrice, ale v případě kompozitního materiálu se nebude jednat o významnou změnu. Hraje krystalizace roli i u plněných polymerů?
6. Na trhu se objevují tepelně vodivé filamenty dosahující dle katalogových hodnot tepelné vodivosti až $6 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ (výjimečně i $8 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$). Víte, jakým způsobem je výrobci (např. Ice9™ TPU) dosahují?

Závěr

Souhrnně lze konstatovat, že předložená práce Ing. Petra Roudného splňuje všechny podmínky kladené na disertační práci.

Doktorand prokázal schopnost a připravenost k samostatné činnosti v oblasti výzkumu, je způsobilý k tvůrčí práci, má dobré teoretické znalosti a ve své práci přinesl dílčí nové poznatky, které jsou využitelné i v praxi.

Doporučuji proto předloženou disertační práci k obhajobě.

V Plzni 13. 9. 2024

doc. Ing. Jan Řeboun, Ph.D.
Katedra materiálů a technologií
Fakulta elektrotechnická
Západočeská univerzita v Plzni