

Oponentský posudek dizertační práce Ing. Martina Šilhavíka

Dizertační práce Ing. Martina Šilhavíka se zabývá velmi aktuálním tématem grafenových aerogelů (GA), které jsou studovány teprve od roku 2010. Vedle od nepaměti známého grafitu a diamantu, přes v minulém století objevené fullereny a uhlíkové nanotrubky až po nedávno v roce 2004 izolovaný grafen se v případě GA jedná o další svými vlastnostmi zcela unikátní formu uhlíku. Uměle připravené porézní GA se od svých 3D „sourozenců“ tedy grafitu a diamantu odlišují především svou nízkou hustotou (0.16 mg/cm^3), vysokou pružností v tlaku (při 4.5 GPa 92% stlačení) i tahu (při 0.6 MPa 68% stlačení), schopností účinně tlumit vibrace v nanosekundových časech, vysokou elektrickou vodivostí (větší než 900 Sm^{-1}) a nízkou tepelnou vodivostí ($0.026 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$). Právě díky kombinaci všech těchto vlastností se GA v posledních letech těší velké pozornosti vědecké komunity ať už z hlediska základního výzkumu, tak i pro svůj obrovský aplikační potenciál.

Z hlediska metodiky pokrývá dizertační práce téma velmi důkladně a široce v rozsahu od vlastní přípravy GA, přes technologické úpravy vedoucí k modifikaci jejich vlastností, přes charakterizace pomocí široké škály technik (transportní, tepelné, tahové a zatěžovací měření, Ramanova spektroskopie, SEM, XPS, FTIR, DLS, TGA a XRD), které poskytly velmi kompletní představu o struktuře a vlastnostech samotných připravovaných GA nebo jejich výrobních meziproductů až po téměř finální průmyslově využitelné aplikace. Práce je mezioborová a zahrnuje chemické metody (přípravy suspenzí grafen oxidu, charakterizace zeta potenciálu a DLS), strojírenské metody (zatěžování/napínání a vystavení jejich periodickému účinku), širokou paletu fyzikálně-materiálových technologií a teoretické fyzikální modelování. Vysoce nadstandardní je i množství zařízení vlastní výroby jako například žihací komory, lyofilizační komory a zařízení pro extrémní mechanické namáhání při současném měření dalších vlastností, které musely být pro realizaci úkolů dizertační práce vyvinuty a vhodně použity.

Největší přínosy práce vidím v těchto bodech:

- 1) Použití bezšablonové metody hydrotermální syntézy oxidu grafenu, u níž byla zlepšena reprodukovatelnost žiháním v plazmatu. Při dalším vysokoteplotním žihání nad $1300 \text{ }^\circ\text{C}$ se ukázalo, že dochází k úplnému odstranění kyslíku, eliminaci defektů a zvýšení kovalentního zesíťování GA, což významně zlepšuje vlastnosti GA pro potenciální aplikace (pružnost, pevnost, vodivost, tlumící schopnost, nízká tepelná vodivost).
- 2) Návrh analytického fyzikálního MOB modelu (modular origami bending model) k popisu složitějšího elastického chování GA, jehož podstatou bylo rozdělení chování na běžnou lineární odezvu materiálu doplněnou o efekt skládání (hroucení) vzduchových pórů.
- 3) Studium a popis fyzikálního mechanismu ohnivzdorného a samozhášecího chování GA.
- 4) Představení potenciálu GA v praktických aplikacích: dotekových senzorech uplatnitelných například v robotice a při měření lidského tepu, případně tlaku pro potenciální medicínské aplikace.

Práce je psána jasně a srozumitelně. Je velmi dobře členěna, kdy první dvě kapitoly vhodně, přehledně, s patřičnými rešeršními vstupy a s vysokou pedagogickou kvalitou uvádějí čtenáře do problematiky. Dále již je pak věnována pozornost konkrétním oblastem výzkumu, tedy metodě

přípravy GA, jejich mechanickým i elektromechanickým vlastnostem a odolnosti vůči ohni. Text je zdařile doplněn shrnujícími přehlednými tabulkami a názornými schématy.

Souhrnem konstatuji, že práce splňuje jednoznačně všechna kritéria kladená na dizertační práci, téma je aktuální, přínosy jsou vědecky hodnotné, jedinečné, a navíc mají i nezpochybnitelný aplikační potenciál.

Z těchto důvodů doporučuji práci k obhajobě.

V Brně

Dne 18.1.2023

doc. Ing. Miroslav Bartošík, Ph.D.

Ústav fyzikálního inženýrství
Fakulta strojního inženýrství
Vysoké učení technické v Brně

Technická 2896/2
Královo Pole
616 69 Brno

Případné otázky k obhajobě:

1. Většinu běžných aerogelů lze obvykle opět rozpustit ve vodě. Jak reagují na vodu vámi připravené grafenové aerogely (GA)? Na straně 13 citujete, že GA jsou hydrofobní. Je však tento účinek trvalý po delší dobu a v kombinaci s vystavením se plamenům? Můžete tuto otázku diskutovat s ohledem na případné hašení požárů GA?
2. Na straně 41 v kapitole 3.2.2. zabývající se pecí pro vysokoteplotní žíhání píšete, že GA nebyl ohříván přímo průchodem proudu z důvodu lokálních fluktuací proudu ve vzorku. Bylo nějakým způsobem charakterizováno, jak se lokálně mění vodivost GA vzorků?
3. V souvislosti s dnešním 3D tiskem lze hydrogely obvykle tisknout na 3D tiskárnách. Je Vaše metoda nějakým způsobem také využitelná pro 3D tisk?
4. V práci uvádíte, že u grafenových aerogelů lze měnit velikost pórů z jednotek nm do stovek mikrometrů. Můžete nastínit metody, kterými se to provádí?
5. V kapitole 5 pojednávající o elektromechanických vlastnostech senzorů využívající GA, konstatujete, že největší vliv na změnu odporu vlivem stlačení nebo napětí má změna

kontaktního odporu GA a stříbra Ag (R_c strana 96 až 97). Byly pro kontaktování testovány i jiné materiály než Ag, případně byla snaha nějak upravovat plochu doteku GA a Ag následnými technologickými operacemi?

6. V závěru uvádíte mimo jiné, že by mohlo být zajímavé studium magnetických vlastností GA (poslední odstavec závěru). Umíte si představit nějaké zajímavé výsledky, případně posunutí možností v této oblasti?
7. Jaké jsou Vaše budoucí záměry s ohledem na grafenové aerogely?

Doplňující připomínky:

1. V kapitole 2.1.5 zabývající se krátkým uvedením metody DLS je poměrně rychlý přechod od hydrodynamického poloměru k pravděpodobně difúznímu koeficientu D_t . Symbol D_t však není v textu vysvětlen.
2. Na stranách 57 a 58 je duplicitně odstavec začínající: „Simultaneously with the XPS ...“. Ve vztahu pro L_a je opačně poměr intenzit I_D a I_G a neodpovídá citace [49] na straně 64.