

Prof. RNDr. Michal Kotoul, DrSc.
Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky
FSI VUT v Brně
Technická 2, 616 69 Brno

Oponentní posudek disertační práce

Ing. Svitlana Fedorova

„Konstitutivní modelování kompozitů s elastomerovou maticí a vlákny s významnou ohybovou tuhostí

1. Aktuálnost tématu

Předložená disertační práce je zaměřena na problematiku výpočtového modelování kompozitních materiálů, které jsou složeny z hyperplastické matrice a elastických vláken s nezanedbatelnou ohybovou tuhostí. Hned v úvodu je nutné poznamenat, že se jedná o velmi aktuální a současně obtížný problém.

Pro moderní konstrukční materiály je charakteristický přechod od jednoduchých homogenních soustav k soustavám heterogenním s přesně určenou množinou vlastností a funkcí působících na požadovaném místě a dosahovaných typem, množstvím a prostorovým uspořádáním heterogenit a řízením rozhraní mezi těmito heterogenitami a maticí. Z hlediska vytváření nových materiálů je důležitý rozvoj metodiky počítačového návrhu materiálů s následným vývojem a ověřením jejich syntézy a technologie výroby. Tradiční formulace mechaniky kontinua zahrnuje tzv. *nepolární* materiály, které jsou rovněž tzv. *jednoduché* ve smyslu Nolla. Rotace okolí materiálového bodu se zanedbává a předpokládá se, že tenzor napětí je obecně funkcí pouze gradientu posunutí. Tento předpoklad o lokálním charakteru odezvy materiálu je postačující v případech, kdy vlnová délka deformačního pole je mnohem delší než dominantní délkový rozměr mikrostruktury materiálu. Pokud jsou však obě délky srovnatelné, je platnost uvedeného předpokladu diskutabilní. V zásadě je možné postupovat při výpočtovém modelování dvojnásobným způsobem – buď se detailně modeluje mikrostruktura materiálu, nebo se vytvoří homogenizovaný (jedno-materiálový) model materiálu, který obsahuje charakteristické délkové parametry mikrostruktury. V případě problému, kterým se zabývala doktorandka Ing. Fedorova, vede druhý postup na polární teorii kontinua.

2. Cíle disertační práce a jejich splnění

Na základě zadání cílů disertační práce a jejich upřesnění v Pojednání k doktorské zkoušce lze konstatovat, že cíle disertační práce byly splněny. Jednalo se zejména o:

- 1) Provedení mechanických zkoušek, jejichž výsledky ilustrují meze použitelnosti klasických hyperelastických modelů pro konstitutivní popis kompozitů s vlákny vykazujícími významnou ohybovou tuhost
- 2) Volbu konstitutivního modelu v rámci polární teorie elasticity
- 3) Rozšíření stávajících analytických řešení jednoduchých úloh polární elasticity
- 4) Modifikaci formulace MKP
- 5) Verifikace MKP řešení pomocí dostupných analytických řešení
- 6) Teoretické studium vlivu materiálových konstant polární teorie pružnosti

3. Úroveň rozboru současného stavu v disertaci řešené problematiky

Rozboru současného stavu řešené problematiky jsou v disertační práci věnovány dvě a půl stránky, což na jedné straně se může jevit málo, nicméně zásadní poznatky jsou jasně a srozumitelně popsány. Kromě toho v dalších kapitolách věnovaných řešení dané problematiky jsou stávající poznatky a výsledky, ze kterých doktorandka vychází, uvedeny podrobněji. V disertační práci je citováno 88 literárních zdrojů (z toho 3 vlastní publikace se spoluautory), což lze považovat s ohledem na publikační aktivitu v dané oblasti za více než dostačující.

4. Vyjádření k postupu, konkrétní přínos a použitá metodika řešení

Po metodické stránce je práce zpracována promyšleně - postupně na základě experimentálních dat, numerických a také analytických výpočtů ukazuje u vláknově zpevněných elastomerů, že klasická homogenizace vedoucí k příčně izotropnímu materiálu nenahrazuje adekvátně příslušný kompozit, pokud tloušťku vláken nelze zanedbat. Jsou nejprve srovnávány výsledky výpočtové simulace tahové zkoušky a zkoušky v ohybu získané pomocí detailního modelování struktury kompozitu, tj. pryžové matrice vyztužené textilními vlákny se zanedbatelnou ohybovou tuhostí (bimateriálový model) a pomocí modelu homogenizovaného materiálu, který však nezohledňuje ohybovou tuhost vláken, s experimentálními výsledky pro několik orientací vláken vzhledem k ose tahového zatížení. Z výsledků simulací vyplynulo, že výpočtový model homogenizovaného materiálu je v souladu s experimentálními daty a heterogenním výpočtovým modelem. Posléze je dokumentováno, že s rostoucí ohybovou tuhostí vláken se zvětšuje nesoulad mezi predikcemi výpočtového modelu homogenizovaného materiálu a heterogenním výpočtovým modelem. Následně doktorandka rozebírá kontinuální teorii momentových napětí v rámci teorie konečných deformací v materiálovém popisu, která umožňuje zavést konečnou ohybovou tuhost vláken. Vychází přitom hodně z prací Spencera a Soldatose a disertace Ing. Lasoty. Diskutuje možná zjednodušení modelu tak, aby byl výpočtově použitelný. Prozkoumává použitelnost matematického modelu, který navrhl předchozí doktorand Ing. Lasota jako zjednodušení modelu Spencera a Soldatose a modifikuje jej, což obnáší změnit resp. doplnit MKP kód vyvinutý Ing. Lasotou v systému Matlab. Dále se věnuje identifikaci materiálových parametrů pro jednoduchý případ nosníku v podmínkách malých deformací při použití průměrovací metody, kdy efektivní materiálové vlastnosti se určují jako vztahy mezi objemovými průměry mikronapětí a mikrodeformací. Výsledky jsou pak ilustrovány na příkladu simulace průhybu desky pomocí heterogenního modelu, ekvivalentního klasického modelu homogenizovaného příčně izotropního materiálu a ekvivalentního modelu homogenizovaného příčně izotropního materiálu v rámci teorie momentových napětí. V další části se pak uvádějí exaktní řešení v podmínkách rovinné deformace pro linearizovaný model polárního materiálu. Závěrem jsou shrnuty hlavní výsledky dosavadního výzkumu doktorandky a formulovány cíle dalšího výzkumu.

5. Význam pro další rozvoj vědního oboru a praxi

Problematika řešená v disertační práci je velmi obtížná, o čemž svědčí i poměrně nízký počet publikací a autorů v dané oblasti. Výsledky disertační práce představují cenný příspěvek v oblasti výpočtového modelování kompozitních materiálů složených z hyperplastické matrice a elastických vláken s zanedbatelnou ohybovou tuhostí.

6. Formální úprava disertační práce

Po formální stránce má práce požadovanou úroveň a odpovídá standardům. Je napsána dobrou angličtinou. Obrázky jsou dostatečně vypovídající, text je srozumitelný jak z obsahového hlediska, tak z hlediska jazykového. Závěr práce tvoří obecnější shrnutí výsledků a návrh případného budoucího výzkumu. V práci jsem našel jen minimální počet překlepů. V připomínkách ale uvádím výhrady k označení některých veličin.

7. Připomínky a dotazy k práci

- 1) Str. 55 – moment kolem osy X_3 , ne kolem osy X_2 ,
- 2) Kapitoly 4.1.1- 4.1.4 a 9.1 jsou zbytečně podrobné, výklad je možné najít v řadě učebnic pro danou oblast.
- 3) V rovnici (9.2) schází faktor 2 u smykových složek tenzoru deformace.
- 4) V textu jsou odkazy na literaturu [1] v místech, kde zřejmě má být [7].
- 5) V částech týkajících se malých deformací se v disertaci stále používají materiálové souřadnice X_i , bylo by však vhodnější s ohledem na další vztahy používat prostorových souřadnic x_i .
- 6) Přejít od systému rovnic (6.10) k systému (6.13) je nesrozumitelný. Doktorandka by měla vysvětlit postup při obhajobě.
- 7) Levi-Civitaův symbol je značen dvojím způsobem- ϵ_{ijk} nebo e_{ijk} .
- 8) V textu je použito zbytečně dvojí značení smykového modulu pružnosti μ nebo G (zřejmě v závislosti na literárním zdroji)
- 9) Označení konstant c_i v rovnicích (9.41) není vhodné, protože stejným symbolem jsou označeny materiálové konstanty v rovnici (6.2). Nenašel jsem v práci vypočtené hodnoty konstant c_i a parametrů μ_i v rovnicích (9.41). Doktorandka by je měla uvést při obhajobě.
- 10) Analytické řešení využívá v podstatě Fourierovu metodu (např. rovnice (9.43), (9.53), (9.55), (9.58), (9.61)-(9.63)). Proč se omezuje pouze na první členy řad $\sum_k \sin\left(k \frac{\pi x_1}{L}\right)$, resp. $\sum_k \cos\left(k \frac{\pi x_1}{L}\right)$, $k=1, 3, \dots$? Je to z důvodu specifických okrajových podmínek v $x_2 = \pm h/2$?
- 11) Analytická řešení jsou porovnávána s MKP modelem homogenizovaného polárního materiálu. Byla provedena srovnání s MKP modelem heterogenního materiálu?
- 12) Postrádám výpočty, které by při různých poměrech tloušťky vláken a velikosti vzorku ilustrovaly, jak se vyvíjí „size effect“.

7. Teze

Teze poskytují postačující informaci o obsahu doktorské práce.

8. Závěr

Předloženou práci hodnotím kladně. Ing. Svitlana Fedorova prokázala odpovídající znalosti v daném oboru, schopnost vědecky pracovat, podílet se na práci týmu, ale i samostatně řešit svěřený problém. Práce splňuje věcné i formální náležitosti kladené na doktorské disertace a proto tuto práci doporučuji k obhajobě a po jejím úspěšném průběhu

**doporučuji udělit paní Ing. Svitlane Fedorove
titul PhD v oboru Inženýrská mechanika**

V Brně 23. 10. 2018



Prof. RNDr. Michal Kotoul, DrSc.