



OPONENTNÍ POSUDEK

práce

Ing. Hany Srbové

MICROMECHANICAL ANALYSIS OF UNIDIRECTIONAL CARBON FIBER COMPOSITE

V Praze dne 10. 5. 2017

Vypracoval : **Prof. Ing. Milan Růžička, CSc.**

1. Úvod

K posouzení byla předložena disertační práce Ing. Hany Srbové, vypracovaná na Fakultě aplikovaných věd ZČU v Plzni. Práce se zabývá modelováním struktury vláknových kompozitů na mikroúrovni, konkrétně vlivem rozložení vláken u jednosměrného kompozitu na makro vlastnosti a chování kompozitní struktury. Práce je psána v anglickém jazyce a obsahuje 139 stran textu včetně příloh. Je rozdělena do pěti kapitol s úvodní a závěrečnou statí.

2. Vyjádření k obsahu práce, postupu řešení, použitým metodám a splněním cílů práce

Cíle práce autorka vymezuje hned v úvodní statí. Domnívám se, že by je měla formulovat až po úvodní rešerši a to na základě komentáře, které výzkumy a výsledky pokládá dosud za nedokončené s potenciálem disertability. Odtud by měly cíle práce vycházet. Za hlavní cíl si vytyčuje v disertační práci „výzkum vlivu rozložení vláken v jednosměrném kompozitu na jeho efektivní mechanické hodnoty“. Jako podcíle práce uvádí analýzu vlivu šířky vzorku a délky a materiálu příložek při tahové zkoušce vzorků, realizaci tahových zkoušek pryskyřice a vyhodnocení dat pro materiálové modely chování matrice v kompozitech a konečně návrh geometrie periodické jednotkové buňky se zohledněním reálné morfologie mikrostruktury kompozitu a analýza vlivu nerovnoměrnosti distribuce vláken v příčném průřezu vzorku na jeho makroskopické chování. Za disertabilní pokládám poslední z cílů, který vede k popisu irregularity buňky a metodice stanovení efektivních vlastností kompozitu. Předchozí body jsou spíše realizační.

Stručně k obsahu práce. Po úvodu do problematiky se první kapitola věnuje současnému stavu problematiky z hlediska analytických a numerických postupů homogenizace kompozitů, posuzování jejich morfologie a mikrostruktury a návrhu materiálových modelů. Protože tyto vlastnosti kompozitů jsou zkoumány již velmi dlouho, mohla by řešerše být velmi rozsáhlá, autorka zvolila zhuštěnou formu informací, která je však dostatečná pro získání základního názoru na užívané metody a postupy. Poté jsou v kap. 2 popsány postupy mechanických tahových zkoušek kompozitních plochých vzorků. Jsou srovnány postupy podle třech různých standardů. Jsou zde i uvedeny postupy realizovaných experimentů včetně výsledků – tahových diagramů. Podrobné výsledky zkoušek jsou potom uvedeny v příloze práce. Zpracování i výsledky ukazují, že experimenty byly prováděny velmi zodpovědně při dodržení všech normovaných požadavků a výsledky jsou velmi kvalitní. Kapitola 3 se zabývá morfologií kompozitní struktury. Popisuje geometrické modely rozložení uhlíkových vláken v matici v příčném průřezu tahového jednosměrového kompozitního vzorku. Navrhuje vlastní hodnocení popisu nerovnoměrné struktury a definuje a vyhodnocuje parametr „odchylky reálného rozložení vláken“ od ideálního hexagonálního rozložení. Popisuje přípravu vzorků pro pořízení obrazu rozložení vláken pomocí skenovací elektronové mikroskopie a navržený algoritmus pro automatickou detekci obrysů „kružnic“ vláken v příčném řezu a stanovení histogramu hustoty pravděpodobnosti poloměrů vláken i plochy uhlíkových vláken v daném snímku. Kapitola čtvrtá pojednává o materiálových modelech. Obsahuje kondenzovaný přehled vlivu anizotropie, nelinearity a modelů zpevnění. Slouží zejména k uvedení do další kapitoly 5 nazvané Mikromodely. Tuto kapitolu lze označit za stěžejní v této práci. Autorka se zabývá nejprve principy stavby mikromodelů a popisu periodické buňky. Navrhuje postup pro vyjádření „nehomogenosti“ resp. nerovnoměrnosti distribuce vláken v matici (irregularity). Sestavuje MKP model periodické buňky s aplikací periodických okrajových podmínek. Provádí „kalibraci“ modelů pro lineární i nelineární materiálovou odezvu kompozitu na základě experimentálních dat, získaných a popsanych v kap. 2. Velmi oceňuji další analýzy a testování modelů. Jedná se zejména o realizaci citlivostní analýzy. Nejprve testuje vliv počtu periodických buněk v homogenizovaném objemu pro pravidelnou (regulární) geometrii. Zabývá se rovněž vlivem velikosti sítě a optimalizuje výsledné modely z obou těchto hledisek. Podrobně také zkoumá vliv (náhodných) změn materiálových parametrů na výsledné homogenizované vlastnosti kompozitu a hodnotí typ charakteru dané závislosti (konstantní, lineární, kvadratická). Pro regulární i irregulární modely potom hodnotí jak se vlivy struktury a změn mater. Parametrů projeví na výslednou deformačně napět'ovou odezvu materiálu. Tento výsledek má pro praxi stěžejní význam.

Dotazy a připomínky k práci:

1. Hodnocení objemu vláken u reálných vzorků bylo určováno na základě automatické detekce (RANSAC) a náhrady příčných řezů vláken kroužky z obrázků mikroskopu? Tím by docházelo k nepřesnostem analýzy. Neověřovala se hodnota jinou nezávislou metodou? Jaké jiné metody by připadaly v úvahu?
2. Vztah 3.1 definuje parametr „irregularity“. Jakým způsobem je tento parametr reálně počítán v později zavedených modelech per. buňky a náhodně generovaných distribucí vláken (viz např. obr. 5.10? Vychází z ploch elementů MKP? Jaký rozsah tohoto parametru byl zvolen pro generování náhodného rozložení vláken – vysvětlení obr. 5.47?

3. Výsledkem analýzy vyhodnocení obrazu příčných řezů byla též histogram velikosti poloměru vlákna v kompozitu. Ukazuje se, že má jistou variabilitu. Postrádám/nenalezl jsem v práci komentář, jak byl tento údaj využit pro volbu průměru vlákna pro simulační modely, resp. jak se fakt, že ve skutečnosti nebudou vlákna mít konstantní poloměr, projeví na sestavených modelech homogenizace. Jaký je názor autorky na význam tohoto vlivu?
4. Experimentální tahové zkoušky byly realizovány na řadě vzorků a data vykazovala jistý rozptyl. Výsledkem simulací a analýzy vlivu irregularity distribuce vláken i variability materiálových parametrů na deformační odezvu byly „numerické“ rozptyly modelu. Neprováděla autorka srovnání experimentálního chování a modelové simulace vzájemně v tomto ohledu?

3. Stanovisko k výsledkům disertační práce a původnímu konkrétnímu přínosu

Doktorandka odvedla velké množství práce jak z hlediska experimentálních zkoušek, tak numerických analýz. Prokázala schopnost řešení komplexní problematiky s využitím vhodných analytických metod i numerických a programovacích nástrojů a získala nové výsledky a poznatky, které přispívají k novým poznatkům o možnosti modelování chování kompozitů. Domnívám se, že naplnila cíl své disertační práce.

4. Vyjádření k systematické, přehlednosti, formální úpravě a jazykové úrovni práce

Práce je psána logicky, se systematickým řazením kapitol i podkapitol, má výbornou grafickou úpravu a byla psána velmi pečlivě.

5. Vyjádření k publikacím studenta

Disertantka ve své práci publikuje řadu původních výsledků experimentálních zkoušek i numerických analýz. Uvádí celkem 7 publikací, ve kterých je hlavní nebo vedlejší autorkou a souvisejících s tématem disertace a to zejména časopisecké publikaci v *Materials in Technology*. V textu tyto své práce na vhodných místech cituje.

6. Závěrečné hodnocení

Domnívám se, že předložená disertační práce ing. Hany Srbové splňuje kritéria, jak je vymezuje zákon č. 111/1998 Sb. paragraf 47 odst. 4, že disertační práce musí obsahovat původní výsledky a že výsledky práce musí být uveřejněné nebo přijaté k uveřejnění. Autorka v ní prokázala schopnosti samostatné vědecké práce a systematického i kritického přístupu k hodnocení výsledků. Doporučuji, aby v případě uspokojivých odpovědí na dotazy oponentů a úspěšné obhajoby jí byl přiznán titul Ph.D.



Milan Růžička



POSUDEK DISERTAČNÍ PRÁCE

MICROMECHANICAL ANALYSIS OF UNIDIRECTIONAL CARBON FIBER
COMPOSITE

ING. HANA SRBOVÁ

Aktuálnost tématu práce

Tématem předložené disertační práce je analýza vlivu mikrostruktury na chování jednosměrných vláknových kompozitů. I když toto téma bylo v dřívější době předmětem mnoha studií, disertační práce se od nich odlišuje komplexním přístupem k řešení problematice – zahrnuje analýzu obrazu, lineární a nelineární konečněprvkové simulace a experimentální studie pro zjištění vlastností složek i kompozitu. V tomto ohledu je práce nepochybně aktuální.

Splnění cílů práce

Cíle práce, deklarované na straně 4, zahrnují

1. analýzu vlivu šířky vzorku, materiálu a délky uchycení na výsledky cyklických takových zkoušek,
2. tahové zkoušky epoxidové pryskyřice a využití získaných dat pro vylepšení modelu kompozitního materiálu,
3. vytvoření modelu jednotkové buňky, která odráží nepravidelnost rozložení výztužných vláken v průřezu kompozitu.

Všechny cíle byly bezezbytku splněny.

Postup řešení a přínos doktorandky

Postup řešení témat disertace považuji za adekvátní řešení problematice. Po krátkém úvodu do řešené problematiky autorka shrnuje provedené tahové testy v kapitole 2, následně uvádí výsledky analýzy morfologie mikrostruktury v kapitole 3. Následující dvě kapitoly se zabývají numerických modelováním, konkrétně pak materiálovými modely v kapitole 4 a výpočetní homogenizací v kapitole 5. Tyto výsledky jsou v přílohách doplněny dodatečnými detailními daty.

Všechny tyto výsledky považuji za originální příspěvek doktorandky. Kladně též oceňuji skutečnost, že při jejich získání spolupracovala z celou řadou svých kolegů na Západočeské univerzitě napříč obory.

Význam pro praxi a rozvoj vědního oboru

Na práci velmi kladně hodnotím, že kombinuje jak teoretické, tak experimentální aspekty řešeného problému. Praktický přínos práce pak spatřuji hlavně v dobře zdokumentovaných a rozsáhlých materiálových testech a analýz mikrostruktury, které mohou být následně využity pro další výzkumné aktivity v oboru kompozitních materiálů. V numerické části disertace pak autorka využívá standardních postupů, ale jejich interpretace a rozsah považuji za zajímavý. Kladně též hodnotím provedené srovnání mezi experimenty a modelem na straně 51, které prokazuje vynikající shodu.

Formální úprava práce a jazyková úroveň

Vlastní text disertační práce je psán anglicky, je velmi srozumitelný, a obsahuje přiměřené množství chyb a překlepů. Autorka též věnovala značnou pozornost přípravě kvalitních obrázků, které výstižně shrnují dosažené výsledky. To prokazuje, že autorka má adekvátní zkušenosti v psaní vědeckých publikací.

Závěrečné zhodnocení

Jak vyplývá z vyznění předchozích odstavců, předkládaná práce dle mého názoru splňuje požadavky kladené na disertační práce v České republice. Slečna/paní Hana Srbová prokazuje, že je schopna samostatné vědecké práce v oboru kompozitních materiálů a je schopna úspěšně využívat výsledků a postupů obrazové analýzy, konstitutivního modelování a numerické a experimentální mechaniky. Práci doporučuji k obhajobě, a v případě úspěšné obhajoby doporučuji slečně/paní Srbové udělit titul Ph.D.

V Praze, 18. května 2016



(Jan Zeman)

Otázky k diskusi

Při diskusi nad prací by se doktorandka mohla vyjádřit k následujícím otázkám:

1. V kapitole 1 uvádíte, že metody analýzy kompozitů se dají obecně rozdělit na analytickou homogenizaci (analytical homogenization), numerickou homogenizaci (numerical homogenization) a teorii směsí (mixture approach). Mohla byste, prosím, podrobněji vysvětlit, co jednotlivými přístupy rozumíte, jaké jsou mezi nimi rozdíly/podobnosti, a jaké jsou jejich výhody/nevýhody?
2. V kapitole 2 mě (jako ne-experimentátora) překvapilo, že pouze jeden test pro orientaci vláken $\theta = 0^\circ$ proběhl úspěšně. Čím byla, dle Vašeho názoru, tato skutečnost způsobena?

3. Jedním ze zajímavých výsledků kapitoly 3 je představení parametru Υ v rovnici (3.1). Mohla byste popsat, jak byl zvolen parametr R_A pro skutečnou mikrostrukturu, kde mají jednotlivá vlákna různé průměry?
4. Mohla byste, prosím, podrobněji okomentovat, jak rozumět rovnici (3.3) na straně 21?
5. Mohla byste, prosím, podrobněji okomentovat tvar specifické Helmholtzovy energie v rovnici (4.20)? Jak je to s termodynamickou přípustností tohoto modelu?
6. Mohla byste, prosím, okomentovat fyzikální interpretaci parametrů P_E , P_A , P_K a n představených v rovnici (4.29). Jak jsou v práci určeny? Z provedených materiálových zkoušek (Dodatek C) nebo ze zkoušek na kompozitních vzorcích (Kapitola 2)?
7. Chápu-li správně, tak v modelech zavedených na stranách 40 (Obrázek 5.6) a 41 (Obrázek 5.7) uvažujete oblasti, ve kterých se objevuje pouze matrice. Co Vás k této volbě vedlo? A jak jste určila rozměry této oblasti?
8. Chápu-li správně, tak data uvedená v tabulkách 5.1 (strana 49) a 5.2 (strana 50) byla určena na základě zpětné analýzy jednoosého tahového testu. Jaká je pak spolehlivost jednotlivých konstant modelu? A jak závisí jejich přesnost na nepřesnostech měřených veličin?
9. Na straně 134 uvádíte sedm časopiseckých publikací, na kterých jste se podílela jako spoluautorka. Mohla byste, prosím, naznačit, jak souvisí s jednotlivými částmi předkládané práce?