

Modeling of carbon and basalt plain weave textile composites

Autorka

Ing. Soňa Valentová

Práce se zabývá experimentální a numerickou analýzou chování celkem tří typů vláken vyztužených kompozitních materiálů. Jedná se o materiály s textilní plátňovou výztuží buď ve formě uhlíkových nebo čedičových vláken a s matricí ve formě epoxidových pryskyřic s různými tvrdidly (Havel L285/E508 a E455/H492) nebo keramickou matricí (polysiloxan).

Jsou provedeny experimentální tahové a creepové testy na vzorcích epoxidových matric. Pomocí naměřených dat a kódu v Matlabu byl kalibrován zobecněný Leonovův model pro popis viskoelastického chování. Experimentálně byla provedena i nanoindentace pro určení Youngovo modulů basaltových vláken.

Numerické simulace tahových a creepových zkoušek využívají metodu konečných prvků. Ta je použita i pro víceškálové modely (tzv. FE²), které kombinují homogenizaci prvního řádu a metodu Mori-Tanaka. Víceškálové modely jsou využity pro analýzu viskoelastického chování jednosměrového kompozitu a textilního kompozitu s vyváženou plátňovou vazbou. Nakonec je chování textilního kompozitu analyzováno i pomocí dvouškálového přístupu s uvažováním izotropního modelu poškození jednosměrového kompozitního snopku na mesoškále (Mori-Tanaka).

Práce je sepsána v anglickém jazyce a má rozsah 120 stran původního textu a 18 stran příloh. Text je psán srozumitelnou formou bez výrazných gramatických chyb a je doplněn až na drobné výjimky kvalitními grafy a obrázky. Matematické vztahy jsou opět až na drobné výjimky psány v jednotném a přehledném stylu.

Téma práce je rozhodně aktuální, neboť každý kompozitní materiál vykazuje obecně jiné chování a pro predikci takového chování v konkrétní aplikaci je nutné mít odpovídající kalibrovaný materiálový model nebo modely na různých škálách. Autorka vychází z teorie popsané v literatuře a z prací kolektivu na ČVUT a vhodně dané přístupy kombinuje. Autorka si vytyčila celkem 8 cílů, z nichž minimálně 6 bylo úspěšně splněno.

Z předložené práce bohužel není zřejmé, jakým způsobem byly implementovány modely definované v cílech dizertační práce. Jedná se o model popisující viskoelastické chování a model popisující poškození. Lze sice vytušit, že autorka využila software SIFEL, v práci ale není ani ukázka kódu, ani zmínka o jaký programovací jazyk se jednalo, jakým způsobem byl model propojen s hlavním řešičem, nebo jaké byly vstupy a výstupy (funkcí, subroutine) apod. Vzhledem k tomu, že modely nebyly nakonec ani nijak kalibrovány (nejlépe pomocí experimentálních dat), což byly další 2 cíle práce, není možné ani posoudit, zda jsou modely kvalitní a výsledky přímo uplatnitelné. Věřím ale, že se tyto zásadní nedostatky podaří objasnit během obhajoby.

Dovedu si představit, že cílů práce mohlo být méně a zároveň mohly být upraveny tak, že by nebylo nutné modely vyloženě kalibrovat, ale mohly být podrobeny důkladné numerické analýze např. z hlediska konvergence, citlivosti na parametry, časové náročnosti atd. V opačném případě se jedná „jen“ o kód, který má nějaké vstupy a nějaké výstupy, což může jinak kvalitní práci zbytečně znehodnotit. Vzhledem k tomu, že cílem práce nebylo vybrat materiál pro konkrétní aplikaci, tak by také možná bývalo jednodušší, věnovat se u simulací jen jedné kombinaci materiálů, a to ve větším detailu.

Formální nedostatky

1. Srozumitelné, ale nestandardní anglické obraty, např. „method of attack“, „Point out that“, „Recall, that“, „table stores results“.
2. Nestandardní označení běžných veličin např. „longitudinal/transverse shear modulus“, „longitudinal Poisson ratio“.
3. Chybějící pomlčky ve výrazech např. „so called“, „two scale“, „damage like“, „matrix based“ apod.
4. Zápis hodnot „1E-n“ se používá v počítačovém kódu, správně je „10⁻ⁿ“ v tabulkách i textu.
5. Jednotky se za číselnou hodnotou oddělují vždy mezerou (správně „30 kN“ místo „30kN“ atp.).
6. V obrázcích 3.1, 3.2, 3.3 a 6.4 chybí osy souřadnicového systému použitého např. v (3.1).
7. V 3.1 je PUC definováno na oblasti Y (stejně označení jako jinde pro souřadnici), ale v (3.13) se integruje přes Ω .
8. Vztah (3.14) není dostatečný, neboť periodičita oscilujícího řešení ε^* je samotným předpokladem FOH. Použití periodických okrajových podmínek tedy není lepší, ale je vyložene nutné. Navíc je potřeba úlohu doplnit o další okrajové podmínky, aby byla staticky určitá a tedy jednoznačně řešitelná.
9. Nekonzistentní značení některých veličin (např. \mathbf{D} a \mathbf{D} , \mathbf{I} a \mathbf{I} na str. 19 a 20). Od vztahu (4.1) se pro deformaci používá e (původně ε), následně je e použito pro vektor deviatorické deformace. Po vztahu (6.38) má pravděpodobně místo matice tuhosti \mathbf{D} být jinde používán \mathbf{L} .
10. Ve (4.4) a (4.14) chybí explicitní popis veličin J (ekvivalentní napětí) a J_2 (invarianty). Je to matoucí vzhledem k poddajnostem $J(t)$ ve (4.17) a J ve (4.19) a také módu porušení J v (6.33).
11. Tab. 4.1 a 4.2. Složené jednotky se oddělují tečkou uprostřed („Pa.s“) nikoliv na řádce („Pa.s“).
12. Tab. 4.6 a 4.7. Přehlednější by bylo používat znaménka „+“ buď u všech kladných exponentů, nebo nikde, čtenář v tom pak hledá nějaké pravidlo.
13. Obr. 4.6, 4.9, 4.10, 5.8, 5.9, 5.12, 5.14. V popisích os by se měl objevit příslušný symbol veličiny, pokud existuje („shear compliance“, „stress“).
14. Obr. 5.2 Síť by mohla být barevně odlišena pro použité materiály.
15. Vztahy (5.4) neplatí obecně, tak jak jsou zapsány.
16. Str. 60. Plochy mají být zřejmě uvedené v [μm^2].
17. Porovnáním (6.31) s (6.52) někde chybí nebo přebývá „2“.
18. Komentář (bez zdroje) týkající se srovnání s úlohou „běhounové vazby u zdiva“ je asi převzat z článku, kde byl z kontextu relevantní.

Dotazy na autorku

1. Můžete ukázat stěžejní části Vámi implementovaného kódu optimalizace Leonova modelu v Matlabu a viskoelastického modelu a modelu poškození v software SIFEL? Jaké jsou vstupní a výstupní parametry (funkcí, subroutin)?
2. Proč nebylo možné provést experimenty na kompozitu např. na běžné kombinaci uhlíkového plátna s epoxidovou maticí? Případně nedají se pro kalibraci najít a použít vhodné výsledky v literatuře?
3. Na str. 14 uvádíte, že FE² přístup je příliš výpočtově náročný. Dokážete vyjádřit, kolikrát nebo o kolik procent je v případě Vaší volby (viskoelastický materiál matrice, PUC/RVE/PHA s celkem 2 vlákny) náročnější než metoda MT?
4. S implementací viskoelastického modelu (izotropní) matrice v jednosměrovém kompozitu pomocí metody MT v 3.2 souvisí i dotazy, jak konkrétně vypadá matice \mathbf{L}_m v (3.16), když se do ní (viz též (3.1) a (3.2)) dosadí aktuální smykový modul \hat{G} ze (4.11) a zůstává materiál izotropní?
5. Obr. 5.1. Jaké bylo rozlišení obrázku (pixel/mm)? Můžete ukázat detail na úrovni pixelů?
6. Obr. 5.2 a 6.4. Proč nebyla síť modelu (dvakrát) symetrická? Nebylo by to lepší?

7. Obr. 5.3. Jaké byly zvoleny funkce pro popis ploch a jaký byl výsledný dopočtený objemový podíl vláken (Tab. 5.1)?
8. Jsou vztahy (5.5) a (5.6) v pořádku? Jak se tedy definuje matice L_f^{-1} ?
9. Obr. 5.12. Vysvětlete, proč je zde „evidentní lokalizace makroskopického smyku do jednotlivých fází“ (viz tvrzení na str. 53).
10. Proč je na modelu z obr. 5.16 „značné zlepšení“ oproti modelu z obr. 5.14, když nejsou k dispozici experimentální data ani žádná jiná metrika?
11. Je možné u obr. 5.22 až 5.29 zhodnotit, co je lepší a co horší? Jaký je jejich význam?
12. 5.3 Proč je v analýze viskoelastického chování uvažována pouze jedna rychlost zatěžování $dE/dt = 10^{-4} \text{ s}^{-1}$? Na str. 67 se pak navíc hodnotí, že odezva byla „víceméně elastická“ a „plně elastická“. A proč se jen porovnávají různé materiály, když není motivací konkrétní aplikace a nejsou k dispozici experimentální data?
13. Str. 91. Jak se pozná, co je „lepší odhad tahových pevností“? Není podezřelé, že na jejich odhad má vliv volba okrajových podmínek, resp. která volba a tedy definice úlohy je správná či lepší? Je zde zachována periodicitu fluktujícího řešení? Byla respektována materiálová orientace zvlněných snopků? Jak lze vysvětlit nepřírozenou nesymetrii mezi T_x a T_y a dále mezi G_x a G_y v Tab. 6.7?
14. Co se na str. 99 míní termínem „snap-back“? Můžete pro tento model (výsledky na obr. 6.23) uvést počet kroků/iterací/čas výpočtu?

Tak kde to bude vhodné, doporučuji reakce na nedostatky zapracovat přímo do prezentace obhajoby. Není nutné je tedy nechávat na samostatnou rozpravu.

Závěrem konstatuji, že autorka prokázala, že s v dané problematice dobře orientuje a je schopna kreativně propojovat různé postupy a přístupy. Práci proto doporučuji k obhajobě a vzhledem k výše uvedeným nedostatkům hodnotím známkou velmi dobře.

V Plzni 23.5.2022

doc. Ing. Robert Zemčík, Ph.D.

