

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. Vladimíra Matějka

VLIV VAD NA ÚNOSNOST KOMPOZITNÍCH KONSTRUKCÍ: DELAMINACE NA ROZHRAŇÍ DVOU MATERIÁLŮ

1. Aktuálnost tématu

Rychle rostoucí využívání kompozitních materiálů v průmyslu vyžaduje pečlivě zkoumat mechanismy jejich porušování, které se mnohdy významně liší od mechanismů porušování tradičních konstrukčních materiálů. Delaminace na rozhraní dvou materiálově rozdílných komponent patří mezi obzvláště sledované módy porušování kompozitních konstrukcí. Studium delaminace je založeno na principech lomové mechaniky rozhraní, která na rozdíl od lomové mechaniky homogenních materiálů stále prochází intenzivním rozvojem a obsahuje řadu problémů, jejichž vyřešení je velmi důležité pro návrh nových kompozitních součástí. Z tohoto hlediska je téma předložené disertační práce velmi aktuální a současně plně odpovídající vědnímu oboru Konstrukční a procesní inženýrství.

2. Cíle disertační práce a jejich splnění

Cílem výzkumu realizovaného v rámci disertace bylo: i) vyšetřování vlivu materiálových charakteristik na lomovou houževnatost rozhraní dvou rozdílných materiálů, ii) posouzení analytických metod pro stanovení lomové houževnatosti rozhraní při různých podmínkách smíšeného zatěžování, iii) vývoj lomových kritérií pro trhlinu na rozhraní při smíšeném módu zatížení a iv) vyvinutí automatizovaného měření délky trhliny. Lze konstatovat, že cíle disertační práce byly s výjimkou bodu iii) splněny.

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

Předložená práce se danou problematikou zabývá na 87 stranách textu a rozčleněného do 8 kapitol a 6 Dodatků, které se uvádějí algoritmus automatizovaného měření délky trhliny v použitých vzorcích a experimentální diagramy zatěžující síla posunutí-délka trhliny ns vzorcích různého typu. Literárních citací je 56, ale vzhledem k tomu, že práce se primárně zabývá problematikou delaminace, je počet literárních citací souvisejících s danou problematikou relativně nízký, postrádám některé literární prameny, které jsou z hlediska lomové mechaniky rozhraní velmi důležité, např. J.R. Rice, J.Appl. Mech. 55(1988), 98, V. Mantic, F. Paris, Int. J. Fracture, 130 (2004), 557, nebo Z. Suo, J.W. Hutchinson, Int. J. Fract. 43 (1990), 1. Vlastní publikace doktorand necituje, jejich seznam není v disertaci uveden. Původní výsledky jsou prezentovány v kapitolách 4 (str. 50-61), 5 (str.62-72), 6 (str. 73-79), 7 (str.80-81) a) a jsou stručně shrnuty v Závěru (str. 82). Literární rozbor je uveden na str. 3-46

a je zaměřen jednak na přehled jednotlivých pevnostních teorií v mechanice kompozitů a jednak na problematiku delaminace.

V kapitole 4 doktorand popisuje vytvoření nové optické metody pro automatizované měření délky trhliny v experimentálních vzorcích. Jedná se podle všeho o původní metodu, která využívá algoritmů pro zpracování obrazu v prostředí Python. S pomocí této metody autor pak přiřazuje sobě odpovídající hodnoty posunutí a délky trhliny k hodnotě zatěžující síly.

V kapitole 5 jsou odvozeny pomocí nosíkové teorie hnací síly trhliny pro jednotlivé typy experimentálních vzorků (DCB, ADCB, ELS) pro případ rozdílných elastických vlastností bimateriálového tělesa. Autor odvozuje, že celkovou hnací sílu trhliny nelze rozdělit na součet příspěvků hnacích sil v módu I a II. Na základě MKP analýzy růstu trhliny pomocí techniky virtuálního uzavření trhliny autor ukazuje, že rozdělení hnací síly trhliny na složku G_I a G_{II} je závislé na přírůstku trhliny v případě existence kontrastu elastických modulů. Tento výsledek je v souladu s již citovanou prací Mantice a Parise, kteří ukázali, že obě složky hnací síly rychle oscilují s klesajícím přírůstkem trhliny Δa a jejich hodnoty nemají limitu pro $\Delta a \rightarrow 0$. Poměr složek $G_{II}(\Delta a)/G_I(\Delta a)$ může být kladný i záporný v závislosti na Δa . Tento poměr je podle Mantice a Parise roven $\tan^2(\psi_G)$, kde ψ_G je fázový úhel popisující „mixitu“ módů I a II na čele trhliny podle energie a úzce souvisí s úhlem ψ_K charakterizujícím „mixitu“ smykových a tahových napětí před vrcholem trhliny. Protože pro zápornou hodnotu poměru $G_{II}(\Delta a)/G_I(\Delta a)$ není ψ_G reálné číslo, je zřejmé, že energetická koncepce popisu smíšeného módu zatížení je diskutabilní a pro popis mixity zatížení je vhodnější použít silovou koncepci. V této souvislosti je důležité zdůraznit, že na rozdíl od homogenního materiálu, jehož lomovou houževnatost lze charakterizovat jediným parametrem K_{IC} resp. G_{IC} , závisí odpor proti šíření trhliny, resp. kritická hodnota rychlosti uvolňování energie na rozhraní G_c na mixitě smykových a tahových napětí před vrcholem trhliny, jejichž vliv nelze oddělit. Pro mixitu charakterizovanou úhlem ψ_K je G_c funkcí tohoto úhlu $G_c = G_c(\psi_K)$, která se považuje za materiálovou charakteristiku. Problémem je, že fázový úhel ψ_K závisí v důsledku oscilačního charakteru napětí na vzdálenosti od vrcholu trhliny. Podle Rice (J. Appl. Mech. 55(1988)) je pro účely dalšího hodnocení chování trhliny v různých bimateriálových vzorcích nutné zavést smluvní vzdálenost l od vrcholu trhliny, nezávislou na ostatních rozměrech tělesa, ve které se bude poměr smykových a tahových napětí vyhodnocovat. Např. pro křehké bimateriálové vzorky je možné zvolit $l=100 \mu\text{m}$. Pomocí smluvní vzdálenosti l a komplexního faktoru intenzity napětí K lze pak definovat mixitu smykových a tahových napětí před vrcholem trhliny. Přestože tedy fázový úhel je do značné míry závislý na volbě smluvní délky l , jeho role je klíčová v tom, že specifikuje hodnotu disipované energie při růstu trhliny na rozhraní. Nelze tedy úplně souhlasit s tvrzením v disertační práci, že fázový úhel postrádá fyzikální význam a že není možné sestavit lomové kritérium zohledňující mixitu módů ve vrcholu trhliny na rozhraní.

V kapitole 6 disertant navrhuje nový postup (tzv. DLT) pro stanovení momentu iniciace lomu, jehož smyslem je odfiltrovat nelineární jevy, které nesouvisejí s šířením trhliny. Dále jsou v kapitole 6 shrnuty experimentální hodnoty kritické hnací síly trhliny pro vzorky DCB, ADCB a ELS. Pro DCB typ vzorku bylo použito 8 experimentálních vzorků, pro ADCB typ vzorku 4 experimentální vzorky a pro ELS typ bylo použito 5 vzorků. Data vykazují pro metodu DLT menší rozptyl, než u ostatních metod stanovení okamžiku iniciace lomu.

4. Význam pro další rozvoj vědního oboru a praxi

Výsledky disertační práce mají aplikační charakter a představují významný příspěvek k stanovení podmínek pro iniciaci delaminace ve vybraných kompozitech, které jsou na Leteckém ústavu FSI využívány pro letecké konstrukce.

5. 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. V práci jsem našel jen minimální počet překlepů.

6. Připomínky a dotazy k práci

a) Citování patří k základním atributům vědecké práce. Je na škodu, že část 2.4.1 rešeršní části vykazuje vysokou textovou shodu s prezentací Quality Assurance and Nondestructive Evaluation of Composite Materials, viz

http://slideplayer.com/slide/3439598/#.V1qjBRdrs4E.google_plusone_share, aniž by byla tato prezentace citována.

b) Závěr práce je velmi stručný, pouhých 6 řádek. Bylo by vhodné jej trochu rozšířit.

c) Doporučuji pro další práci stanovit pro každý typ vzorku a materiálovou kombinaci fázový úhel ψ_K pomocí modelu navrženého v práci Z. Suo, J.W. Hutchinson, Int. J. Fract. 43 (1990), 1.

d) Procedura v předchozím bodě platí v podmínkách SSC (malá kontaktní zóna), která je důsledkem oscilačního charakteru řešení pro rovinné módy zatížení trhliny na rozhraní vedoucímu ke kontaktu a protínání líců trhliny. Podle lineárního elastického řešení k protínání líců trhliny ($\delta_y < 0$) dojde při dostatečně malém $r \leq 1$ Å. Jsou ale situace, kdy podmínka SSC není splněna (jiný typ vzorku, změna délky trhliny) a vhodnější je použít kontaktní model podle M. Comminou, Eng. Frac. Mech 37 (1990), 197.

e) Vláknové kompozity mají zpravidla ortotropní symetrii, což se projeví též ve výpočtu hnací síly trhliny. Vztahy v práci platí pro isotropní bimateriály. Bylo zvažováno zohlednit ortotropní vlastnosti lamel při stanovení hnací síly trhliny?

7. Teze

Teze poskytují postačující informaci o obsahu doktorské práce.

8. Závěr

Předloženou práci hodnotím kladně. Ing. Vladimír Matěják prokázal 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 panu Ing. Vladimíru Matějkovi
titul PhD v oboru Konstrukční a procesní inženýrství.**

V Brně 10.6.2016



