



OPONENTNÍ POSUDEK

práce

Ing. Tomáše Mandyse

NUMERICKÁ SIMULACE CHOVÁNÍ KOMPOZITNÍCH KONSTRUKCÍ PŘI NÍZKORYCHLOSTNÍM RÁZU

V Praze dne 16. 10. 2016

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

1. Úvod

K posouzení byla předložena disertační práce Ing. Tomáše Mandyse, vypracovaná na Fakultě aplikovaných věd ZČU v Plzni. Práce se zabývá numerickými modely pro popis chování sendvičových panelů při rázu realizovaným v nízkých rychlostech dopadu impaktoru. Práce obsahuje 184 stran textu včetně příloh. Je rozdělena do sedmi kapitol s úvodní a závěrečnou statí.

2. Aktuálnost tématu a zhodnocení přínosu disertační práce pro obor

Cíle předkládané disertační práce jsou zařazeny jako podkapitola Úvodu a vytyčují se v ní čtyři hlavní úkoly:

1. navrhnout numericko-experimentální metodiku využívající optimalizačních metod pro identifikaci materiálových vlastností a analyzovat vlivy parametrů jako např. rychlosti dopadu impaktoru, energie zavedené do kompozitní struktury rázovou budící silou aj.
2. analyzovat vliv a nutnost modelování kompozitní struktury s využitím nelineárního konstitutivního vztahu zejména ve smyku
3. vybrat, eventuálně modifikovat, vhodná kritéria porušení predikující porušení jak ve vrstvě kompozitního materiálu, tak v mezivrstvě mezi dvěma vrstvami sousedních lamin
4. validovat výpočtové modely experimentem.

Tyto cíle hodnotím jako velmi aktuální, vzhledem k rozvoji metodiky navrhování „damage tolerance“ a praktické potřeby predikce poškození od impaktu. Práce významně přispívá ke know-how pracoviště a její výstupy jsou prakticky využitelné pro modelování zkoušek i rázových poškození vzniklých nejen v laboratorních podmínkách. Poznatky a závěry publikovaného výzkumu rozšiřují dosavadní poznání v oboru a přispívají k jeho rozvoji.

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

Po úvodu do problematiky se první kapitola věnuje přehledu současného stavu publikovaných a používaných numerických modelů simulace rázových dějů a jejich stručnému zhodnocení. Autor ukázal, že se seznámil s hierarchií hyperelastických i hyperplastických materiálových modelů se svázaným i nesvázaným poškozením. Zmapoval publikované způsoby modelování i vlastnosti materiálů pro potahy a jádra sendvičových panelů včetně způsobů jejich porušování impaktory. Domnívám se, že autor učinil správné rozhodnutí, když za vhodný model k dalšímu popisu a rozvoji numerické simulaci si zvolil elasto-plastický materiálový model s poškozením se svázaným modelem plasticity a poškození v implicitním vyjádření. Takový model by měl lépe vystihovat složité chování tkaninových kompozitových potahů sendvičů v zatěžovací ale i v odlehčovací fázi namáhání. Rovněž pro modelování sendviče se rozhodl pro poměrně reálný popis s uvážením nelineárního chování v tahu i tlaku.

Poté jsou v kap. 2 podrobně představeny modely používané pro popis rozvoje plasticity a poškození. Autor vychází z fenomenologických modelů efektivní plochy průřezu, degradace elastických materiálových modulů a modelu porozity. Vlastní model navržený pro tkaninový kompozit představuje v dalších dvou kapitolách. Nejprve v kap. 3 jako elastický s nelineárním chováním normálových i smykových složek v rovině tkaniny a následně v kap. 4 jako elasto-plastický s poškozením. **Rád bych se dotázal, jak se popsaná a v proceduře UMAT naprogramovaná varianta Murakamiho modelu [70] liší od publikovaného modelu v literatuře? Jaké modifikace autor prováděl, pokud je prováděl?**

Jádro realizace vlastních experimentálních zkoušek a porovnání s výsledky numerických simulací tvoří obsah kapitol 5 až 7. V kap. 5 je popsáno zařízení zkonstruované pro nízko rychlostní rázy. Kap. 6 je věnována sendvičům. Jsou zde popsány a uvedeny výsledky zkoušek sedviče a jeho stavebních komponent (potahu a pěny) a validace parametrů navržených modelů na experimentální data při statickém zatěžování. Optimalizační proces byl řízen programem OptiSLang a materiálový model byl implementován do MKP řešiče ABAQUS proceduramu UMAT a VUMAT. Podkapitoly uvádějí model pěny používaný pro tahovou oblast deformační odezvy (rov (6.2)), **ne našel jsem však podrobnější matematický popis modelu pro oblast tlakovou, jehož ideální průběh a reálné výsledky jsou uváděny na obr. 6.7 a 6.8. Lze doplnit?** Chování modelu autor ověřil nejprve ohybovou zkouškou vzorku z materiálu pěnového jádra sendviče a poté zkouškou simulací tříbodového ohybu celého sendvičového nosníku. Výsledky na obr 6.11 a 6.14 demonstrují dobrou shodu experimentu s modelováním. Pouze bych preferoval větší velikost těchto obrázků (neproporcionální vůči fotografiím a významu informace pro čtenáře). Na dalším místě kapitoly jsou popsány experimenty při impaktování sendvičových nosníků uprostřed uložení mezi dvěma podporami a to razníky dvou různých hmotností. Všiml jsem si nutnosti provedení korekce (interpolace) MKP dat průhybů nosníku z důvodů odchylky uzlů od ideální vertikální dráhy paprsku optického měření průhybů. Oceňuji tyto důležité postřehy autora. **Přesto se dále táži, zda (ať pouze v MKP modelu, nebo možná i v realitě) nemohl být impaktor výrazným ohybem sendvičového nosníku jaksi „vytlačován“ z kontaktu dotykem svých boků v brázdě vzniklé deformací potahu sendviče a zda to mohlo ovlivnit výsledky simulací, jak je to viditelné na obr. 6.20?**

Porovnání výsledků demonstruje, že navržený model sendviče je schopen velmi dobře postihnout jevy elastoplastické odezvy i jevy poškození vzniklé při impaktním rázu.

Další experimenty a výpočty proběhly při impaktování sendvičové desky (400x400 mm) impaktorem 2.34 kg s následnou počítačovou simulací účinku rázu. Domnívám se, že

experiment nebyl navržen optimálně, neboť ve všech případech došlo k významnému poškození „propadnutí“ impaktoru dolním potahem. Taková poškození v praxi budou pro další provoz nepřijatelná a naopak významný mód, kdy dojde k delaminaci potahu, která je z vnější strany nepozorovatelná, vyzkoušen ani modelován nebyl. To však nic nemění na přesvědčivém průkazu uváděných výsledků, že model je dobře naladěný a dává výbornou shodu s experimentem.

Kap. 7 je věnována tkaninovému kompozitu. Opět se autor v první části nejprve věnuje identifikaci materiálových parametrů. Oceňuji systematický přístup i metodiku zpracování dat při identifikaci materiálových parametrů svázaných elastoplastických modelů s poškozením. Počet laděných parametrů je opravdu vysoký a autor si s tímto faktem velmi dobře poradil a dosáhl přesvědčivých výsledků. To se potvrdilo i při porovnání výsledků nízkorychlostního impaktu na tkaninovou desku obvodově podepřenou. Diskusi může vzbudit pouze neexistence „špičky“ v časovém průběhu síly v počáteční fázi impaktu, která je patrná v simulačních modelech a není v simulační odezvě výpočtového modelu. Jistěže má kompozit nezanedbatelný útlum, který v simulaci uvažován není, otázkou však jsou i ztráty třením ve vedení impaktory nebo dynamická citlivost použitého snímače síly.

Další dotazy a připomínky k práci:

Přehled použitého označení nejsou uvedeny fyzikální jednotky

Str. 50, rov. 2.78 z rovnice by plynulo že $\varepsilon^e = \bar{\varepsilon}^e$, správně má být $\sigma = \bar{E} \cdot \varepsilon^e$.

Str 61, rov (4.13) chybí označení druhé parc. derivace o členu ψ

Obr. 7.15 až 7.21 nenašel/přehlédl jsem, co značí v legendě popsané [40,0], [40,40], [0,40]?

Doporučil bych neužívat slovo zkušební “testy”, “testování” atp. Experimentátoři provádějí zkoušky a zkouší. Testy jsou např. těhotenské...

4. Stanovisko k výsledkům disertační práce a původnímu konkrétnímu přínosu

Doktorand odvedl nejen velké množství práce, ale prokázal i dostatek invence jak v experimentech, tak v simulacích. Prokázal schopnost řešení komplexní problematiky s využitím vhodných programovacích nástrojů a metod a získal unikátní výsledky, které mohou naplnit několik publikací v renomovaných časopisech. Domnívám se, že dosáhl více, než že pouze „naplnil“ cíle své disertační práce.

5. 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. Několik nalezených překlepů nebo nejasností nesnižuje její hodnotu. Zejména bych doporučil korigovat

Tyto připomínky však nejsou zásadní z hlediska odborné úrovně práce.

6. Vyjádření k publikacím studenta


Disertant ve své práci publikuje řadu původních výsledků experimentálních zkoušek i numerických analýz. Uvádí celkem 11 publikací souvisejících s tématem disertace a to jak příspěvků na tuzemských i zahraničních konferencích i časopiseckých publikací. V textu tyto své práce na vhodných místech cituje.

7. Závěrečné hodnocení

Domnívám se, že předložená disertační práce ing. Tomáše Mandyse 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. Autor v ní prokázal schopnosti samostatné vědecké práce a systematického i kritického přístupu k hodnocení výsledků. Doporučuji, aby v případě uspokojivých odpovědí na dotazy oponentů a úspěšné obhajoby mu byl přiznán titul Ph.D.

Milan Růžička

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Ruzicka', with a stylized flourish extending to the right.

prof. Ing. Jozef BOCKO, CSc.
Technická univerzita v Košiciach
Strojnícka fakulta
Ústav konštrukčného a procesného inžinierstva
Katedra aplikovanej mechaniky a strojného inžinierstva
Letná 9
041 00 Košice
Slovensko

OPONENTSKÝ POSUDOK

dizertačnej práce Ing. Tomáša Mandysa

Numerická simulace chování kompozitních konstrukcí při nízkorychlostním rázu

Študijný odbor:	Aplikovaná mechanika
Školiace pracovisko:	Katedra mechaniky, Fakulta aplikovaných vied, Západočeská univerzita v Plzni
Školiteľ:	prof. Ing. Vladislav Laš, CSc.
Školiteľ špecialista:	Ing. Tomáš Kroupa, Ph.D.

Dizertačná práca Ing. Tomáša Mandysa je spracovaná na 152 stranách, obsahuje tri prílohy a je v nej uvedených 104 literárnych prameňov. Práca je členená do siedmich kapitol.

Dizertačná práca sa venuje numerickej simulácii chovania kompozitných materiálov s penovým jadrom pri nízkorychlostnom ráze. Je v nej rozpracovaná numerická analýza riešenia takýchto problémov a opisuje aj experimentálne merania vykonané na konkrétnych kompozitných konštrukciách. Numerická analýza bola vykonaná metódou konečných prvkov.

V prvej kapitole sa čitateľ zoznamuje so súčasným stavom problematiky testovania a modelovania kompozitných materiálov so sendvičovou štruktúrou s penovým jadrom. Je tu popísané základné rozdelenie a formy správania sa jednotlivých zložiek sendvičovej konštrukcie i typy poškodení.

Kapitola 2 sa zaoberá popisom teoretických a matematických základov v prípade modelovania plasticity a poškodenia materiálov. Sú tu opísané matematické formulácie, pričom pre popis je použitá nelineárna teória pružnosti. Základné formulácie zahrňujú opis elastického a hyperelastického materiálu, modelovanie plasticity, poškodenia a sú tu uvedené konštitučné vzťahy pre poškodený materiál.

V ďalšej kapitole je uvedený autorom navrhnutý nelineárny elastický model tkaninového kompozitu s poškodením, ktorý bol použitý pre model poťahu sendvičovej štruktúry.

Kapitola 4 je venovaná elasto-plastickému materiálovému modelu tkaninového kompozitu s poškodením. Model je navrhnutý v súlade s termodynamickými princípmi používanými pri hyperplastických modeloch.

V piatej kapitole je opísané experimentálne zariadenie (zahrňujúce meracie a záznamové zariadenia), ktoré bolo postavené na realizáciu rázových skúšok.

V šiestej kapitole sa dizertant zaoberá zostavením modelu sendvičovej konštrukcie. Pre kompozitný poťah je použitý elastický nelineárny materiálový model. Jadro je modelované s použitím nelineárneho izotropného modelu polymérnych pien s nízkou hustotou z knižnice programu Abaqus. Nelineárny materiálový model poškodenia bol implementovaný pomocou užívateľských podprogramov. Model bol následne porovnávaný s výsledkami experimentálnych meraní, pričom bola dosiahnutá zhoda výsledkov.

V siedmej kapitole je opísaná identifikácia materiálových vlastností tkaninového kompozitu, pričom na modelovanie bola použitá nelineárna teória hyperplasticity s poškodením. Materiálový model bol implementovaný do programu Abaqus. Výsledky simulácie vykazujú dobrú zhodu s experimentmi.

Výsledky práce sú zhrnuté v Závere.

Zhodnotenie významu dizertačnej práce pre odbor

Tému dizertačnej práce považujem za aktuálnu, pretože dizertant sa venuje dôležitej problematike numerickej simulácie sendvičových konštrukcií pri nízkorýchlostnom ráze. Takéto konštrukcie sa používajú v špičkových zariadeniach napr. v leteckom priemysle a ich simulácia je vzhľadom ku komplexnosti javov, ktoré sa v takýchto štruktúrach vyskytujú, veľmi zložitá. Prínos práce vidím práve v zvládnutí zložitého fyzikálneho popisu správania sa uvedených konštrukcií a v navrhnutí konkrétnych materiálových modelov pre modelovanie tkaninového kompozitu. Významný je aj návrh metodiky identifikácie materiálových parametrov, ktorú autor použil v svojej práci.

Možno jednoznačne konštatovať, že práca je významným prínosom pre daný vedný odbor i praktickú inžiniersku činnosť a sú v nej predstavené najdôležitejšie súčasné trendy z oblasti modelovania sendvičových konštrukcií pri ráze.

Vyjadrenie k postupu riešenia problému, použitým metódam a splneniu určeného cieľa

Dizertačná práca má vhodné členenie a používa najnovšie prístupy pre dosiahnutie stanovených cieľov v súlade so súčasným trendom vo svete. Využíva kombináciu numerického modelovania a experimentov.

Konštatujem, že predložená dizertačná práca splnila ciele, ktoré v nej boli definované. Práca preukazuje zvládnutie metód numerického modelovania, experimentálnych metód a tiež reprezentuje dobré didaktické schopnosti autora. Ciele práce zhrnuté do štyroch bodov:

1. navrhnuť numerickeo-experimentálnu metodiku pre identifikáciu materiálových vlastností a analyzovať ich vplyv,
2. analyzovať vplyv modelovania sendvičovej konštrukcie s použitím nelineárneho modelu,
3. vybrať a modifikovať kritériá porušenia v jednotlivých zložkách kompozitu,
4. validovať výpočtové modely,

boli splnené a jednotlivé etapy riešenia boli v práci podrobne opísané.

Stanovisko k výsledkom dizertačnej práce a k pôvodnému konkrétnemu prínosu predkladateľa dizertačnej práce

V teoretickej časti práce sú opísané poznatky a rovnice, ktoré sa využívajú pri riešení analýz sendvičových konštrukcií, sú tu popísané teoretické poznatky a spôsoby výpočtu takýchto konštrukcií s využitím nelineárnych metód mechaniky kontinua.

Experimentálnymi meraniami sa vykonávala identifikácia parametrov príslušného modelu a zisťovali sa kvantitatívne i kvalitatívne zmeny v konštrukciách pri rázoch. Výsledky MKP analýz a experimentálnych meraní boli porovnávané a vykreslené v grafoch, pričom bola dosiahnutá zhoda výsledkov.

Hlavný prínos práce spočíva v navrhnutí dvoch nelineárnych materiálových modelov pre simuláciu tkaninových kompozitov s porušením, implementácii modelov pomocou podprogramov UMAT a VUMAT do systému Abaqus, vo vypracovaní metodiky identifikácie materiálových parametrov a porovnaní výsledkov numerických simulácií s výsledkami experimentálnych meraní.

Poznámky k dizertačnej práci:

- Str. xviii – B_{ij} sú zrejme zložky tenzora (druhého rádu) rozvoja poškodenia a nie prvky vektora (tenzora prvého rádu).
- Str. 40, (2.59), prvý vzťah – Rovnica má byť zrejme v tvare $\sigma = C:\varepsilon$, pokiaľ nejde o Voigtovu notáciu, čo však nevyplýva z kontextu.

Na autora práce mám nasledujúce požiadavky a otázky:

- Prosím dizertanta, aby bližšie špecifikoval prípadné problémy spojené s experimentálnymi meraniami, ktoré sa, hlavne v začiatkoch, pri experimentoch vyskytujú.
- Aká bola časová náročnosť počítačových simulácií?
- V časti 6.4.3 na Obr. 6.22 až 6.24 vidieť v porovnaní s experimentmi rozdiely vo výkmitoch kontaktnej sily, hoci akási priemerná stredná hodnota oboch veličín má podobný priebeh. Rozdiely vysvetľujete zanedbaním tlmenia v kontakte pri numerických simuláciách, prípadne vibráciami pri vykonávaní experimentov. Skúmali ste konvergenciu riešenia numerickej simulácie? Nepomohlo by odstráneniu týchto disproporcií použitie jemnejšej siete konečných prvkov?

Vyjadrenie k systematike, prehľadnosti, formálnej úprave a jazykovej úrovni dizertačnej práce

Predložená dizertačná práca má vysokú odbornú úroveň, vhodné členenie a vynikajúce grafické spracovanie. V práci je zanedbateľné množstvo preklepov.

Vyjadrenie k publikáciám študenta

Autor publikoval na tému súvisiacu s dizertačnou prácou 11 publikácií. Sú medzi nimi príspevky na domácich a zahraničných konferenciách i publikácie v známych zahraničných časopisoch. Publikačnú aktivitu dizertanta pokladám za primeranú.

Doporučenie k obhajobe dizertačnej práce

Predložená práca spĺňa podmienky kladené na dizertačnú prácu, odporúčam ju prijať k obhajobe a po jej úspešnom obhájení navrhujem udeliť doktorandovi akademický titul „philosophiae doctor (Ph.D.)“.

Košice, 24.10.2016



prof. Ing. Jozef Bocko, CSc.