Oponentní posudek
disertační doktorské práce

Ing. Petra Měšťánka

„Únavové poškozování kompozitních materiálů“

Předložená práce, vypracovaná na školícím pracovišti – Katedře mechaniky Fakulty Aplikovaných věd Západočeské univerzity v Plzni pod vedením školitele Prof. Ing. Vladislava Laše, CSc., je předkládaná k obhajobě ve vědním oboru Aplikovaná mechanika. Práce o celkovém rozsahu 143 číslovaných a 7 nečíslovaných stran svým zaměřením i náplní odpovídá plně tomuto zaměření. Posouzení bylo provedeno podle čl. 107 Studijního a zkušebního řádu ZČU

a) Výběr tématu a jeho zaměření považuji za vysoce závažný, protože vychází z aktuálních požadavků technické praxe. Po období, kdy kompozity byly užívány především pro méně nosné části konstrukcí, dochází k jejich masivnímu nasazení v oblasti primárních, tj. nosných, částí konstrukcí. A to nejen ve špičkových oborech jako je letectví a kosmonautika, A tak, stejně jak tomu bylo u materiálů kovových, je nutno zavést pro kompozitní materiály podobně moderní přístupy v hodnocení časované pevnosti a přípustných poškození jednotlivých částí či celé struktury při uvažování časově proměnného zatěžování. Předložená práce odpovídá současným požadavkům na vytvoření nástrojů, pomocí nichž bude možná prognóza průběhu únavového poškození kompozitního materiálu a jeho struktury.

b) Předložená práce shrnuje poměrně dlouhou etapu studia a ověřování postupného poškozování laminátů vyztužených dlouhými orientovanými vlákny, u nichž dochází povětšinou k poruchám v matrici. Z množiny módů poškození kompozitu byl vybrán právě tento, což vede na mikromechanický přístup v posuzování poškození. Problematika uškozování u kompozitů se diametrálně liší oproti kovovým materiálům. Celoobjemové poškozování kompozitního materiálu nutně vede k rozdílnému přístupu v hodnocení zbytkové pevnosti na základě změn tuhosti.

Cíl práce byl stanoven uvážlivě jak svým vědeckým přínosem, tak i časovými i kapacitními nároky. Přínosem předložené práce bylo navržení více-škálového způsobu výpočetní simulace poškození laminátu na úrovni vzniku a rozvoje postupného šíření trhliny v matrici, jejich propojování až po porušení celé konstrukce. Pro modelování šíření trhliny na úrovni mikro i meso byla použita metoda konečných prvků s lineárním modelováním vlastností matrice a vlákna.

Vzhledem k časovým i ekonomickým nárokům celá řada experimentů z oblasti únavy a životnosti je dnes nahrazována, stejně jako v jiných odborech, numerickým modelováním. V tomto smyslu vyznívá také předložená doktorská práce.

Postup prací a dosažené výsledky odpovídá plně jednotlivým stanoveným etapám A) až f) na str. 4 předložené práce.

c) Výsledky postupů a závěry předložené práce jsou v plném souladu s postupy podle moderních přístupů „Fail Safe“ a „Damage Tolerance“ pro aplikace u laminátů. Práce je zaměřena na skelný netkaný laminát s výztuhou Interglas 92145 a expoxydovou pryskyřicí. Hlavním přínosem, podle názoru oponenta, jsou experimentální výsledky, které kromě kvantitativních výsledků stanovil zásady pro realizaci experimentů a jejich dodržován pro dosažení průkazných výsledků. Zároveň naznačil pokračování a postupy pro identifikaci degradační rovnice (obecný vztah 59 předložené práce).

Autorem práce byla pak navržena nová metodika predikce růstu únavové trhliny v 3D tělesech podle kapitoly 6. Získané závislosti hustoty příčných trhlinek jsou pak jsou v dobré shodě s provedenými experimenty. Na navrhovaném postupu sledování poklesu tuhosti a dosažených výsledcích dále oceňuji jejich relativně jednoduchou aplikovatelnost, zřejmě i pro

složitější tvary konstrukce. Autor si uvědomuje určitá omezení daná posuzováním makroobjemů, jako jsou zárodečné trhlinky. K tomu bude nutno připojit i zbytková napětí nutně vznikající v epoxidové matrici. Rád bych proto znal názor p. disertanta na této vliv.

d) V předložené práci jsem neshledal žádné chyby. Na vlastní práci je zřejmý příkladný přístup školícího pracoviště a školitele samého i přínos zahraniční stáže p. disertanta. Práce je vypracována přehledně a s velikou pečlivostí a tak jak svoji formou tak hlavně obsahem splňuje nároky na tento druh prací.

e) Málokterý disertant se může pochlubit tak rozsáhlý seznamem publikační činností časopiseckou i konferenčními vystoupeními. I po této stránce p. disertant plně vyhovuje nárokům na diseretabilitu jeho práce.

Závěr:

Disertační práce Ing. Petr Měšťánka řeší vysoce aktuální problematiku, pro jejíž řešení autor práce použil odpovídající moderní postupy a metody. Předložená práce dokumentuje vynikající připravenost p. disertanta v celé oblasti mechaniky kompozitních materiálů. P. dizertant splnil stanovené cíle, které přispěly k aplikaci stávající predikce životnosti součástí z kompozitních materiálů a tím přispěl k dalšímu rozvoji metody i celého oboru aplikované mechaniky. Výsledky předložené práce jsou přínosem pro příslušný vědní obor jak po stránce teoretické tak i praktické. P. disertant plně prokázal svoje schopnosti samostatné vědecké práce.

Mohu proto předloženou disertační práci p. Ing. Petra Měšťánka „Únavové poškozování kompozitních materiálů" **plně doporučit k obhajobě** před komisí pro státní doktorské zkoušky Fakulty aplikovaných věd Západočeské univerzity v Plzni a po jejím úspěšném obhájení udělit p. disertantovi akademický titul

philosophie doktor (Ph.D.).

V Praze dne 27. října 2014

Prof. Ing. Stanislav Holý, CSc.

ČVUT . Fakulta strojní
Ústav mechaniky, biomechaniky a mechatroniky
Odbor pružnosti a pevnosti

Technická 4, 166 07 Praha 6

Západočeská univerzita v Plzni
Doručeno: 27.11.2014
ZCU 035602/2014
listy:7 přílohy:
druh:
zcupesd64df9

Oponentní posudek disertační práce

Ing. Petra Měšťánka

"ÚNAVOVÉ POŠKOZOVÁNÍ KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ"

a) Význam disertace

Disertační práce Ing. Petra Měšťánka je významným příspěvkem k řešení velice komplexního a pro praxi důležitého problému porušování polymerních kompozitů vyztužených dlouhými vlákny. Tato problematika je již několik desítek let stále aktuální a dále nabývá na významu s rostoucím využitím kompozitních materiálů v konstrukční praxi, zejména pak v letectví a kosmonautice ale i u jiných dopravních prostředků, u stavebních konstrukcí, zásobníků a potrubí v chemickém průmyslu i jiných odvětvích, všude tam, kde je z ekonomických i dalších hledisek (životnost, hmotnost, korozní odolnost apod.) výhodné nahradit tradiční kovové či jiné materiály polymerními kompozity. Z hlediska bezpečnosti, spolehlivosti i životnosti staticky či cyklicky namáhaných konstrukcí je však třeba brát v úvahu podstatné odlišnosti mechanického chování a porušování dlouhovláknových kompozitů, kde na rozdíl od kovových materiálů může dojít k náhlému porušení či ztrátě únosnosti nikoliv rozvojem magistrálních defektů či plastické deformace, ale v důsledku postupného poškozování vnitřní struktury na mikro- a mezo-skopické úrovni. Z tohoto hlediska je pro posuzování okamžitého stavu a predikci dalších změn mechanických vlastností kompozitu nejdůležitější znalost mechanizmu progresivního porušování nejslabšího článku, což je u vrstvených laminátů vrstva s nejméně vhodnou orientací výztuže vzhledem k hlavním osám namáhání (FPF). Právě na tyto problémy, důležité jak z hlediska efektivního návrhu, tak statické i únavové odolnosti kompozitové konstrukce, zaměřil Ing. Měšťánek svoji velice přínosnou disertační práci.

Značný význam posuzované disertační práce spočívá právě v návrhu a detailním rozpracování originálního komplexního způsobu řešení problémů spojených s počátečními procesy poškozování vláknových kompozitů mechanizmem vzniku, rozvoje a interakcí drobných příčných trhlinek v matrici, jejichž stoupající hustota má posléze za následek FPF, vedoucí k lavinovitému rozvoji porušování. Detailně rozpracovaný více-škálový výpočetní model, objasňující vliv těchto mikro-defektů na postupný rozvoj poškození a s ním související degradaci tuhosti vrstevnatého kompozitu je zde navržen tak, aby pro formulaci numerické úlohy predikce zbytkové životnosti za různých okrajových podmínek a při různých skladbách lamin postačoval minimální počet vstupních parametrů, které je nezbytné zjišťovat experimentálně (jednoduché tahové zkoušky vzorků při kvazistatickém a cyklickém namáhání), což vede k podstatnému snížení časových i finančních nároků oproti obvykle prováděným komplikovanějším testům, vyžadujícím víceosé resp. dlouhodobé únavové namáhání.

b) Postup řešení, metody a splnění cílů

Doktorand si ve své disertační práci o celkovém rozsahu 124 stran vytkl velmi náročné cíle, stručně zformulované do šesti bodů ve druhé kapitole na str.4. Již samotná formulace cílů svědčí o velmi dobře promyšlené koncepci autora a jeho hlubokých znalostech mechaniky kompozitních materiálů a problematiky jejich porušování i o zkušenostech a poznatcích získaných zejména v průběhu studijního pobytu na Stanfordově universitě v USA. Pregnantně formulované cíle vycházejí z teoretických východisek kritického studia literatury k dané problematice (kap.3) a odrážejí snahu navrhnout nové, prakticky využitelné postupy predikce

životnosti dlouhovláknových polymerních kompozitů na základě elementárních lomových mechanismů. Disertant se ve své práci omezuje pouze na počáteční fáze porušování, které jsou z hlediska zbytkové životnosti často rozhodující a tomu přizpůsobil i volbu použitých experimentálních metod i simulačních modelů. Vychází přitom z předpokladu, že rozhodujícím degradačním mechanismem je v této fázi tvorba a propojování trhlinek v matrici. Kombinovaná experimentální a výpočetní metodika zahrnuje pohledy jak z hlediska strukturní mikromechaniky lomových procesů, tak mechaniky porušování homogenizovaného kontinua.

Ve 4. kapitole pan Měšťánek popisuje experimenty a diskutuje získané výsledky změn tuhosti při jednoduchých kvazistatických i cyklických tahových a nestandardních ohybových testech CFRP laminátů a laminátů se skelnou tkaninou. Z rozboru experimentů vyvozuje závěry, že tyto testy, kdy bylo navíc u ohybových zkoušek nutné vyhodnocovat změny tuhosti pomocí MKP, nepřinesly vzhledem k nevhodně zvolené metodice a nedostatečnému přístrojovému vybavení očekávané výsledky. V následující 5. kapitole proto stručně zformuloval požadavky na nový experimentální program, zahrnující m.j. také průběžné monitorování probíhajících mikromechanických dějů ve struktuře namáhaného kompozitu za použití mikroskopické kamery. Tento experimentální program spojený s následný numerickým modelováním, který realizoval v USA na Stanfordově universitě, je detailně popisován a rozebírán v následující 6. kapitole (nikoli v kap.7., jak je chybně uvedeno na str.50 dole). Výsledky těchto zkoušek a úspěšnost numerického modelování rozvoje porušování nasvědčují tomu, že cílů, které si doktorand vytkl v úvodu, bylo prakticky dosaženo. Doktorand zde prokázal svoji experimentální zručnost i schopnosti využít teoretické poznatky z literárních pramenů i výsledků provedených zkoušek k numerickým simulacím reálných mechanismů porušování kompozitů.

c) Výsledky, původní konkrétní přínos

Konkrétní přínosy své práce shrnul Ing. Měšťánek na třech stranách v kap.7. Za nejdůležitější lze v souladu s vytčenými záměry považovat návrh výpočetního postupu predikce tvorby příčných trhlinek v matrici jak při kvazistatickém tak i cyklickém zatěžování, k němuž jsou jako vstupní parametry zapotřebí pouze data ze zkoušek jednoduchých vzorků. Originalita doktorandem zvoleného přístupu spočívá právě v kombinaci experimentálně získávaných poznatků o mikro- i makroskopických mechanismech porušování s více-škálovým numerickým (MKP) modelováním rozvoje porušení od mikromechaniky vzniku trhlinek v matrici, přes mesoskopickou úroveň jejich kumulace až po makroskopické změny mechanických vlastností (degradaci tuhosti) laminátu s libovolnými sekvencemi kladení vrstev. Toto pojetí, na rozdíl od dosavadních přístupů, umožňuje hodnocení stavu a mechanizmu počátečních fází porušování, což je důležité jak v postupech SHM, tak také k predikci vývoje dalšího poškozování, které může vést v konečné fázi k destrukci konstrukce.

Práce Ing. Měšťánka přispívá k vypracování teoreticky i experimentálně dobře podložených podkladů pro návrh konstrukce z kompozitů, optimalizovaný z hlediska počátečního rozvoje poškozování a zbytkové životnosti. Výsledky četných zkoušek kompozitů s různým složením a navrženého modelu mechanismu porušování tvorbou příčných trhlinek v matrici potvrzuje autor obecně známé skutečnosti, že poklesy elastických modulů (zbytková tuhost) s rostoucí hustotou těchto trhlinek jsou dobrým indikátorem okamžitého stavu součásti z kompozitu, a že rozhodující veličinou pro predikci tvorby těchto trhlinek je klasické kritérium lineární lomové mechaniky - intensita uvolňování elastické energie v tělese (SERR), která ovšem závisí na módu namáhání. Např. při nevhodném namáhání jednosměrně vyztužených kompozitů

či jejich vrstev mohou být hlavním mechanismem zárodečného porušování adhezní trhliny na rozhraní vlákno-matrice.

Jak výsledky důmyslně připravených a pečlivě prováděných experimentů, tak obtížných více-škálových numerických simulací představují nepochybný přínos k porozumění mechanismům počátečních stádií porušování vláknových kompozitů. Je však třeba konstatovat, že jediná disertační práce nemůže problematiku predikce dalšího vývoje mechanického chování a poškozování struktury kompozitu vyřešit v celé šíři. Otázkami zůstávají např. úloha pevnosti a adhezních poruch na rozhraní matrice-vlákno, nedokonalé prosycení svazků vláken pryskyřicí, přídavná ohybová napětí v oblastech křížení výztuže u tkanin, praskání krycí (gel-coatové) vrstvy při prostém tahovém i cyklickém namáhání, viskoelastické vlastnosti polymerní matrice, volná zakončení vláken na okrajích tělesa, atd. Tyto a další otázky pochopitelně nemohly být ani v relativně komplexním numerickém modelu porušování kompozitu zohledněny.

Nejistoty jakékoliv predikce porušování, vycházející z celé řady zjednodušujících předpokladů, musí být u kritických konstrukčních dílů alespoň částečně eliminovány doplňujícími údaji diagnostických monitorovacích systémů (SHM), jejichž jsou vedle vhodně zvolených nedestruktivních testovacích metod (NDT) navazující výpočetní postupy nedílnou součástí. O některých NDT metodách se autor také zmiňuje v teoretickém rozboru své práce, i když jejich stručný výčet není ani zdaleka vyčerpávající. V současné době jsou zejména u leteckých konstrukcí s převažujícími kompozitovými díly stále častěji integrovány diagnostické prvky (např. optická či piezoelektrická vlákna apod.) přímo do struktury kompozitu a navíc jsou kromě již tradičně snímaných deformací kritických míst v reálném čase vyhodnocovány další veličiny okamžitého stavu součástí z kompozitů (rozložení teplot, vlhkosti, atd.). Kdyby doktorand současně s mikrokamerou navíc použil např. metodu akustické emise, byly by závěry z náročných experimentů ještě cennější pro další návrhy SHM systému.

V kap.7 zmiňuje disertant i některé další směry výzkumu v dané oblasti související např. s tím, že je také zapotřebí dále zredukovat testy pro získání vstupních dat do výpočetních modelů. Zde je třeba si ale uvědomit, že současné konstrukce z kompozitů jsou v řadě případů navrhovány jako „smart", s optimalizovaným kladením vrstev s ohledem na maximální namáhání, s proměnlivou tuhostí a s kombinacemi různých typů materiálů (GFRP, CFRP, kovy,..), kdy je velice obtížné předpovědět mechanizmy porušování pomocí výpočtů se vstupními daty ze zkoušek na velmi jednoduchých tělesech.

d) Vyjádření k přehlednosti, formální úpravě a jazykové úrovni práce

Posuzovaná disertační práce Ing. Měšťánka je po formální stránce velmi pečlivě vypracována a autor zde uvádí velké množství grafů a fotografií i velmi detailních vyobrazení (107), názorně vysvětlujících použité metody a dokládajících značný rozsah prováděných experimentů a výpočetních simulací. Jejich úplný seznam s odkazy na příslušné stránky je přehledně uveden v úvodu práce, stejně tak jako přehledný seznam používaných značení a zkratek. Detailní diskuse všech experimentálních i simulačních výsledků je vedena velmi zevrubně a autor při ní kriticky konfrontuje vyvozené závěry s poznatky a řešeními publikovanými v četných odkazech na prostudovanou literaturu i vlastní publikace (celkem 75 citací). Formulace autora i jsou jazykově i odborně na vysoké úrovni a svědčí o jeho vědecké vyzrálosti. Po formální stránce je celá disertace vzorně vypracována s minimálními chybami. To se týká i všech zobrazení, u nichž jsou dostatečně srozumitelné popisy i další vysvětlení v textu. Práce je logicky a přehledně členěna. Popis a výsledky experimentů, uváděné ve 4. Kapitole jsou sice zakončeny konstatováním, že nepřinesly předpokládané výsledky, ale zařazení této kapitoly

považuji za účelné, neboť dokládá složitost řešené problematiky a úsilí autora nalézt vhodnou metodiku řešení.

e) Vyjádření k publikacím doktoranda

V příloze posuzované disertace uvádí Ing. Měšťánek přehledný seznam všech dosud publikovaných i nepublikovaných prací, jejichž byl autorem resp. spoluautorem. Jsou zde odkazy na celkem 22 publikací, z toho 5 článků v zahraničních odborných časopisech (2 zatím v tisku), ale u citace [20] není zcela zřejmé, zda jde o časopis nebo sborník z konference. Dále je zde uváděno 16 příspěvků ve sbornících domácích a zahraničních konferencí, z toho 10 plných textů a 6 abstraktů. Seznam doplňuje jedna neopublikovaná zpráva a soupis 13 autorových vystoupení na vědeckých setkáních. Za určitý nedostatek považuji, že u konferencí není uváděno místo ani datum konání, takže by bylo možné je vyhledat pouze podle čísla ISBN. U žádné z publikací není uveden impaktní faktor ani zda konference byla zařazena do některé z databází (např. SCOPUS). Domnívám se, že publikační činnost doktoranda je postačující, a že množství hodnotných výsledků uváděných v jeho disertační práci si rozhodně zaslouží další publikování v renomovaných časopisech.

f) Doporučení disertační práce k obhajobě

Disertační práci Ing. Petra Měšťánka jsem důkladně prostudoval a lze říci, že přináší celou řadu jak originálních experimentálních výsledků, tak komplexní návrh prakticky využitelného výpočtového modelu pro predikci vývoje počátečních stadií poškození dlouhovláknových kompozitů, ale také řadu podnětů pro další výzkum v oblasti jejich porušování. Závěrem tedy mohu konstatovat, že splňuje kritéria kladená na disertační práce a jednoznačně ji doporučuji k obhajobě.

V Praze, 19.11.2014

Ing. Zdeněk Převorovský, CSc.