



OPONENTNÍ POSUDEK

disertační práce

Ing. Lukáše Beka

POKROČILÉ SPOJE KOMPOZITNÍCH KOMPONENT

V Praze dne 27. 5. 2019

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

Úvod

K posouzení byla předložena disertační práce Ing. Lukáše Beka, vypracovaná v rámci doktorského studia na Fakultě aplikovaných věd Západočeské univerzity v Plzni. Práce je zaměřena na jeden typ spojovacích postupů a to na spojení kompozitových dílů pomocí tzv. trhacího nýtu. Práce je poměrně rozsáhlá, obsahuje 146 stran textu, s přílohami potom celkem 180 stran.

Úroveň rozboru současného stavu v disertační práci řešené problematiky

Po krátkém velmi obecném úvodu o aplikaci kompozitů autor vymezuje cíle své disertace. Poté se věnuje popisu současného stavu problematiky. Zaměřuje se nejprve na spoje, zejména lepené a spoje s pomocnými spojovacími elementy. Ačkoli je z komentáře a uváděných citací v této kapitole zřejmé, že autor prošel řadu článků a dalších zdrojů, nepodává kapitola ucelený přehled o „pokročilých metodách spojování“, jak je téma práce nazváno. Nevyplývá z ní, jaké problémy jsou v této otázce dosud nedostatečně nevyřešeny a jak z nich autor vyvodil cíle své práce, resp. proč se zaměřil na a trhací nýty, statistické hodnocení a metody pevnosti. Preferoval bych řazení rešerše s formulovaným dílčím zhodnocením stavu problematiky před vlastní vymezení disertabilních cílů.

Dosažení v disertaci stanovených cílů

Hlavní cíle disertační práce byly vymezeny zhruba následovně:

1. Vyšetřit materiálové parametry ze statistického hlediska
2. Implementovat materiálový model uvažující rozptyl materiálových vlastností
3. Vytvořit a validovat numerický model pro popis chování nýtových spojů.
4. Navrhnout metodiku pro modelování nýtového spoje

Těžiště disertability práce spatřuji zejména v druhém až čtvrtém bodě práce. V rámci prvního bodu bylo realizováno množství měření statické tahové a tlakové pevnosti jednosměrných laminátů a desek s kvazi-izotropní skladbou, z nichž byly určeny elastické materiálové parametry výpočtových modelů. Měření poskytla také důležitá data pro hodnocení rozptylů materiálových charakteristik. V rámci druhého cíle autor navrhl vývojový diagram a realizoval numerický postup pro výpočet postupného porušování kompozitové skladby a to v několika variantách kombinací korigovaného a nekorigovaného Puckova kritéria a uvažování, případně neuvažování delaminace. Unikla mi podstata zohlednění statistického rozdělení materiálových vlastností, mohl by autor doplnit, viz dotaz v závěru posudku. V rámci třetího cíle autor vytvořil 3D a zjednodušený 1D model nýtového spoje validovaný na měřenou tuhost. Jednoduchý model se snažil aplikovat na výpočtu složitější nýtované konfigurace (se třemi nýty ve dvou řadách). Tento případ se mi nezdá vhodný, neboť v praxi se obvykle volí symetrická řešení z důvodů „odstupňovaného“ přenosu tahové síly do vzorku přes vyváženě namáhané nýtové řady. V rámci čtvrtého cíle bych očekával zařazení kapitoly podobného názvu (Návrh metodiky) a tak např. schéma, stručný popis a shrnutí metodiky postrádám.

Zhodnocení významu disertační práce pro obor -Teoretický přínos disertační práce

Autor akcentuje teoretický přínos práce ve tvorbě materiálového modelu uvažujícího statistiku vstupních materiálových dat. I z mého hlediska je tento aspekt velmi důležitý a to i pro praktické uplatnění. Obvykle jsou se simulací rozptylů vlastností materiálu spojeny metody např. náhodného výběru (generování) vstupních veličin v rámci zjištěných rozdělení a jejich variačních součinitelů. V práci jsem nenašel explicitní popis metody, a jak byl autorem zmíněný přístup uvažování rozptylu mechanických vlastností kompozitu implementován v programovaných subrutinách materiálového modelu. Lze toto při obhajobě upřesnit?

Praktický přínos disertační práce

Problémy, se kterými se každý experimentátor setkává už při vyhodnocování výsledků zkoušek vzorků, vyráběných danou technologií z vláknových kompozitů, ukazují, že pouhá aplikace zkoušky dle norem kolikrát nestačí a že určování i základních mechanických parametrů kompozitu může být problematické. Z tohoto pohledu je každý takto důsledně zpracovaný, dokumentovaný a vyhodnocený experiment výborným materiálem pro získávání dat i zkušeností. Stejně tak lze hodnotit výsledky realizovaných predikcí dle navržených materiálových modelů, které při porovnání s experimentálními daty dávají cennou zkušenost „možné věrohodnosti výpočtového predikování“, např. pokud by nebyl experiment prováděn.

Vhodnost použitých metod řešení a způsob, jak byly použité metody aplikovány

Autor zvolil adekvátní metody pro experimentální i výpočtovou část své práce. Ve výpočtových simulacích se zaměřil zejména na Puckovo kritérium, které je schopno zohlednit prostorovou napjatost „buňky“ laminy kompozitu její různé módy porušení. Pro laminát je potom doplněnou hodnocením inter-laminární pevnosti (delaminací). Přispěl k posunutí aplikace kritéria i pro oblast postupného porušování vrstveného kompozitu.

Pro vyhodnocení experimentů použil běžný i „silnějších“ nástrojů statistiky a testování hypotéz, viz kap. 4. Práce má silnější stránky v analýzách problému, oproti syntéze z výsledků a získaných poznatků, což se ukazuje v málo komentovaném závěru práce. Ten je spíše shrnutím obsahu, než diskusí řešených problémů s vyvozením závěrů a cílů pro další výzkum.

Formální úroveň práce

Formální úroveň práce hodnotím jako velmi dobrou. Pisatel užívá srozumitelný technický jazyk bez významových i stylistických nepřesností. Definuje a vysvětluje všechny potřebné pojmy a veličiny. V práci jsem nelezl nadbytek překlepů a obecně nese známky pečlivosti. Tabulky, grafy i obrázky jsou čitelné a vypovídající, v textu komentované.

Za významný formální nedostatek však považuji absenci citací vlastních prací autora v textu disertační práce. Ze soupisu celkem 21 prací autora, uvedených v závěru DP vyplývá, že řada z nich úzce souvisí s tématem disertace. Protože autor má prokázat, že výsledky disertace byly publikovány, je uvádění odkazů v příslušných kapitolách práce velmi žádoucí.

Konkrétní dotazy a připomínky pro zodpovězení na obhajobě práce

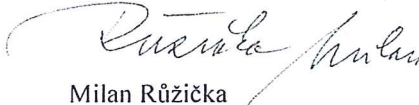
1. Jaká byl hlavní motiv a proč si autor zvolil z uváděných typů spojování právě typ spoje „trhací nýt“?
2. Mohl by autor stručně shrnout podstatu a popsat kroky postupu, jak zohlednil rozptyl vstupních materiálových dat ve výpočtovém materiálovém modelu?
3. Může autor specifikovat, jakým způsobem využil stávající komerční nebo předchůdci vytvořené modely, (např. materiálovou subrutinu UMAT) a jak je oproti předchozím verzím modifikoval, se zaměřením na programování Puckova kritéria a jeho verze s postupnou degradací tuhosti?
4. Mohl by autor uvést „vývojové schéma“ a popsat hlavní kroky avizované metodiky „pro idealizaci lokálního (detailního) modelu nýtového spoje v modelu globálním“, jak vytyčil v cíli č. 4 práce?
5. V rov. (4.41) je zmíněn „materiál variability factor“ – MVF. Lze nalézt, jakých limitních hodnot by neměl dosáhnout a jak volit parametr k ? Proč se zdá autorovi výhodnější jeho zavedení a použití, oproti porovnávání běžných variačních koeficientů, jak bývá běžně zvykem?
6. Může disertant doplnit, ve kterých publikacích zveřejnil hlavní výsledky své práce?

Závěrečné hodnocení

V disertační práci doktorand Ing. Lukáš Bek prokázal velmi dobrou orientaci v problematice zkoušení a výpočtového modelování kompozitních materiálů. Disertant vykonal značné množství experimentálních měření a výpočtových simulací směřujících k naplnění vytčených cílů. Autor v práci prokázal schopnosti samostatné vědecké práce a systematického výzkumu a hodnocení získaných výsledků.

I přes položené dotazy a vznesené připomínky usuzuji, že cíle práce byly naplněny. Konstatuji, že předložená disertační splňuje kritéria, jak je vymezuje zákon č. 111/1998 Sb. paragraf 47 odst. 4, tj. že obsahuje původní výsledky. Předpokládám, že v průběhu obhajoby budu moci konstatovat, že naplňuje i podmínku, že obsahuje výsledky, které byly uveřejněné nebo přijaté k uveřejnění.

Doporučuji práci k obhajobě.


Milan Růžička

OPONENTNÍ POSUDEK DISERTAČNÍ PRÁCE

Doktorand: Ing. Lukáš Bek

Školitel: prof. Ing. Vladislav Laš, CSc.

Konzultant specialista: Ing. Radek Kottner, Ph.D.

Oponent: Ing. Bohuslav Cabrnach, Ph.D.

Téma: Pokročilé spoje kompozitních komponent

Doktorand předložil k oponování vlastní disertační práci v rozsahu 146 stran textu včetně literárních odkazů a soupisu 21 vlastních publikací.

Předložená práce je rozdělena do šesti částí. Úvodní kapitola obsahuje stručný přehled současného stavu řešení spojování kompozitních konstrukcí lepenými a mechanickými spoji. U mechanických spojů jsou uvedeny téměř všechny stěžejní parametry ovlivňující jejich mechanické vlastnosti jako je typ spoje, vliv tolerance uložení dřívku spojovacího elementu v otvoru i kvalita obrobení otvoru z hlediska drsnosti a povrchových vad. Co mi zde chybí je bližší rozbor vlivu skladby laminátu na typ porušení spoje, kde autor pouze konstatuje, že dominantně používají lamináty s kvaziizotropní skladbou a vliv předpětí spojovacího prvku na únosnost spoje (mez pevnosti v otlacení). Dále je zde uveden výčet a porovnání v současné době nepoužívanějších pevnostních kritérií a modelů postupného poškozování pro kompozitní materiály. Kapitola je ukončena komplexním shrnutím získaných poznatků.

Druhá kapitola se zabývá popisem současného stavu řešení problematiky v oblasti simulace chování a postupného porušování kompozitních materiálů. Kapitola dále obsahuje stručný popis v současné době nepoužívanějších pevnostních kritérií pro kompozitní materiály. Zde navazuje třetí kapitola s detailním popisem Puckova kritéria včetně korekcí vlivu napětí ve směru vláken na mezi vláknové porušení a na nelomových rovinách.

Čtvrtá kapitola popisuje postupy statistického vyhodnocování experimentálních měření materiálových parametrů. Dle mého názoru tato kapitola obsahuje všeobecně známé postupy běžně používané v leteckém a kosmickém průmyslu a zbytečně zvětšuje rozsah disertační práce.

V páté kapitole, která je dle mého názoru těžištěm celé práce, autor popisuje implementaci jím navrženého modelu postupného porušování založeným na Puckově kritériu s uvážením náhodného rozložení materiálových parametrů do komerčního softwaru Simulia Abaqus. Součástí kapitoly je i popis experimentálních měření materiálových vlastností jedné vrstvy, včetně výroby zkušebních těles. Dále je zde uvedeno statistické vyhodnocení výsledků měření. Následuje experimentální verifikace navrženého modelu postupného porušování na tahové zkoušce laminátu s kvaziizotropní skladbou. Naměřená a simulovaná tahová křivka vykazuje velice dobrou shodu. Z hlediska validace modelu postupného porušování bych uvítal ověření modelu na více skladbách laminátu a porovnání rozložení simulovaných poškození laminátu se zkoušenými vzorky pomocí některé z metod NDT.

Poslední kapitola se věnuje jednostřížným nýtovým spojům kompozitních dílů. Zde jsou velice detailně analyzovány rozhodující faktory pro tuhost a únosnost nýtového spoje, včetně určení součinitele tření mezi spojovanými součástmi, simulace nýtovacího procesu, vlivu tolerance uložení dřívku spojovacího elementu v otvoru a vlivu počtu nýtů ve spoji. Tato kapitola nepřináší v dané problematice nic nového. Detailní simulace chování nýtových spojů nedosahují potřebné shody s experimentálním měřením z hlediska tuhosti spoje. Simulovaný rozsah poškození kompozitních částí nebyl bohužel porovnán s poškozením zjištěným NDT. Autor si v této oblasti vytyčil nereálný cíl, který při daných možnostech není dosažitelný. Pro praktické použití simulace mechanických spojů jsou plně postačující přístupy využívající 1D prvků ve spojení s experimentálně zjištěnou smykovou tuhostí mechanických spojů, k čemuž nakonec došel i autor.

Význam disertační práce pro obor

Disertační práce se věnuje aktuálnímu tématu, a sice analýze chování mechanických spojů kompozitních dílů. Aktuálnost vyplývá především z rozšiřujícího se použití kompozitních materiálů v nosných částech strojních konstrukcí, což vyžaduje neustálé rozšiřování znalostí o jejich vlastnostech a chování.

Teoretický přínos práce vidím v návrhu a verifikaci modelu postupného porušování založeným na Puckově kritériu s uvážením náhodného rozložení materiálových parametrů. Výsledky práce jsou dále přímo aplikovatelné při návrhu kompozitních dílů.

Vhodnost použitých metod řešení a způsobu jejich aplikace

K řešení problematiky autor přistoupil systematicky a komplexně. Při zkoumání chování mechanických spojů kompozitních dílů autor postupoval od určení jejich základních mechanických vlastností k ověření navrženého modelu postupného porušování. Následovalo porovnání numerických výpočtů nýtových spojů s experimentálními výsledky a jejich vyhodnocení.

K ověření chování kompozitů a jejich spojů použil autor kombinaci experimentálních měření a teoretických analýz. V obou případech se jednalo o aplikaci posledních poznatků v dané oblasti.

Cíle práce a jejich naplnění

Cíle práce jsou formulovány v úvodu práce. Dílčí cíle disertační práce jsou následující:

- 1) *Vyšetřit materiálové parametry ze statistického hlediska.*

Dílčí cíl splněn v kapitole 5.3.

- 2) *Do vlastního materiálového modelu uvažujícího postupné porušování implementovat model uvažující rozptyl materiálových parametrů v rámci kompozitního dílu.*

Dílčí cíl splněn v kapitole 5.1.

- 3) *Vytvořit a validovat numerický model popisující chování nýtových spojů a tento model využít k vyšetření vlivu tolerancí mezi dírami a nýty na chování a únosnost spoje.*

Dílčí cíl splněn v kapitole 6.

- 4) *Navrhnout metodiku pro idealizaci lokálního (detailního) modelu nýtového spoje v modelu globálním.*

Dílčí cíl splněn v kapitole 6.

Jak vyplývá z výše uvedeného hodnocení, všechny cíle disertační práce byly splněny a významné části byly publikovány.

Formální úroveň práce

Formální stránka práce je přijatelná a odpovídající. Drobné překlepy jsou výjimkou. Práce obsahuje několik nepřesných formulací a v několika případech nesprávné názvosloví. Jinak se autor se v práci nedopustil vážnějších chyb.

Připomínky a dotazy

K práci bych měl následující připomínky a dotazy:

1. *Pro toleranci uložení kolíku (dříku) v otvoru autor používá nepřesný výraz „tolerance mezi kolíkem a dírou“.*
2. *Pro simulaci delaminace laminátu autor použil degradaci matice tuhosti mezivrstvy pryskyřice. Porovnával toto řešení s použitím kohezních prvků?*
3. *Jak autor zjišťoval vstupní parametry do numerických simulací? Zohledňoval i vliv objemového podílu výztuže, tj. normalizoval mechanické vlastnosti na jednotný objemový podíl výztuže?*
4. *V popisu experimentu použil autor termín „silová buňka“, což je nestandardní výraz pro siloměr.*
5. *Spojovací prvky Hi-Lock nejsou nýty ale svorníky.*
6. *VAP technologie byla vyvinuta jako bez autoklávová technologie. Z uvedeného popisu výrobního procesu vzorků není zřejmé, jak byl ve výrobním procesu autokláv použit. Mohl by to autor vysvětlit?*
7. *Autor v práci uvádí, že byl u vzorků měřen objemový podíl výztuže, ovšem bez specifikace použité metody. Mohl by ji upřesnit?*
8. *Optické měření porozity v jednom řezu desky není objektivní, protože nic neříká o rozložení porozity v celé desce. Obvykle se kombinuje ultrazvuková kontrola desky s měřením porozity v alespoň třech místech desky.*
9. *Uvedený způsob měření modulu pružnosti v tlaku je nestandardní a velice nespolehlivý. Měření vzájemného posuvu čelistí extenzometrem je zकresleno prokluzem vzorku v čelistech, jak je patrné i z naměřených hodnot a závislostí.*
10. *Použití parametru MVF (Material Variability Factor) pro posouzení rozptylu měřených veličin je nestandardní. Obvykle se používá pouze variační koeficient. Proč ho autor použil?*
11. *Proč autor vyhodnocoval B-hodnoty, když v modelu používá pouze průměrné hodnoty?*
12. *Uvedené shrnutí kapitol a závěr obsahují pouhé konstatování co bylo provedeno bez jakéhokoliv zobecnění a vyvozených závěrů. Obecně zde chybí vlastní názor autora.*

Závěrečné hodnocení

Předložená práce prokázala výborné teoretické i praktické znalosti doktoranda v dané oblasti a jeho schopnost samostatné vědecké práce. Kladně hodnotím validaci numerických simulací experimenty a výrobu zkušebních vzorků autorem.

Na základě výše uvedeného **doporučuji** práci k obhajobě.

V Praze dne 30.5. 2019.



Ing. Bohuslav Cabrnok, Ph.D.
Výzkumný a zkušební letecký ústav, a.s.

