

Posudek disertační práce:

Návrh metodiky pro predikci poklesu tuhosti únavově zatěžovaných kompozitních konstrukcí

Autor: Ing. Michal Král
Studijní obor: Mechanika tuhých a poddajných těles a prostředí
Školitel: prof. Ing. Stanislav Holý, CSc.
Školitel - specialista: Ing. Bohuslav Cabrnock, Ph.D.

Souhrn

Předložená disertační práce má rozsah 156 stran včetně příloh a je přehledně rozčleněna do 8 hlavních kapitol. Přehled odkazované literatury, odborných technických zpráv a vlastních publikací autora je poměrně široký, autor průběžně z textu odkazuje na použité informační zdroje.

Téma disertační práce de facto vychází z problematiky řešené na pracovišti autora, které je odborně zaměřeno, mimo jiné, na lopatkové stroje, jakými jsou letecké vrtule, axiální ventilátory, případně větrné turbíny a podobná zařízení. Tato souvislost, byť v práci jen okrajově zmíněná, je důležitá pro další obsah práce. Vyplývá z ní zaměření na poměrně omezený okruh materiálů, které jsou v konstrukci kompozitních lopatek těchto strojů používány. Ačkoliv sám autor u některých průběžných výsledků vznáší otázku, zda nejsou zjištěné závislosti specifické pouze pro uvažovanou skupinu materiálů, je třeba ocenit, že se nenechal svést k rozptýlení pozornosti na další materiály a s nimi související nově otevřené otázky. Důsledné sledování vytyčené linie naopak vede k tomu, že dosažené výsledky se jeví jako využitelné v praxi a jsou podloženy zajímavým porovnáním teoretických výpočtů s daty z experimentu.

V úvodní části práce je uveden obsáhlý popis studované problematiky změn mechanických vlastností kompozitních materiálů v závislosti na cyklickém namáhání. Zcela správně je zde zdůrazněna skutečnost, že sice je možno nalézt v literatuře zdroje pojednávající o závislostech zjištěných na idealizovaných vzorcích, ale aplikace příslušných materiálových modelů na reálných konstrukcích publikovány nejsou. Obecně za nejcennější informační zdroje jsou považovány takové, které obsahují nejen popis teoretických modelů, ale i způsoby zajištění vstupních dat pro výpočty a následné porovnání výpočtů s dosaženými výsledky při zkouškách konstrukcí s obecnou geometrií a skladbou laminovaného kompozitu. Takové informační zdroje ovšem schází, a pokud odpovídající data existují, jsou zcela jistě považována za důvěrná, zajišťující výhodu vlastníka na trhu před konkurencí.

Práce tedy přispívá k zaplnění významné mezery v dostupných publikacích a je zajímavá i z pohledu orientace na zvládnutí problému s využitím relativně běžných, respektive běžně proveditelných inženýrských postupů. Autor si klade za cíl navržení v praxi využitelné metodiky pro predikci poklesu tuhosti únavově zatěžovaných kompozitních konstrukcí a stanovení odpovídajících postupů pro zajištění vstupních dat. Musí jít tedy o metodiku a postupy založené na v praxi běžně dostupném vybavení výpočetní technikou a zkušeben. V tomto ohledu je práce konzistentní a použitý

materiálový model není v rozporu s možnostmi jeho implementace do programu pro výpočet metodou konečných prvků a potřebná vstupní data lze získat v celku běžnými materiálovými zkouškami.

Toto vymezení ovšem a priori vede k systematickým chybám, se kterými je třeba počítat a které se nakonec v práci nutně musí projevit a také projevují při porovnávání výsledků výpočtů a zkoušek. Použití lineárního rozšířeného Hookova zákona v úpravě pro ortotropní vrstvu přesně neodpovídá vlastnostem vláknových kompozitů, zejména při namáhání smykem. Programy pro výpočet metodou konečných prvků obvykle vychází z klasické teorie laminátu, která rovněž přináší určitá zjednodušení a dále platí, že polymerní matrice vykazují jiné vlastnosti v malých a velkých objemech.

Při uvážení těchto souvislostí se mi jeví v práci dosažené výsledky při simulaci únavového poškození jako velmi dobré a navržený model „VZLU FDC Model“, který vychází úpravou z modelu „Liu-Lessard“, považuji za velmi nadějný.

Data z měření materiálových charakteristik autor podrobil zkoumání z pohledu jejich statistické kvality. Tedy vzal v úvahu i možné chyby plynoucí z malého počtu měřených vzorků a z přesnosti samotného měření. Takový přístup svědčí o odpovědném pohledu na data vstupující do výpočtů. V praxi je skutečně důležité nepodceňovat význam posouzení vstupních hodnot pro výpočet pocházejících z měření. Náhodné vlivy, které uniknou pozornosti, mohou negativně ovlivnit kvalitu hodnocení výsledků práce ve smyslu tvorby závěrů, které se neopírají o objektivně zjištěné skutečnosti. V tomto smyslu tedy považuji postup autora za promyšlený a systematický.

Součástí předložené disertační práce jsou přílohy s naměřenými daty a fotodokumentací zkušebních těles, je přiložen i programový skript vytvořený za účelem ověření navržené metodiky výpočty a srovnáním s výsledky experimentu.

Dosažení v disertaci stanovených cílů

Autor si zvolil za hlavní cíl práce „*Navrhnout metodiku pro predikci poklesu tuhosti únavově zatěžovaných konstrukcí vyrobených z kompozitních materiálů*“. Cíl považuji za splněný v tom smyslu, že byl navržen vhodný materiálový model pro predikci změn tuhosti v závislosti na počtu zátěžových cyklů. K tomuto modelu je možno vcelku běžnými postupy naměřit potřebné charakteristiky a následně předpovídat vývoj tuhosti pro různé hladiny cyklického namáhání. Metodika není omezena na konkrétní skladbu laminovaného kompozitu. Lze očekávat, že po získání praktické zkušenosti z různých aplikací bude možno jednak stanovit potřebné korekce na její výsledky ve vztahu k reálně dosahovaným vlastnostem konstrukcí, ale i dále model upravovat pro dosažení větší shody teoretických výpočtů s experimentem u obecných laminátů s kvazi-izotropními vlastnostmi a případně hybridní výztuží.

Byly navrženy a ověřeny postupy pro získání vstupních dat k příslušnému materiálovému modelu a autor provedl jeho implementaci do programu pro metodu konečných prvků. Vzhledem k tomu, že byly zjištěny neočekávané vlastnosti použitého kompozitu, ve smyslu nárůstu tuhosti místo poklesu při určitých způsobech namáhání vzorků, proběhlo jen částečné ověření modelu výpočty. I tak se ale domnívám, že byly splněny všechny dílčí cíle práce, protože jde de facto o zjištění nových závislostí, které vyžadují navazující samostatné prozkoumání a zvážení jejich významu.

Dle mého názoru byly cíle disertační práce dosaženy.

Úroveň rozboru současného stavu v disertaci řešené problematiky

Autor provedl důkladný rozbor dostupných informačních zdrojů a práce obsahuje bohatý seznam použité literatury. K této části práce nemám žádné výhrady a její rozsah považuji za přiměřený potřebám.

Je vhodné vyzvednout skutečnost, že řada publikací na téma únavového poškození vláknových kompozitů pracuje s idealizovanými materiálovými vzorky a prakticky schází dostupné publikace, které by porovnávaly teoretické výsledky různých modelů s výsledky únavových zkoušek na díle s reálnou geometrií a skladbou laminátu. Je ovšem bohužel také pravdou, že rozmanitost kompozitních materiálů a z nich vyráběných konstrukcí je taková, že přenos zkušeností, dat a modelů platných pro jednoduché materiálové vzorky na reálné konstrukce v provozních podmínkách je obtížným problémem, který se musí často řešit individuálně pro každou typickou aplikaci. Aplikace se pak váží na konkrétní výrobky a s tím související ochranu komerčních zájmů výrobců, vlastníků dat. Zřejmě i z tohoto důvodu nejsou publikace na dané téma časté.

Teoretický přínos disertační práce

Disertační práce zajímavým způsobem shrnuje dostupné informační zdroje a porovnává různé přístupy k řešené problematice. Součástí je široký přehled publikací, které se k tématu váží. Je tedy zajímavá již z tohoto úhlu pohledu.

Autor zhodnotil dostupné materiálové modely a vybral pro další práci takový, který nejlépe odpovídá jeho potřebám. Model ověřil, zjistil významné nedostatky a navrhl jeho úpravu tak, aby dosáhl požadovaných vlastností. Své kroky průběžně zdůvodňuje a podkládá daty z provedených měření.

Práce byla tedy prováděna systematicky, jednotlivé kroky považuji za promyšlené a díky propojení teoretických prací s odpovídajícími měřeními jsou dle mého názoru dosažené výsledky věrohodné.

V práci jsou obsažena naměřená data, která sama o sobě představují cenný informační zdroj a lze je dále využít jak pro další práci na materiálovém modelu, tak i k praktickému využití na konkrétní aplikaci.

S ohledem na vytyčený hlavní cíl považuji obě části práce, teoretickou i experimentální, za vzájemně vyvážené. Rozsah teoretického řešení je přiměřený použitému programovému vybavení a výpočetní technice.

Předložená práce odpovídá technickým možnostem pracoviště, které měl autor k dispozici a na něm řešené problematice tenkostěnných kompozitních konstrukcí.

Praktický přínos disertační práce

Praktický přínos disertační práce spatřuji zejména v zaměření na využitelnost navržené metodiky za použití běžných inženýrských přístupů, které je možno realizovat i v podmínkách průmyslového vývoje u malého a středního podniku. K některým úlohám je zřejmě zapotřebí využít specializovaných pracovišť pro měření materiálových charakteristik, nicméně to je obvyklé i v případě vývoje výrobků využívajících tradiční kovové konstrukční materiály.

V praxi pak lze předpokládat vznik databáze materiálových charakteristik a zkušeností, které zredukovat potřebu dalších doplňkových měření zejména v případě, že jsou využívány jen určité, pro danou aplikaci typické, materiálové skupiny.

Praktická využitelnost je podpořena i uvedením kompletního výpisu programového skriptu, který může být dále využit, nebo posloužit jako vzor pro další rozvoj metodiky.

Pro praktické využití zcela jistě mohou posloužit i soubory naměřených dat, která jsou uvedena jak v surové podobě, tak i v podobě statisticky vyhodnocených charakteristik. Naměřené závislosti vývoje tuhosti laminy pro různé počty cyklů a úrovně cyklické složky namáhání poskytují důležitou informaci o změnách vlastností materiálu a zároveň je zde přítomna informace o původně zcela neočekávaném růstu tuhosti matrice při cyklickém mechanickém namáhání.

V praxi bývá často kritickým místem výrobku oblast konstrukčního spoje, v řadě případů například spoje laminovaného kompozitu s kovovými díly. Jde o oblast se skokovou změnou tuhosti a tedy i o místo koncentrace napětí a možné kritické poruchy. Změna tuhosti laminátu v okolí spoje může mít své důsledky pro jeho životnost a v případě nárůstu tuhosti matrice může vést k neočekávaně rychlému nárůstu poškození mezi dvěma prohlídkami.

Předložená práce je tedy cenná i proto, že na fenomén růstu tuhosti matrice upozorňuje.

Dle mého názoru je přínos disertační práce pro praxi značný, přispívá jak k hlubšímu porozumění řešené problematice, tak i poskytuje využitelný materiálový model a naměřená data.

Vhodnost použitých metod řešení

Použité metody řešení odpovídají možnostem pracoviště autora, jsou v souladu s aplikační oblastí, ve které autor působí a odpovídají i povaze skupiny kompozitních materiálů, která je v práci brána v úvahu. Kombinace výpočtů metodou konečných prvků s experimentálními postupy je zcela na úrovni doby a poskytuje důležitou zpětnou vazbu mezi teoretickým modelem a reálnými vlastnostmi materiálu.

Použité metody řešení považuji za vhodné a přiměřené tématu disertační práce.

Způsob, jak byly použité metody aplikovány

Použité metody byly aplikovány v souladu s tématem i technickými podmínkami, které měl autor práce k dispozici. Teoretický model byl zvolen a dále rozvinut do prakticky využitelné podoby. Vůči způsobu zpracování a vyhodnocení výsledků zkoušek a měření autorem nemám výhrady. Obdobně v případě výpočtů nemám připomínky k použitým postupům.

V práci je přiměřeně kombinován inženýrský přístup s moderními metodami analýzy.

Zda doktorand prokázal odpovídající znalosti v daném oboru

Autor prokázal dobré znalosti různých přístupů a odpovídajících teoretických modelů vázících se k problematice změny tuhosti cyklicky namáhané kompozitní konstrukce. Tyto znalosti vhodným způsobem využil k výběru postupů jak v teoretické, tak v experimentální části práce. Přiměřeně kombinuje metody inženýrského přístupu s teoretickými postupy a metodami výpočtů a dbá na zajištění zpětné vazby mezi teoretickými výsledky a výsledky zkoušek.

Dle mého názoru prokázal autor odpovídající znalosti v daném oboru na úrovni potřebné pro zpracování disertační práce.

Formální úroveň práce

Předložená disertační práce má úroveň dobře zpracované technické zprávy s logickým členěním do celkem 8 kapitol. Rozsah i obsah je přiměřený zpracovávanému tématu, součástí jsou přílohy s naměřenými daty a programový skript.

Celkově má předložená práce potřebnou formální úroveň, je přehledná a obsahuje veškeré informace nutné k posouzení dosažených cílů.

Doporučení k obhajobě

Předloženou disertační práci Ing. Michala Krále doporučuji k obhajobě.

Oponent:

.....

Ing. Vilém Pompe, Ph.D.

Topasová 645/46

Praha 512 - Radotín

153 00