



OPONENTNÍ POSUDEK

práce

Ing. Jana Krystka

PORUŠOVÁNÍ KOMPOZITNÍCH KOMPONENT PŘI RŮZNÝCH TYPECH ZATĚŽOVÁNÍ

V Praze dne 22. 5. 2013

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

1. Úvod

K posouzení byla předložena disertační práce Ing. Jana Krystka, vypracovaná na Fakultě aplikovaných věd ZČU v Plzni. Ačkoli práce nese výše uvedený název, zaměřuje se na komponenty ovíjených a neovíjených čepových a kolíkových spojů. Práce obsahuje 134 stran textu a tabulkovou přílohu. Je rozdělena do dvanácti kapitol.

2. Aktuálnost tématu a komentář cílů habilitační práce

Cíl předkládané disertační práce je zmíněn v anotaci práce a podrobnější rozvedení je potom v úvodní kapitole. Hlavním cílem práce je: „vytvořit metodiku pro návrh kompozitních prvků kolíkových spojů se zaměřením na jejich únosnost“. Autor dále úkoly rozvádí v dílčích úkolech, zaměřených jednak na tvorbu a verifikaci materiálového modelu s uvážením nelinearit ve smykové charakteristice materiálu a na experimentální vyšetření a analýzu chování kompozitu při dvouosém zatížení kombinace tahu s příčným tlakem. Tyto cíle hodnotím jako adekvátní a potřebné jak pro objasnění teorie spojené s porušováním kompozitních ok, tak pro potřeby praxe.

Protože spoje kompozit-kov patří mezi kritická místa strojírenských konstrukcí, asi nebude třeba připomínat, že se jedná stále o potřebný a aktuální výzkum, byť lze toto téma nalézt v literatuře již od stavby prvních kompozitních konstrukcí. Autor mapuje tuto literaturu v kap. 2, kde cituje řadu zdrojů pro neovíjené i ovíjené spoje. V oblasti ovíjených spojů hodlá navázat na práce ČVUT a ZČU (cituje práce Blahouše [31] a Kottnera [68]), které byly prováděny v uplynulých letech. Komentuje při této příležitosti nedostatky, které shledal u těchto publikovaných teorií.

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

Disertant nejprve uvádí teoretické kapitoly, kde rozebírá v literatuře publikované módy porušování a pevnostní kritéria (kap. 3 a kap. 4). Zabývá se podrobněji zejména kritériem LaRC04 a jeho šesti módy porušení. V kap. 5 popisuje způsob určování pevnostních parametrů pro kritéria pevnosti. Čerpá z literárních zdrojů, zejména standardů ASTM. V experimentální části práce (kap.6) se zabývá nejprve realizací základních typů zkoušek pro vzorky vyrobené z uhlíkového prepregu (HexPly 913C-HTS), dále výpočtem materiálových parametrů v normálových módech a identifikaci smykové pevnosti s použitím nelineárního modelu. Propojuje přitom optimalizační výpočty v systému OptiSlang s vlastním procedurou v Matlabu. V závěru kapitoly částečně představuje McCarthyho model postupného porušování, který implementoval později do MKP v proceduře UMAT programu ABAQUS. V této souvislosti položím dotaz: Je známá celá řada teorií postupné degradace tuhosti a porušení kompozitů. **Proč právě vybral autor tento model? Proč autor neuvádí tento vybraný model podrobněji, např. jeho mezní podmínky pro módy porušení vláken nebo matrice?** Postrádám také podrobnější výsledky verifikace metody na experimentálních vzorcích (autor pouze uvádí, že odchylka je nižší než 5 procent), neboť chybí i odkaz na literaturu, pokud tyto výsledky byly publikovány mimo disert. práci.

Kapitola 7 se zabývá experimentálním výzkumem a vyhodnocením způsobu porušování kompozitu při působení příčného tlaku. Jednak při prostém působení příčného tlaku na vláknový kompozit, a dále při v kombinaci s podélným tahovým namáháním vláken. Zkouší přitom různý tvar dosedacích ploch. Výsledky této kapitoly považuji za významné a je pro mě potěšující, že víceosé stavy napjatosti byly podrobněji zkoumány. I zde mám však pocit, že v práci jsou uvedeny pouze ukázky výsledků, bez podrobnější analýzy a popisu, případně odkazů na související publikaci nebo přílohu, viz např. chybějící diskuse souvislostí spektra zkoušených „tlačných elementů“ (obr. 7.3) a redukováného spektra deformačních křivek (obr. 7.6). Rád bych také diskutoval otázku „sběru dat“ odolnosti příčnému napětí pro vzorky vyrobené prepregovou technologií a její pozdější aplikaci na technologii navíjených ok z pramenců vláken. **Jsou data podle autora „bez komentáře“ přenositelná?**

V této kapitole dále autor zmiňuje numerické simulace v programu MSC Marc a implementaci různých kritérií poškození. Výpočtem indexu porušení hodnotí vhodnost použití daného kritéria. Bohužel není uveden způsob tohoto hodnocení ve vztahu k tabulce výsledků a vůči jednotlivým experimentálně určeným silám pro porušení. To navozuje dotaz: **„Jakým způsobem bylo provedeno hodnocení metody vůči experimentálním výsledkům?“** (patrně průměr sil pro sadu vzorků?).

Kap. 8 navazuje na předchozí zkoušky a uvádí výsledky určované na vzorcích při dvouosém zatěžování. Byl použit jeden z dříve definovaných a testovaných typů příčných tlačných elementů (obr. 7.3). **„Proč byl zvolen právě tento typ a jak tvar elementu ovlivňoval výsledky?“** Na experimenty navazuje numerická simulace a ověření kritérií porušení. Pro hodnocení specifického stavu dvojosé napjatosti, který nastává v kolíkových spojích, navazuje disertant na práce ing. Kottnera. Modifikuje kritérium LaRC04 ve třetím módu porušení, aby dosáhl uspokojivou shodu s výsledky zkoušek. Děje se tak použitím opravných koeficientů P_f a P_m . Přenos této úpravy ze zkoušek plochých vzorků na oka se však podle autora neukázal jako vyhovující, viz str. 76 odst. 1. Proto nakonec zvolil empirickou aproximaci funkcí \arcsinh . Přesto v závěru práce autor toto kritérium pro navíjené spoje doporučuje. **Jak by tento rozpor autor vysvětlil?**

V diskusi ke kapitole uvádí autor porovnání teoretických průběhů napětí při zkouškách vzorků jednoosou a dvojosou napjatostí versus na kolíkovém spoji (obr. 8.12). Diskutuje vliv nerovnoměrnosti napětí, což považuji za podstatný vliv. Chybí zde však širší pohled a diskuse „vlivu gradientu napětí resp. exponovaného objemu materiálu“. Tyto jevy jsou známy a popsány v literatuře, jak pro izotropní, tak anizotropní materiály a budou hlavním problémem posuzování reálných koncentrátorů v kompozitech. Ke kritizované teorii „kritické vzdálenosti“, kterou použil v disertaci ing. Blahouš [31], tak není postavena adekvátní odpověď jak tuto koncentraci hodnotit. **Má na tento vliv autor nějaký konkrétní náhled?**

Kap. 9 je věnována ověřeným kolíkovým spojům. V jejím úvodu není explicitně řečeno, zda popsání vzorky a jejich výsledky (150 vzorků) byly autorem vyrobeny a vyzkoušeny, nebo zda čerpá experimenty výhradně z dis. práce ing. Kotnera [68], (což se z kontextu domnívám). Původní jsou však numerické simulace, resp. analýza výsledků podle vlastní modifikace kritéria LaRC04#3. Prezentované grafy dokumentují uspokojivou shodu modifikace kritéria LaRC04#3 pro navíjená oka.

Neověřeným spojům, resp. zatíženým otvorům ve vrstvených laminátových deskách, je věnována kap. 10. Autor vychází ze známých čtyř módů porušení, která u takovýchto spojů nastávají a experimentálně je identifikuje. Využívá k tomu výhodně metodu digitální korelace obrazu, která umožňuje určení lokálních změn pole posuvů a usnadňuje identifikaci místa vzniku prvních trhlin. Oceňuji tuto experimentální část práce. Numerickými simulacemi ověřuje použitelnost kritéria dle Pucka, pro predikci vzniku prvotního porušení. **Nebylo v této souvislosti testováno také kritérium LaRC04 (bez korekce) a jaké by dávalo výsledky?** Autor navazuje analýzou postupného porušování s použitím dříve diskutovaného a identifikovaného nelineárního modelu materiálu s implementací mezního kritéria „Hashin“. Opakuji podobnou otázku, **proč nebylo v této souvislosti testováno také kritérium LaRC04 (bez korekce)**, resp. zobecněme otázku: **„Jaký závěr by si měl udělat výpočtář, pokud autor bez bližšího zdůvodnění používá různá kritéria pro různé případy dílů a způsobů zatížení?“**

Kap. 11 nese název „Metodika návrhu kolíkových spojů“. Autor v ní shrnuje poznatky předchozích kapitol a završuje návrh s uvedením důležitých doporučení pro konstruování, resp. volbu rozměrů spojů jak ověřených, tak neověřených. Zde bych uvítal přechod k bezrozměrným geometrickým parametrům (jejich obecná platnost) a vymezení doporučeného rozsahu těchto veličin pro „optimální“ volbu geometrie spoje. Prezentované závěry jsou ve shodě s poznatky diskutovanými u ověřených spojů v pracích [31], [68].

4. Vyjádření k formální úpravě práce a k její jazykové úrovni

Práce má výbornou grafickou úpravu a byla psána velmi pečlivě. Několik nalezených překlepů nebo nejasností nesnižuje její hodnotu. Zejména bych doporučil korigovat

- str. 55 3. odst. „mezi vlákny a maticí vzniká třetí. (tření?)“
- str. 60 obr. 7.6, chybí legenda a vysvětlení křivek (viz obr. 7.3)
- str. 63 obr. 7.10. Čím se mezi sebou liší dva obrázky pro stejné kritérium? – chybí popis, vysvětlení?
- str. 67 poslední odstavec: podané vysvětlení růstu a následného poklesu tahové únosnosti při růstu příčného tlaku považuji za nejasně formulované
- str. 71 a dále: popis MKP modelu a OP považuji za neúplné (kontaktní úloha, podmínky tření ??).

Tyto připomínky však nejsou zásadní z hlediska odborné úrovně práce.

5. Stanovisko k původnímu přínosu doktoranda a významu práce pro praxi a rozvoj vědního oboru

Disertant ve své práci nepochybně publikuje řadu původních výsledků experimentálních zkoušek i numerických analýz. Navrhl aplikovatelné kritérium porušení, vycházející z modifikace modelů užívaných pro klasické lamináty (LaRC). Pro konstruktérskou praxi zmapoval vlivy základních geometrických parametrů a navrhl metodiku pro návrh čepových (kolíkových) spojů. V práci jsou uváděny odkazy na vlastní publikace, což dokumentuje, že výsledky výzkumu byly průběžně publikovány. Autor uvádí 15 publikací s autorským podílem, na 10 publikacích je jako první autor. Publikace autora obsahují kromě konferenčních příspěvků na domácí i zahraniční půdě i tři časopisové publikace a splňují požadovaná kritéria.

6. Závěrečné hodnocení

Domnívám se, že předložená disertační práce ing. J. Kristka 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



Posudek disertační práce:

Porušování kompozitních komponent při různých typech zatěžování.

Autor: Ing. Jan Krystek
Obor: Aplikovaná mechanika
Školitel: Prof. Ing. Vladislav Laš, CSc.
Školitel specialista: Ing. Radek Kottner, Ph.D.

Souhrn

Předložená disertační práce má rozsah 143 stran textu včetně dvou příloh a je rozčleněna do 12 hlavních kapitol.

V úvodu autor připomíná důvody pro stále častější využívání kompozitů v moderních konstrukcích a s tím související problémy jejich spojování s kovovými prvky. Je třeba zdůraznit, ve shodě s autorem, že až teprve zvládnutí správné metodiky návrhu spojů a zavádění sil do kompozitů umožňuje plné využití potenciálu, který v sobě pro moderní konstrukce mají.

V další práci autor svou pozornost upírá směrem ke kolíkovým spojům, které dělí na ovíjené, tedy s kontinuálním vláknem, a neovíjené s otvorem pro kolík vyrobeným vrtáním přes vlákno výztuže. U obou typů spojů se zabývá použitím vhodných pevnostních kritérií, rozdílů mezi teoretickými výsledky a jejich vazbou na výsledky experimentu.

Součástí práce je poměrně rozsáhlý rozbor materiálových charakteristik a jejich souvislosti s použitými kritérii pevnosti kompozitu. Diskutován je rovněž vliv nelineárního chování materiálu při zatížení smykem.

Cílem, který si autor klade, je zpracování metodiky návrhu kolíkových spojů kompozitu se zaměřením na jejich únosnost. Autor se ve své práci neomezuje jen na teorii, ale vhodně kombinuje výpočtové metody, včetně simulací v metodě konečných prvků, s dostupnými výsledky zkoušek vzorků.

Součástí práce je poměrně široký seznam použité literatury a vlastních publikací autora. Uvedené tituly souvisí s tématem disertace a jsou přiměřeným způsobem odkazovány v textu. Vlastní publikace byly provedeny v odpovídajícím rozsahu a k řešené problematice.

Dosažení v disertaci stanovených cílů

Disertační práce má de facto tři nosné části. V první autor diskutuje problematiku materiálových charakteristik s vlivem nelineárního chování kompozitu, mezní stavy a pevnostní kritéria. V další se zabývá únosností ovíjených kolíkových spojů s využitím teoretické přípravy obsažené v části první. V poslední části řeší obdobným způsobem kolíkové spoje neovíjené.

Obě poslední části končí sumarizací dosažených výsledků, jak teoretických, tak i experimentálních, kde je obsažen i soubor pokynů pro metodicky správný návrh spoje. V tomto smyslu tedy zcela naplnil hlavní cíl disertace a, domnívám se, připravil velmi užitečný podklad pro práci řadového konstruktéra.

K výsledku bych snad jen uvedl několik drobných připomínek. V běžné praxi je obvyklé sestavovat pokyny pro řadové konstruktéry do podoby tzv. konstrukčních principů, kterými se pak ve své práci řídí při návrhu typického výrobku. Pro přehlednost je ale vhodné využít větší měrou obrázkové přílohy a tabulky, které jsem v závěrečných pasážích poněkud postrádal - například slovní popis geometrických závislostí oka doplnit odpovídajícím obrázkem pro snazší představu bez opakovaného listování prací.

V práci je proveden užitečný rozbor kritérií pevnosti a jejich vhodnosti pro vyhodnocení napjatosti v kompozitu. Je třeba ale zdůraznit, že jde o velmi speciální aplikace a výsledky pro jiné materiály, technologie a konstrukční řešení mohou vyjít jinak. Kritéria, která se osvědčila nyní, negarantují a priori stejně dobrou shodu ve všech aplikacích.

Autor provedl velmi zajímavý rozbor a následnou úpravu kritéria LaRC04 s dobrou shodou vypočtených a změřených výsledků. V různých částech práce ale konstatuje, že se shoda výsledku výpočtu a experimentu poměrně výrazně mění. Nalezení příčin těchto odchylek doporučuji nehledat jen v teorii, na základě které bylo kritérium připraveno. Je také třeba ověřovat vlastnosti materiálu vzorků. Bylo by vhodné doplnit zkoušky vytržení zejména neovíjeného oka vhodnou ověřovací zkouškou materiálu bez vrubu a s vrubem, včetně změření skutečného objemového podílu vlákna. Je třeba si uvědomit, že kompozitní materiály vznikají relativně složitým postupem, který je obvykle završen vytvrzením pojiva a následným tepelným zpracováním (pokud již nebylo součástí primárního vytvrzovacího procesu). Materiály pro výrobu kompozitů jsou dodávány s nezanedbatelnou tolerancí vlastností a rovněž vytvrzovací procesy nemusí vždy proběhnout stejně. Předložená práce je charakteristická tím, že dosažené výsledky experimentu často závisí na vlastnostech matrice a objemu vlákna v ní uloženém.

Přínos disertační práce

Velký přínos práce vidím v rozboru vlastností pevnostních kritérií a porovnání jejich vhodnosti pro dvě základní aplikace – ovíjené a neovíjené kolíkové spoje. V závěru práce autor uvádí u neovíjených kolíkových spojů poznámku, že je vhodné je navrhovat vždy tak, aby k jejich poruše došlo jen otlačením.

Tím se autor, podle mého názoru, dostává k podstatě celé problematiky navrhování kompozitních konstrukcí z hlediska jejich pevnosti. Neexistuje totiž žádné jedině správné a všeobjímající kritérium poruchy kompozitu, které bude schopno spolehlivě vyhodnotit všechny možné módy poškození. Za správný považuji takový postup konstruktéra, kdy za použití vhodných metodik (konstrukčních principů) navrhne konstrukci tak, aby k jejímu fatálnímu poškození mohlo dojít jen předem zvoleným módem. Ten jsme totiž obvykle schopni relativně dobře predikovat a v praxi také zaregistrovat použitím vhodného vybavení a postupů.

Tento přístup autora je podpořen zpracováním odpovídající metodiky návrhu spoje. Přínos předložené práce považuji za významný jak z hlediska teoretického, tak i praktického.

Prokázání znalostí doktoranda v daném oboru

Autor prokázal hluboké znalosti v oblasti pevnostních kritérií kompozitu, materiálových charakteristik a při zpracování výsledků do prakticky využitelné formy. Provedl modifikaci kritéria LaRC04 pro nelineární chování kompozitu při smykovém zatěžování. Modifikované kritérium dále využil při vyhodnocení simulací prováděných v metodě konečných prvků.

Podle mého názoru splnil doktorand zadání disertační práce v plném rozsahu a na patřičné odborné úrovni.

Formální úroveň práce

Obsahově práce popisuje postup řešení dostatečnou měrou, v některých částech by ale bylo vhodné zařadit další obrazovou dokumentaci pro lepší představu čtenáře. Převažující dojem z grafické úpravy je pozitivní a práce je svým rozsahem přiměřená řešené problematice.

Celkově má předložená práce potřebnou formální úroveň.

Doporučení k obhajobě

Předloženou disertační práci doporučuji k obhajobě.

Datum: 13. 05. 2013

Oponent:



Ing. Vilém Pompe, Ph.D.

Výzkumný a zkušební letecký ústav, a.s.
útv. Kompozitní technologie
Beranových 130
Praha – Letňany
199 05