



# OPONENTNÍ POSUDEK

*disertační práce*

**Ing. Michala Krále**

## NÁVRH METODIKY PRO PREDIKCI POKLESU TUHOSTI ÚNAVOVĚ ZATĚŽOVANÝCH KOMPOZITNÍCH KONSTRUKCÍ

V Praze dne 9. 2. 2019

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

---

### Úvod

K posouzení byla předložena disertační práce Ing. Michala Krále, vypracovaná v rámci doktorského studia na Fakultě strojní ČVUT v Praze. Práce se zabývá návrhem výpočtových modelů pro popis degradace tuhosti v dlouhovláknových kompozitech při únavovém zatěžování. Práce je obsáhlá o rozsahu 156 stran textu. Je rozdělena do osmi kapitol.

### Úroveň rozboru současného stavu v disertační práci řešené problematiky

Po úvodu do problematiky v kap. 1 se rozboru současného stavu problematiky chování kompozitních materiálů a rozvojem jejich mechanismů poškození a následně základními modely predikce životnosti včetně jejich experimentálního ověřování zabývá kap. 2. Doktorand věnuje rozsáhlé literární rešerši cca 24 stran. Zabývá se lamináty s jednosměrnou i s ortogonální tkaninovou výztuží. Klasifikuje rozdělení přístupů publikovaných modelů predikce životnosti dlouhovláknových kompozitů a podrobněji popisuje principy metod modelování únavového života na bázi S-N křivek, modelů postupného poškození nebo fenomenologických přístupů. Dále se zabývá výčtem a zhodnocením normalizovaných postupů měření statických i únavových charakteristik vláknových kompozitů. Úroveň rozboru stavu problematiky je dostatečně reprezentativní, autor pracuje s klíčovými publikacemi v nejdůležitějších kategorizovaných oblastech typů metod a uvádí hlavní normy a kriticky hodnotí jejich nedostatky pro aplikaci na únavové zkoušky. Vše shrnuje v dílčím kritickém zhodnocení návrhových metod, které mu je východiskem pro stanovení cílů disertační práce.

### Dosažení v disertaci stanovených cílů

Hlavním cílem disertační práce je v kap. 3 označen bod s textem: „Navrhnout metodiku pro predikci poklesu tuhosti únavově zatěžovaných konstrukcí vyrobených z kompozitních

materiálů“. Hlavní cíl souvisí se třemi podcílí práce: 1. návrhem a verifikací experimentů, 2. návrhem modelu predikce poklesu tuhosti a 3. verifikací navržené metodiky na základě výsledků realizovaných zkoušek. Protože nejsou v literatuře jednoznačně uvedeny postupy, jak měřit a vyhodnocovat degradační tuhosti vláknových kompozitních materiálů, jaké modely jsou vhodné pro tkaninové kompozitní výztuže, jaké parametry kompozitních materiálů mohou promlouvat do odezvy v poškozeních, ani jakými postupy určit potřebné parametry modelů, hodnotím cíle práce jako disertabilní.

Získané výsledky práce autor publikoval ve 12-ti publikacích, na které v disertační práci na vhodných místech odkazuje. Publikace tvoří převážně konferenční příspěvky na tuzemských i zahraničních konferencích, mnohé z nich uváděných v databázích, např. SCOPUS. I přesto, postrádám alespoň jednu impaktovanou, nejlépe souhrnnou publikaci, neboť se domnívám, že kvalita článku by byla akceptována i v některém z významných zahraničních časopisů a doporučuji poznatky k dodatečnému opublikování.

Dle mého názoru, byly všechny vytčené cíle v práci adekvátními metodami naplněny, získané poznatky i závěry řádně publikovány, jak stanoví zákon č. 111/1998.

### **Teoretický přínos disertační práce**

Přestože by se mohlo zdát, že fenomenologické modely založené na degradaci tuhosti kompozitu nemají již velký potenciál svého rozvoje, autorovi se podařilo vytvořit metodu predikce životnosti založené na tomto principu v aplikaci na kompozity s tkaninovou výztuží. Ukázal (v literatuře dosud nepublikovaný poznatek), že během cyklování může docházet i ke zvyšování tuhosti matrice, což může významně ovlivnit globální chování kompozitu, zejména při některých orientacích výztuže vůči směrům zatěžování nebo na nižších hladinách cyklického zatížení. V takovém případě nebude patrně vhodné takové modely aplikovat. Naopak pokud dominujícím mechanismem pro použitý materiálový systém bude nárůst poškozování v maticovém systému a degradace její tuhosti bude výrazná, je shoda vyvinutého predikčního modelu VZLU FDC s výsledky zkoušek velmi dobrá, jak ukazuje autor, a model bude pro praxi dobře využitelný. Aplikace modelu na jednotlivé vrstvy umožní hodnotit též např. rozložení zbytkových tuhostí v hlavních směrech vrstev a usuzovat na jejich degradaci.

### **Praktický přínos disertační práce**

Praktický přínos práce je pro takové pracoviště, jakým je VZLÚ, ale i další u nás a jinde ve světě nepopíratelný. Navržená metodika, zahrnující vlastní algoritmus výpočtového modelu i experimentální data, resp. návod na určování parametrů modelu, umožňuje přímou inženýrskou aplikaci metodiky pro predikci pevnosti/životnosti tkaninových kompozitních struktur. Významná je její přímá implementace do softwaru MKP. Postup nalezne uplatnění při kontrole a návrhu přípustných cyklických zatížení řady praktických výrobků, vyráběných např. infuzními technologiemi, ale po ověření jistě i technologiemi dalšími.

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

Autor zvolil tradiční vědecko-výzkumný postup naplnění cílů práce: experimentální výzkum – analýzu výsledků - návrh a ověření výpočtového modelu a jeho numerickou implementaci – validaci modelu a vytvoření metodiky – ověření na praktických úlohách. Oceňuji viditelnou snahu o korektnost realizace a vyhodnocování experimentálních prací. Doktorand uplatnil zkušenosti nasbírané na pracovišti svého současného působení (VZLÚ Praha). To uplatňuje při rozvaze a plánování typů a rozsahu experimentálních prací a jejich validního zpracování i kritického hodnocení výsledků. Nenechal se odradit tím, že výsledky ukazovaly jiné trendy,

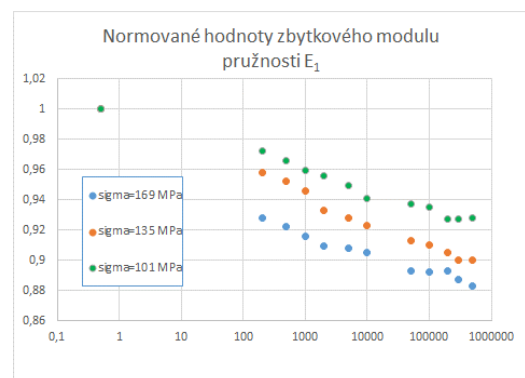
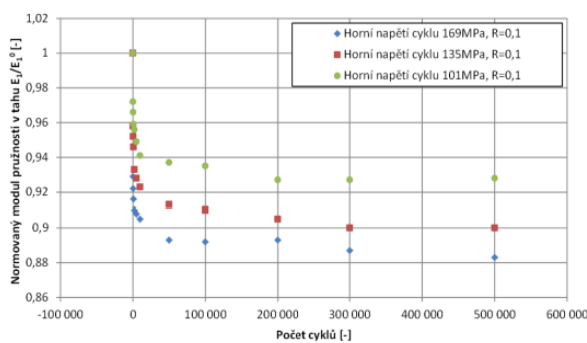
než jaké by si asi přál získat a vytrvale hledal jiné cesty řešení i vysvětlování získaných závislostí. Tyto cesty a postupy také dokázal ve své práci adekvátně popsat, vysvětlit a zdůvodnit, což se nedařívá každému výzkumníkovi (místy až detektivní příběh...). V postupech ukázal i operativnost, např. v rozhodnutích o nutném doměření řady dat (viz popis chování samotné matrice nebo ověření vlastností na jiném typu pryskyřice, případně měření při jiných teplotách vytvrzení atp. To svědčí o výborné orientaci v problematice, o povědomí v nutnosti uvažování dalších faktorů, které mohou ovlivňovat zkoumaný degrační mechanismus poškozování. Metody i získané výsledky považuji za adekvátní a zdařile aplikované.

## Formální úroveň práce

Formální úroveň práce hodnotím jako nadprůměrnou. Pisatel užívá srozumitelný technický jazyk bez významových i stylistických nepřesností. Jednoznačně definuje a vysvětluje všechny potřebné pojmy a veličiny. Zařadil úvod do problematiky i shrnutí pro každou klíčovou kapitolu. Za klíčové kapitoly práce považuji zejména kap. 5 (experimentální měření) a kap. 6 a 7 (návrh a verifikaci modelu degradace tuhosti). V práci jsem našel jen minimum překlepů a obecně nese známky vysoké pečlivosti. Tabulky, grafy i obrázky jsou čitelné a vypovídající, v textu komentované, prostě tak jak to má být. Pokud alespoň něco malého poznamenat, tak bych preferoval jednotný styl z Excelu přebíraných grafů (jednotné orámečkování, sít souřadnic pro obě osy atp. – srovnej např. formátování v obr. 6.7 a 6.9 nebo 7.9 a 7.10 atp.).

## Dotazy a připomínky k práci

1. Autor práce se na řadě míst (kromě matematicko-statistického hodnocení) odvolává na vizuální kontrolu např. kvality regrese experimentálně určených bodů. Vzhledem k dlouhodobému cyklování považuji za vhodnější zobrazení některých grafů pro toto hodnocení v logaritmické škále životnosti, jak to bývá obvyklé. Srovnání v práci uvedeného grafu na obr. 5.5. po transformaci do logaritmické osy je porovnáno níže a ukazuje lepší vizuální kontrolu trendů, zejména pro nízké hodnoty životnosti, kde lineární oblast poznamenává prudký pokles. Podobná srovnání by byla zajímavá např. i pro grafy na obr. 5.7 až 5.10, nebo pro hodnocení parametru poškozování na obr.6.5 až 6.7.



2. Další diskusi bych zaměřil na analýzu degračních modelů. Autor vycházel z modelu Liu-Lessard (vztah 6.3), kdy pro parametr poškozování platí vztah (6.4)

$$D = 1 - \frac{E^n}{E^0} = (A \cdot (\sigma_{max})^C \cdot n)^{1/B} \quad (6.4)$$

Odtud odvodil pro zbytkový modul pružnosti vztah (6.5):

$$E^n = E^0 \cdot [1 - (A \cdot (\sigma_{max})^C \cdot n)^{1/B}] \quad (6.5)$$

Zlogaritmování vztahu možná trochu napoví o příspěvcích jednotlivých členů v bilogaritmicím zobrazení. Pro parametr D, vychází:

$$\log D = \log \left( 1 - \frac{E^n}{E^0} \right) = 1/B [\log A + C \cdot \log \sigma_{max} + \log n].$$

Autor rozšířil tento model o další členy, což zapsáno ve srovnatelném tvaru k rovnici (6.4) je

$$D = 1 - \frac{E^n}{E^0} = (\gamma \cdot \sigma_{max} + \kappa) + (A \cdot (\sigma_{max})^C \cdot n)^{1/B} \quad \text{viz též (6.7).}$$

Zde logaritmování postrádá již svůj smysl, ale stavba vztahu napovídá, jak je v modelu dodatečně zohledněn vliv hladiny napětí oproti (6.4). Dostaneme:

$$D = 1 - \frac{E^n}{E^0} = \kappa + \sigma_{max} \left( \gamma + A^{1/B} \cdot (\sigma_{max})^{\frac{C}{B}-1} \cdot n^{1/B} \right)$$

Nyní tedy k diskusi. Jistěže fenomenologické modely nemusejí zohledňovat fyzikální principy daných jevů, představují většinou „uspokojivou“ náhradu děje. Pokud však dobře „fungují“ může jejich stavba cosi napovědět o struktuře, zde např. působení degradačních mechanismů. Pokud by např. model dle (6.4) vyhovoval, aditivní parametr napětí v bilogaritmicí škále dobře definuje vliv napětí na životnost. Obávám se, že možná až přílišná komplikovanost právě v parametru maximálního napětí v nově navržené závislosti, může činit potíže pro obecnější použití modelu na další případy materiálů nebo způsob vrstvení (laminaci) atp.. Jak to vidí autor svým pohledem?

### **Závěrečné hodnocení**

Jsem přesvědčen, že doktorand prokázal odpovídající orientaci, přehled a znalosti v oboru mechaniky kompozitních materiálů. Konstatuji, že předložená disertační práce ing. Michala Krále 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 práci prokázal schopnosti samostatné vědecké práce a systematického i kritického přístupu k hodnocení získaných výsledků.

Doporučuji práci k obhajobě.

Milan Růžička