

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

FAKULTA TEXTILNÍ



Ing. Pavla Vozková

**Víceúrovňové modelování mechanických vlastností
textilních kompozitů**

AUTOREFERÁT DISERTAČNÍ PRÁCE

Název disertační práce: **VÍCEÚROVŇOVÉ MODELOVÁNÍ
MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ
TEXTILNÍCH KOMPOZITŮ**

Autor: **Ing. Pavla Vozková**

Obor doktorského studia: textilní materiálové inženýrství

Forma studia: kombinovaná

Školící pracoviště: Katedra textilních materiálů, Fakulta textilní

Školitel: Doc. Ing. Bohumila Košková, CSc., Fakulta textilní,
TU v Liberci

Školitel specialista: Doc. Ing. Bohdana Marvalová, CSc., Katedra
mechaniky, pružnosti a pevnosti, Fakulta strojní, TU
v Liberci

Liberec 2008

1. Předmět a cíl práce

Předložená práce je zaměřena na studium elastických vlastností kompozitů uhlík/uhlík s tkaninovou výztuží vyrobených prepregovou technologií. Cílem této práce bylo pomocí nedestruktivní metody rezonančních frekvencí, založené na buzení mechanických kmitů a nalezení vlastních frekvencí, stanovit elastické vlastnosti kompozitu C/C s tkaninovou výztuží při stavu pouze elastických deformací podle Hookeova zákona.

Dále bylo cílem modelovat elastické vlastnosti kompozitu pomocí komerčního výpočetního systému metodou konečných prvků. Byl použit geometrický model založený na víceúrovňovém modelování struktury. Výpočet byl proveden v systému Comsol Multiphysics vhodném pro numerické řešení parciálních diferenciálních rovnic.

2. Přehled současného stavu problematiky

Kompozity C/C jsou vysoce funkční materiály používané v celé řadě aplikací a jsou ceněné zejména pro svou vysokou mechanickou a tepelnou odolnost. Kompozit se skládá ze dvou a více strukturních složek, jejichž vzájemnou spoluprací je vyvolán synergický (zesilující) efekt. To znamená, že vlastnosti výsledného produktu jsou lepší než jen pouhý součet vlastností složek. Nespojitou částí je textilní výztuž, která nese zatížení. Jejímí nejdůležitějšími vlastnostmi jsou vysoká pevnost a modul pružnosti. Spojitá složka kompozitu, matrice, vyplňuje prostor kolem vláken a přenáší vnější zatížení styčným povrchem s výztuží [1]. Ucelené shrnutí studia kompozitních materiálů poskytují například práce [2,3,4].

2.1 Testování kompozitů destruktivními a nedestruktivními metodami

Přestože statické zatěžování (tahová zkouška) kompozitů je časově i finančně náročné a jedná se o destruktivní metodu, je stále široce využíváno především pro jednoznačnost získaných dat. Tato oblast často zahrnuje i dynamické a vysokozátěžové testy vláken i celých kompozitů. Zmíňme například publikace [5,6,7].

Původně bylo nedestruktivní testování používáno kvůli bezpečnosti. Výhodou je ale také opakovatelnost a cena měření, protože nedochází ke zničení vzorku. Při těchto metodách se působí na vzorek bez vzniku nevratných deformací. Dochází ke snímání odezvy materiálu na nějaký budící signál. Struktura povrchu je studována především vizualizačními a penetračními metodami. Pro inspekci vnitřní struktury se používá testování pomocí ultrazvuku, RTG či ultrafialového záření ad. Nedestruktivní metody jsou používány pro testování především struktury kompozitů [8,9].

Prověřenou nedestruktivní experimentální metodou je vyhodnocování vlastních frekvencí kmitů procházejících kompozitní deskou, která je podložena teoriemi Lagrange, Euler-Bernoulli, Rayleigh a Timošenko [10,11].

2.2 Modelování vlastností kompozitů

V současné době je predikce vlastností kompozitů stejně důležitá jako jejich přímé testování. Modelováním se nejen zjišťují výsledné vlastnosti kompozitu, ale je možné navrhnout materiálové složení, vrstvení i jinou konstrukci přesně podle konečných požadavků. Aproximace vlákněných svazků i ostatních geometrických charakteristik je nezbytnou součástí přípravy výpočtu. K popisu geometrie se používá Metoda konečných prvků a jiné algoritmy, na jejichž podkladu pracují různé výpočetní softwary. Metoda konečných prvků (MKP) je numerická metoda sloužící k diskretizaci spojitého kontinua do určitého konečného počtu prvků [12].

Pro modelování vlastností materiálu je třeba znát jeho strukturu. Ta je v případě tkaninových kompozitů C/C neobyčejně složitá. Vedle nepravidelně zvlněné textilní výztuže vykazuje i řadu vrozených defektů (pórů, bublin a trhlin), jejichž výskyt je především důsledkem pyrolýzy polymerního prekurzoru uhlíkové matrice a rozdílného smršťování vláken a matrice při ochlazování kompozitu [4,13]. Kompozity se nejjednodušeji popisují pomocí základních modelů, které zavádějí určité předpoklady. Model *průměrné tuhosti* (iso-strain) předpokládá, že ve vícesložkové soustavě při zatížení je přetvoření všech složek stejné, ale napětí nikoliv. Naproti tomu model *průměrné poddajnosti* (iso-stress) předpokládá stejné napětí [6,14].

Studium mechanického chování kompozitů lze pojímat jednoduše, ale pro větší přesnost se musí brát v úvahu mnoho dalších parametrů ovlivňujících komponenty. Modelování po úrovních umožňuje rozložit složité heterogenní struktury tak, že výpočet jejich vlastností sestává z dosazování výsledků z nižších úrovní do těch následujících. Specifika z jednotlivých úrovní se v obecném součtu zahrnují do celku, čímž se docílí vyšší přesnosti konečného výsledku [3,5]. Rozvrstvení struktury je definováno v Tab 1.

Tab 1. Úrovně modelování kompozitů podle jednotlivých komponent

| Úroveň | Typický rozměr | Dimenze | Typický parametr |
|------------------|----------------|---------|--------------------------|
| Kompozit | m | 3D | Počet vrstev (lamin) |
| Tkanina | m | 2D | Počet vláknenných svazků |
| Vláknenný svazek | mm | 1D | Počet vláken |
| Vlákno | μm | 1D | Průměr |

Snahy výzkumných pracovišť jsou dnes soustředěny na zpřesnění popisu nepravidelně zvlněné výztuže [16,17]. Avšak i v tomto případě byl u kompozitů C/C zaznamenán ještě dosti velký nesoulad vypočtených a naměřených hodnot, neboť struktura obsahuje 20 až 25% dutin nejrůznější velikosti, od mikropórů (min. 10^{-5} mm²) až po velké bubliny (max. 10^{-1} mm²) [4,13]. Zmíňme práce v oblasti kompozitů publikované týmem prof. Lomova z Katolické univerzity Leuven v Belgii [15,18,19]. Podobnými postupy aplikujícími víceúrovňové modelování na mikro a mesoúroveň se zabývají na ČVUT v Praze pod vedením doc. Šejnohy [20].

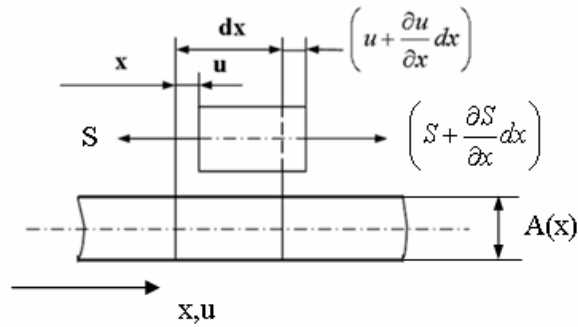
3. Použité metody

V této kapitole je zmíněna teorie podélného a příčného kmitání pružných tyčí a popis metody rezonančních frekvencí. Pomocí těchto metod se stanovují elastické konstanty tuhých těles. Dále je zde mechanikou kontinua definována struktura z mechanického hlediska a také je vysvětleno 2D víceúrovňové modelování struktury použité pro simulaci.

Ve všech zmiňovaných teoriích se jedná o kmitání tenkého deskového nosníku [21,22]. Tenká deska je taková, jejíž tloušťka je rovna nebo menší v poměru 0,1 vůči ostatním rozměrům [21]. Metody, založené na analýze podélného kmitání a příčného kmitání Timošenkova nosníku byly propracovány v Ústavu struktury a mechaniky hornin (ÚSMH) Akademie věd ČR v Praze a byly použity pro stanovení elastických modulů v experimentu.

3.1 Kmitání tenkých pružných tyčí

Předpokladem Lagrangeova **podélného kmitání** je tenká tyč osově souměrná u níž délka alespoň o jeden řád převyšuje příčné rozměry, Obr 1. V obecném případě kolmé řezy tyčí zůstávají rovinné i při její deformaci a napětí je rovnoměrně rozloženo po průřezu. Jedná se tedy jednoosou napjatost. Příčné pohyby absorbují zanedbatelné množství energie [21,22].



Obr 1. Deformace tenké tyče vyvolaná podélnou vlnou [21,22]

Pohybová rovnice elementu tyče podle Lagrangea je

$$\rho A(x) \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{\partial (A\sigma)}{\partial x}, \quad (3.1)$$

kde A je plocha průřezu, ρ je hustota materiálu, σ je napětí. Pro Hookeův zákon platí

$$\sigma = E\varepsilon = E \frac{\partial u}{\partial x}, \quad (3.2)$$

Po zavedení konstanty c_0 vztahem

$$c_0^2 = \frac{E}{\rho}, \quad (3.3)$$

se pohybová rovnice nachází ve tvaru

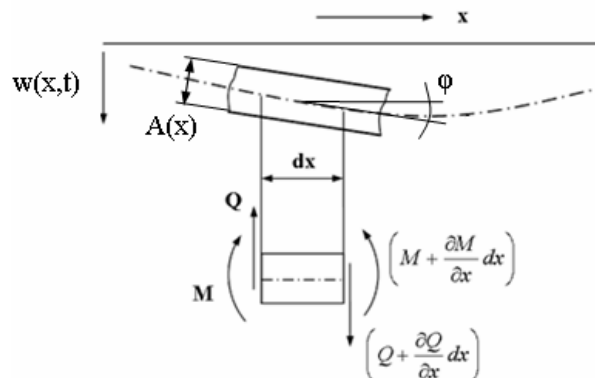
$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = c_0^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}. \quad (3.4)$$

Tento tvar platí pro tyče stálého průřezu. Této rovnici vyhovuje řešení

$$u(x, t) = f(c_0 t + x) + g(c_0 t - x), \quad (3.5)$$

Řešení představuje dvě postupující vlny, které se pohybují v opačném smyslu rychlostí c_0 [21,22].

V teorii Euler-Bernoulli **příčného kmitání** je zaveden předpoklad, že řezy tyčí kolmo na osu zůstávají rovinné a že pohyb elementů lze považovat za posuv kolmo na nedeformovanou osu v rovině hlavních os setrvačnosti průřezů. O průhybech při kmitání se předpokládá, že jsou malé ve srovnání s jeho příčnými rozměry. Ohybová křivka je velmi plochá, tedy $\partial w/\partial x$ je mnohem menší než 1. Je také zanedbán posuv elementů ve směru osy x i natáčení v rovině pohybu. Na element délky dx v řezech působí momenty a posouvací síly, Obr 2.



Obr 2. Síly a momenty působící na element při příčném vlnění [21,22]

Pohybová rovnice elementu je

$$\rho A(x) dx \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = \frac{\partial Q}{\partial x} dx. \quad (3.6)$$

Rovnice ohybové čáry k ní příslušející pro ploché křivky

$$M = -EI(x) \frac{1}{R} = -EI \frac{\partial^2 w}{\partial x^2}, \quad (3.7)$$

kde EI je ohybová tuhost, přičemž I je osový kvadratický moment průřezu vzhledem k ose kolmé k rovině kmitání, R je poloměr křivosti.

Timošenko zavedl korekci na vliv posouvací síly. Zanedbal zvlnění průřezu a předpokládal, že úhel sklonu tečny ohybové čáry je dán součtem úhlu natočení ψ (způsobený ohybem) a úhlové změny β (smyk, zkos vyvolaný posouvající silou). Výchozí je rovnice

$$\frac{\partial w}{\partial x} = \psi + \beta, \quad (3.8)$$

kde podíl na pravé straně vyjadřuje směrnici výsledné ohybové křivky. Pohybová rovnice pro posuv elementu je

$$A\rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} dx = \frac{\partial Q}{\partial x} dx. \quad (3.9)$$

Rovnice pro natáčení elementu nosníku zde je

$$\rho I \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} dx = Q dx - \frac{\partial M}{\partial x} dx. \quad (3.10)$$

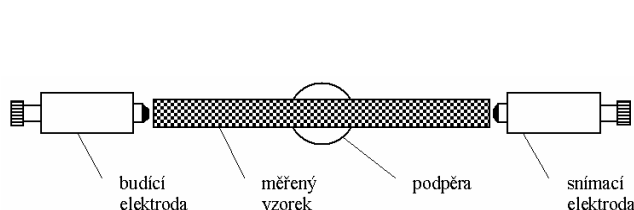
Nalezená pohybové rovnice pro průhyb $w(x,t)$ je

$$c_0^2 k^2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} - k^2 \left(1 + \frac{E}{G\alpha} \right) \frac{\partial^2 w}{\partial x^2 \partial t^2} + \frac{1}{\alpha} \frac{k^2}{c_2^2} \frac{\partial^4 w}{\partial t^4} = 0, \quad (3.11)$$

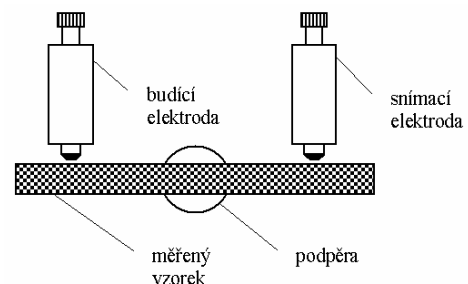
kde c_2 je rychlost smykových vln v kontinuu $c_2^2 = G/\rho$ a platí $E/G = 2(1+\mu)$, μ je Poissonovo číslo. Pro štíhlé nosníky dávají tyto teorie dobré výsledky [21,22].

3.2 Popis metody rezonančních frekvencí

Aplikace metody rezonančních frekvencí byla vyvinuta v Ústavu struktury a mechaniky hornin (ÚSMH) AV ČR [11]. Na jejím základě lze z rezonančního spektra frekvencí podélných mechanických kmitů ortotropního deskového pásu určit podélný modul v tahu a Poissonovo číslo. Z rezonančního spektra příčných kmitů je potom možno získat smykový modul. Výhodou této metody je přesnost výsledků. Metoda je to zcela nedestruktivní [10,11].



Obr 3. Schéma měření (přdorys) rezonančních frekvencí podélných kmitů přístrojem RFT Erudite [10]



Obr 4. Schéma měření rezonančních frekvencí příčných kmitů přístrojem RFT Erudite [10]

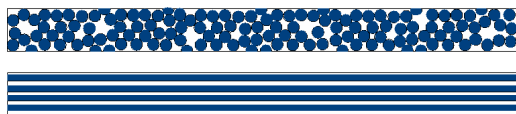
Měření vzorků se v ÚSMH provádí na přístroji Erudite (resonant frequency tester) CNS Electronics Ltd., London, UK. Z Obr 3. a Obr 4. je zřejmé, že při testování byla použita podpora vzorku v jejím středu. Na budící elektrodu je přivedeno střídavé napětí. Napětí má harmonický průběh s amplitudou 400 V o budící frekvenci 10 Hz až 100 kHz. Na uzemněný

elektricky vodivý vzorek působí elektrostatická síla, která je vyvolaná elektrickým polem mezi budící elektrodou a uzemněným vzorkem. Elektrostatická síla potom budí ve vzorku mechanické kmity. Na snímací straně se v důsledku kmitů vzorku mění periodicky poloha koncové strany vzorku vůči snímací elektrodě. Mění se tedy periodicky kapacita mezi elektrodou a vzorkem. Elektrodynamické poměry jsou obdobné jako na kondenzátoru s proměnnou kapacitou. Při konstantním napětí na snímací elektrodě vzorkem (a výstupním obvodem) protéká harmonický elektrický proud o budící frekvenci. Lze tedy pomocí výstupního napětí snímat amplitudu buzených elastických kmitů (přesněji stojatých vln) ve vzorku [10,11].

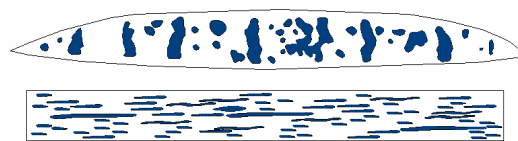
3.3 Víceúrovňové geometrické modelování struktury

V simulaci se uvažuje pouze dvou-dimenzionální struktura. Jsou zde obsaženy všechny komponenty. Příčné a podélné svazky vláken jsou provázány v textilní vazbě a obklopeny matricí, příp. vzduchem dutin. Důležité je respektovat defekty ve svazcích, rozvrstvení lamin a dutiny vzniklé vrstvením. Celková struktura kompozitu je tvořena geometrickými útvary.

Mějme mikrostrukturu jako nejnižší uvažovanou úroveň, ve které jsou obsažena vlákna a matrice, tj. vláknový svazek neboli kabílek na Obr. 5 a 6. Vlastnosti ani struktura vláken a matrice se v průběhu testování nemění. Uspořádání vláken v matrici je náhodné a odpovídá zaplnění kolem 60%. Během procesu výroby kompozitu vzniknou ve struktuře póry s nimiž je nutno také počítat. Pro výpočet je vhodné rozdělit tuto úroveň do dvou fází výpočtu. Nejprve se vypočítají vlastnosti materiálu na Obr. 5, pro jehož velikost je ještě póry neuvažují, a poté se výsledné vlastnosti dosadí do větší struktury s póry [20,23].

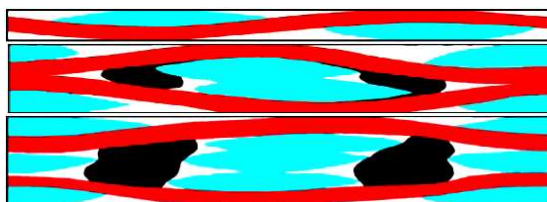


Obr 5. Podélný a příčný řez částí svazku (modrá – vlákna výztuže, bílá – matrice)



Obr 6. Svazek zahrnující vlákna, matrici a defekty (modrá – vlákna výztuže, bílá – matrice)

Další hierarchicky vyšší úrovní je základní strukturální jednotka, Unit cell, jejímž periodickým opakováním vzniká struktura plošné textilie s plátňovou vazbou. Pozorováním reálné struktury bylo určeno několik zjednodušených opakujících se elementů, které po sestavení tvoří laminu. Laminy pak navrstvením modelují deskový kompozit tak, aby byly rozměry vzorku pro výpočet kompatibilní s vzorky použitými pro experimentální měření [20,23].



Obr 7. Periodické strukturální buňky 1,2,3 [23]



Obr 8. Strukturální model laminy [23]



Obr 9. Schéma kompozitní desky [23]

3.4 Metodika výpočtu elastických vlastností

V mechanice kompozitních materiálů bývá zvykem nahradit daný nehomogenní materiál ekvivalentním homogenním materiálem, jehož chování lze popsat zobecněným Hookeovým zákonem, který spojuje tenzor napětí a tenzor deformace. Tenzory napětí σ_{ij} a deformace ϵ_{kl} spolu souvisí podle

$$\sigma_{ij} = c_{ijkl} \epsilon_{kl}, \quad (3.12)$$

kde c_{ijkl} je tenzor tuhosti a jeho složky popisují odezvu ve formě napětí na zadanou deformaci. Dále lze Hookeův zákon psát s tenzorem poddajnosti, který je inverzní k tenzoru tuhosti. Jeho složky umožní určit deformaci jako odezvu na působící napětí.

Předpokládá se, že materiál matrice je homogenní a izotropní se strukturou blízkou skelnému uhlíku [14]. Elastické konstanty se nemění vzhledem k otočení kolem kterékoli osy [24,25].

Vlákněné svazky považujeme za homogenní a příčně (transverzálně) izotropní [14]. Příčně izotropní těleso má v jedné rovině (rovina izotropie) vlastnosti stejné ve všech směrech. V našem případě je to rovina kolmá na osu vlákněného svazku. Při transformaci souřadné soustavy kolem osy kolmé k rovině izotropie o libovolný úhel se elastické parametry nemění [24,25].

Symetrie ideálního kompozitu složeného z ideálních textilních lamin je určena především rovinnou symetrií lamin, která je naopak dána typem textilní vazby. Ideální kompozit s plátňovou vazbou bude spadat do čtverečné krystalové soustavy s bodovou grupou 422. Obsahuje čtyřčetnou osu kolmou k rovině tkaniny a dvě navzájem kolmé dvoučetné osy v rovině tkaniny [26].

Pokud bude uvažováno namáhání jiné než v osách symetrie, tedy v určitém úhlu k osám symetrie (osnově a útku vyztužující tkaniny, ale stále v rovině laminy), musí se elastické parametry přetransformovat. Nová souřadná soustava bude potočena kolem osy X_3 o úhel δ . Podélný modul v ose X_1' nové souřadné soustavy je vypočítán podle

$$E_x'(\delta) = \left[\frac{1}{E} (\cos^4 \delta + \sin^4 \delta) + \left(\frac{1}{G} - \frac{2\mu}{E} \right) \sin^2 \delta \cos^2 \delta \right]^{-1}. \quad (3.13)$$

Pro smykový modul ve směru roviny se použije výpočet

$$G_{xy}'(\delta) = \left[2 \left(\frac{4(1+\mu)}{E} - \frac{1}{G} \right) \sin^2 \delta \cos^2 \delta + \frac{1}{G} (\sin^4 \delta + \cos^4 \delta) \right]^{-1}, \quad (3.14)$$

kde E , G a μ jsou pořadě Youngův modul, modul ve smyku a Poissonovo číslo pro souřadnou soustavu spojenou se vzorkem, v níž osa X_1 má směr osnovy [24].

4. Přehled dosažených výsledků

Následují výsledky experimentálního testování a simulace ve výpočetním programu. Experiment byl proveden v Ústavu struktury a mechaniky hornin Akademie věd ČR v Praze. Pro modelování bylo použito programu Comsol MultiphysicsTM. Součástí je i porovnání hodnot z obou metod. Studovaný kompozit je osmivrstvý laminát tvořený z grafitizovaných uhlíkových vláken v plátňové vazbě obklopený uhlíkovou maticí. Uhlíková matrice vznikla z fenolické pryskyřice Umaform LE vysokoteplotním zpracováním. Základní parametry uhlíkového kabíčku a tkaniny podle [3,13,27,28,29] jsou v Tab 2.

Tab 2. Parametry uhlíkového kabíčku a tkaniny

| svazek uhlíkových vláken | | uhlíková tkanina | |
|--------------------------|--------------------------------------|------------------|-----------------------|
| počet vláken | 6000 | vazba | plátňová 1/1 |
| délková hmotnost | 222 tex | tloušťka tkaniny | 0,36 mm |
| pevnost | 5490 MPa | plošná hmotnost | 200 g.m ⁻² |
| tažnost | 1,9 % | porozita | 69 % |
| teplotní vodivost | 35 W.m ⁻¹ K ⁻¹ | dostava | 450 nití/m |

Z předchozích definic a literatury byly vybrány vstupní veličiny, Tab 3., [27,28,29].

Tab 3. Hodnoty důležitých vstupních veličin

| Komponenta | Měrná hmotnost [kg.m ⁻³] | Youngův modul [MPa] | Poissonovo číslo [-] |
|----------------------|--------------------------------------|---------------------|----------------------|
| Vlákna Toray 800 HB | 1810 | 294 000 | 0,24 |
| Matrice-Skelný uhlík | 1400 | 89 | 0,30 |
| Vzduchové dutiny | 1,3 | 0,0 | 0,0 |

4.1 Výsledky experimentu

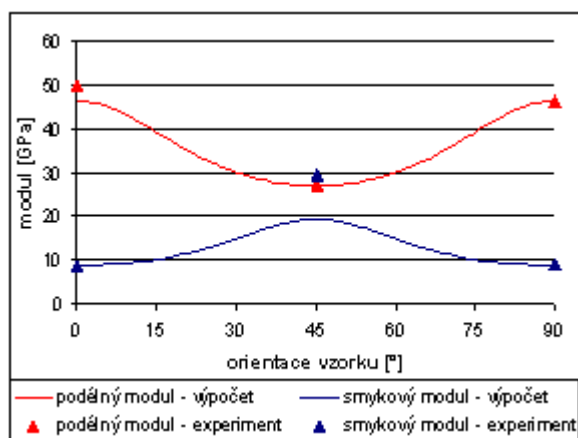
Vzorky byly vyříznuty v několika variantách tak, aby se otestovala míra závislosti vlastností na sklonu výztuže. Byly tedy testovány vzorky pod úhly 0°, 45°, 90° a -45° (resp. 315°) ke směru osnovy výztuže. První sada měření byla provedena na vzorcích po karbonizaci na 1000°C. Druhá sada měření obsahovala vzorky po grafitizaci na 2200°C.

V Tab 4. jsou uvedeny hodnoty podélného Youngova modulu, smykového modulu a Poissonovo číslo stanovené metodou rezonančních frekvencí. Experimentem bylo zjištěno, že podélný modul karbonizovaného vzorku v 0° a 90° (ve směru osnovy a ve směru útku) byl o polovinu nižší než vzorku grafitizovaného. Dalším teplotním působením se tedy podélný modul výrazně zlepšil. Naopak hodnoty podélného modulu ve směru 45° a -45° se prakticky nezměnily. Grafitizace zde neměla téměř vliv. Smykový modul vykazuje opačné závěry. Ve směrech výztuže je smykový modul téměř stejný, spíše nižší, ve směru 45° a -45° se po grafitizaci výrazně zvýšil. Poissonovo číslo je ve směru výztuže navzájem velmi blízké nehledě na zpracování. V dalších sledovaných směrech se po teplotním zpracování zvýšilo.

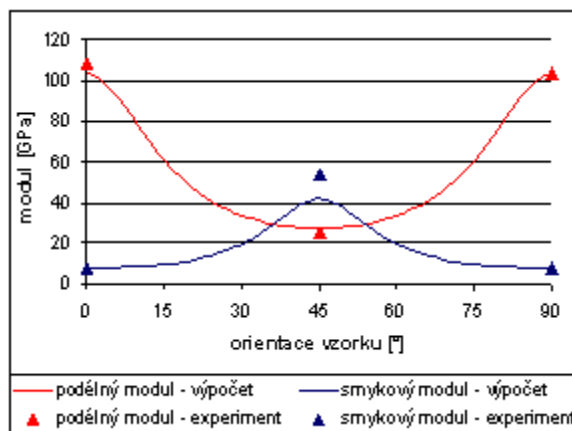
Tab 4. Hodnoty elastických konstant získaných rezonanční metodou

| Vzorky po karbonizaci | | | | Vzorky po grafitizaci | | | |
|-----------------------|---------|---------|-------|-----------------------|---------|---------|-------|
| Orientace vzorku | E [GPa] | G [GPa] | μ [-] | Orientace vzorku | E [GPa] | G [GPa] | μ [-] |
| 0° | 50 | 9,1 | 0,18 | 0° | 108 | 7,55 | 0,25 |
| 90° | 46,5 | 8,77 | 0,2 | 90° | 103 | 7,63 | 0,23 |
| 45° | 27,2 | 29,5 | 0,5 | 45° | 25 | 54 | 0,78 |
| -45° | 26,5 | 24,1 | 0,52 | -45° | 24 | 50 | 0,78 |

Z Obr 10. a Obr 11. vyplývá, že podélný modul testovaného kompozitu je nejvyšší ve směru vyztužujících vláken a smykový modul naopak nejnižší. V oblasti 45° natočení struktury je dokonce v obou případech smykový modul vyšší než podélný.



Obr 10. Hodnoty elastických konstant získaných rezonanční metodou po karbonizaci



Obr 11. Hodnoty elastických konstant získaných rezonanční metodou po grafitizaci

Protože známe elastické moduly v základní soustavě, v níž osa X_I má směr osnovy, lze pomocí transformačních vztahů (3.13) a (3.14) zmíněných v kapitole 3.4 vypočítat elastické parametry v libovolném výřezu pootočeném o úhel δ v rovině laminy. Vynesená závislost předpovídá pravděpodobný průběh ve směrech sklonu výztuže od 0° - 90° . Průběh na Obr 10 a Obr 11 vypočteného podélného modulu pro karbonizovaný i grafitizovaný vzorek dobře odpovídá naměřeným hodnotám i v oblasti 45° . Smykový modul pro oba typy pro 45° je však výpočtem výrazně nižší. Výpočet ze smykových hodnot ve směru výztuže podceňuje reálný kompozit, který má lepší smykové vlastnosti ve směru 45° od vyztužujících svazků.

Grafitizací vláken se výrazně odlišují hodnoty modulů ve směru výztuže a ve směru 45° výztuže pro kompozit s plátňovou vazbou uhlíkových svazků jako vyztužujícího systému. Karbonizovaný kompozit s plátňovou výztuží má pod různými úhly vyrovnanější hodnoty. I tak je však podélný modul ve směru 45° o polovinu nižší než ve směrech výztuže 0° a 90° .

4.2 Výsledky simulace

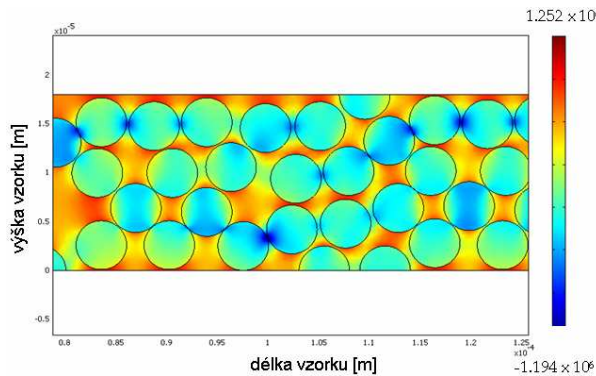
K výpočtu bylo použito strukturního mechanického modulu (Structural Mechanical Module) v programu Comsol Multiphysics 3.2 a v něm aplikace analýzy vlastních frekvencí (Eigenfrequency Analysis) [30,31]. Postup výpočtu se neliší od jiných komerčně používaných programů. Prvním stupněm je definování struktury importem nebo vlastní konstrukcí (Draw). Následně se stanoví vlastnosti složek, rozhraní a vnějšího působení (Physics). V této fázi se také definují vlastní konstanty či rovnice a pomocné veličiny (Options). Po vytvoření sítě (Mesh) dochází k samotnému výpočtu (Solve) a následně k vyjádření výsledků pomocí tabulek a grafů (Postprocessing). Metoda konečných prvků byla postupně aplikována na všechny hierarchické modely uvedené v kapitole 3.3.

V Tab 5. jsou výsledky výpočtu metodou konečných prvků pro všechny úrovně a druhy modelů. Tabulka obsahuje hodnoty podélného a smykového modulu. Jejich hodnoty byly získány podílem zprůměrovaných napětí a deformací z výsledku simulace. Je dobré si všimnout jak se vyvíjejí hodnoty postupem k vyšším úrovním. Podélný modul je velmi diferencován v prvních dvou úrovních díky výskytu jen jednoho typu vyztužujících vláken. Podélné řezy svazkem bez defektu i s defekty mají výrazně vyšší podélné moduly než příčné řezy svazkem bez defektů i s defekty. Smykový modul vykazuje stejné relace. V úrovních periodických strukturních buněk 1, 2 a 3, kde jsou příčné i podélné svazky zahrnuty ve struktuře, se projeví oba jevy, vysoké hodnoty předchozích podélných řezů i nízké hodnoty příčných řezů. Proto je výsledek podélného modulu periodických strukturních buněk 1, 2 a 3 mezi hodnotami předchozích nižších úrovní. Je zde názorně ukázán postup skládání vlastností tak, aby se na výsledku projevil synergický efekt.

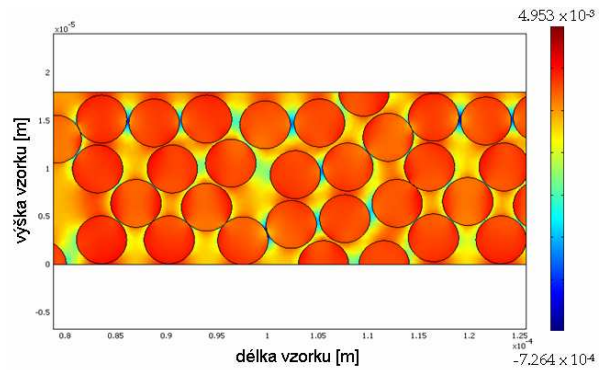
Tab 5. Přehled výsledků simulace v Comsol Multiphysics

| Úroveň a typ modelu | Podélný modul [GPa] $E = \sigma_x / \epsilon_x$ | Smykový modul [GPa] $G = \tau_{xy} / \gamma_{xy}$ |
|-------------------------------|--|--|
| Příčný řez svazkem | 0,253 | 0,103 |
| Podélný řez svazkem | 160,3 | 61,6 |
| Příčný řez svazkem s defekty | 0,190 | 0,039 |
| Podélný řez svazkem s defekty | 130,7 | 40,0 |
| Periodická strukturní buňka 1 | 54,8 | 9,5 |
| Periodická strukturní buňka 2 | 62,4 | 9,3 |
| Periodická strukturní buňka 3 | 53,3 | 8,5 |
| Lamina 1 | 54,8 | 6,9 |
| Lamina 2 | 62,4 | 7,6 |
| Lamina 3 | 53,2 | 6,7 |
| Celá struktura kompozitu | 86,3 | 7,3 |

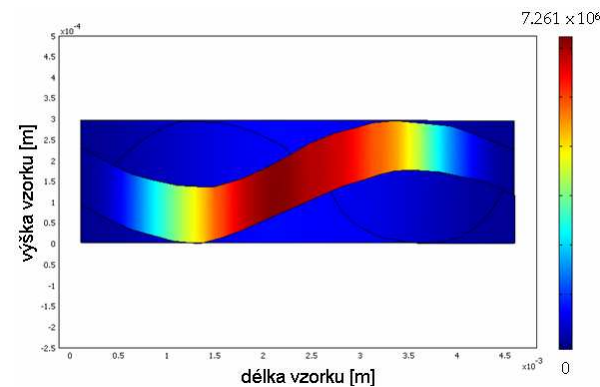
Typické výsledky simulace jsou znázorněny na Obr 12-17. Napětí je ve všech úrovních koncentrováno nejvíce ve složkách, které jsou rozmístěné po celé délce testované geometrie. Na nejnižší úrovni je to matrice, ve strukturní buňce je zatížen nejvíce podélný svazek a v kompozitu jsou to všechny laminy. Sklon k deformaci je naproti tomu detekován ve všech složkách. Pro úroveň příčného svazku s matricí je přesto koncentrace nejvyšší v uhlíkových vláknech. Strukturní buňka i celý kompozit vykazují stejný sklon k deformaci ve všech komponentách.



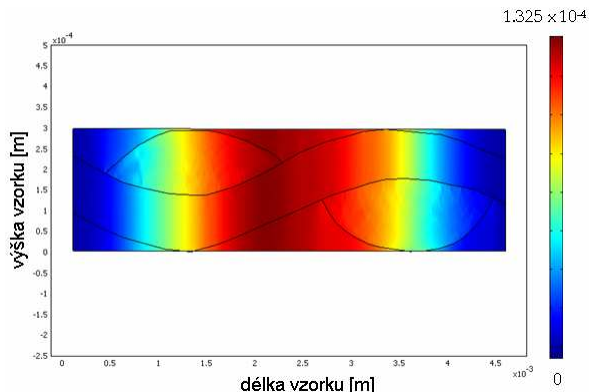
Obr 12. Podélné napětí - mikroúroveň



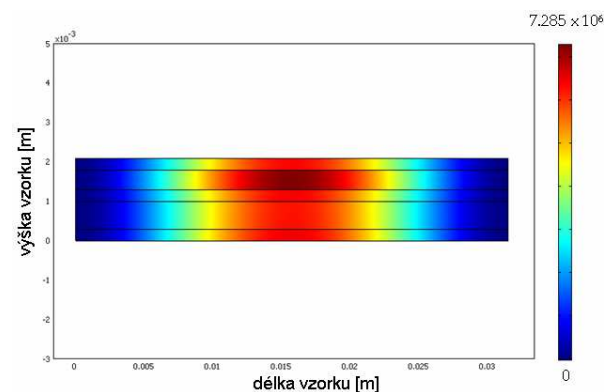
Obr 13. Podélná deformace - mikroúroveň



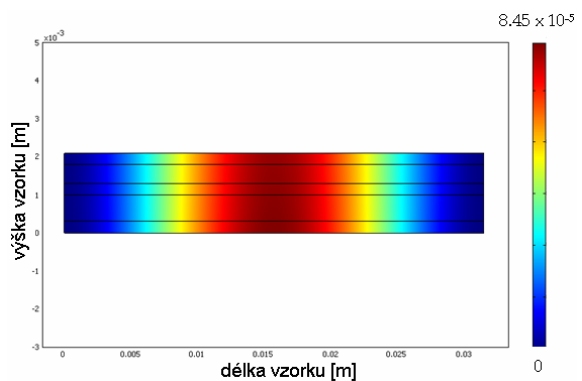
Obr 14. Podélné napětí - mesoúroveň



Obr 15. Podélná deformace - mesoúroveň



Obr 16. Podélné napětí – celý kompozit



Obr 17. Podélná deformace – celý kompozit

4.3 Porovnání experimentu a simulace

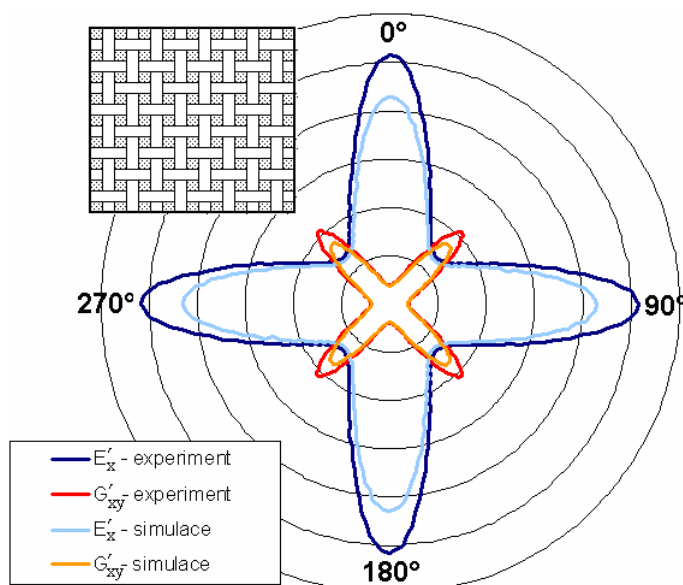
V této kapitole je porovnání výsledků elastických konstant z experimentu a simulace. Jsou zde obsaženy diskuze podélných a smykových modulů. Zhodnocení je vztaheno k rozložení hodnot v rovině výztuže. Hodnoty podélných modulů získaných experimentem se výrazně liší podle použité technologie, pro grafitizovaný kompozit jsou dvakrát vyšší, Tab 6. Výsledek simulace pro podélný modul je v mezích mezi grafitizovaným a karbonizovaným vzorkem. Lze prohlásit, že simulace poskytuje věrohodné výsledky. Z hlediska smykových

modulů je tento závěr ještě výstižnější. Grafitizované vzorky pro experiment i simulaci poskytují stejné výsledky. Smykový modul karbonizovaného vzorku je podle experimentu vyšší.

Tab 6. Výsledky elastických modulů z experimentu a simulace

| | Podélný modul [GPa] $E = \sigma_x / \epsilon_x$ | Smykový modul [GPa] $G = \sigma_{xy} / \epsilon_{xy}$ |
|--|--|--|
| Karbonizovaný kompozit z experimentu po osnově | 50,0 | 9,10 |
| Karbonizovaný kompozit z experimentu po útku | 46,5 | 8,77 |
| Grafitizovaný kompozit z experimentu po osnově | 103,0 | 7,63 |
| Grafitizovaný kompozit z experimentu po útku | 108,0 | 7,55 |
| Výsledný kompozit ze simulace | 86,3 | 7,34 |

Na Obr 18 je porovnání podélných a smykových modulů pro experiment i simulaci v rovině vyztužujících vláken po osnově, po útku i v různých úhlech (z výpočtu podle rovnic 3.13 a 3.14). Nejvyšší podélný modul je ve směrech výztuže, nejnižší ve směrech 45° ke svazkům. Opačný trend platí pro smykové moduly. Podélný modul získaný z experimentu je ve směru vyztužujících svazků vláken vyšší než ze simulace. Ostatní průběh vypočítaný podle teoretických rovnic je vyrovnaný a ve směru 45° k výztuži se hodnoty podélných modulů téměř neliší. Smykový modul v experimentu i simulaci působí v ploše výztuže od směru osnovy až po útkový směr. Hodnoty jsou stejné pro směry svazků vláken a pro směr úhlu 45° je smykový modul nejvyšší. Smykový modul ze simulace je mírně nižší pod úhlem 45°. Trend je přesto naprosto stejný.



Obr 18. Srovnání výsledků E_x experimentu a simulace v závislosti na směru silového působení

Měření na zjednodušeném vějíři řezů spolehlivě prokazuje, že Youngův modul (ale i ostatní elastické moduly) jsou v rovině kompozitu symetrické podle čtyřčetné osy. Struktura kompozitu má tedy čtyřčetnou osu symetrie, což lze teoreticky odvodit z geometrie plátňové vazby. Elastické parametry vykazují poměrně silnou anisotropii. To potvrzuje i skutečnost, že tři získané elastické parametry, Youngův modul, modul ve smyku a Poissonovo číslo jsou nezávislé.

5. Zhodnocení výsledků a nových poznatků

Závěrečná část stručně shrnuje dosažené výsledky, upozorňuje na jejich praktický význam a nastiňuje postup dalších prací.

V práci je použit jiný teoretický přístup, kdy jsou vlastnosti všech objektů popsány při použití metod krystalografie na základě bodové grupy odvozené z jejich struktury. Tento popis je mnohem přehlednější a ukázal, že v případě kompozitu s plátnovou vazbou je symetrie vyšší (čtyřčetná osa), než se běžně předpokládalo. Experiment tento závěr plně podpořil, podélný Youngův modul má symetrii podle čtyřčetné osy.

Dále byl v teoretické části zpřesněn složkový model kompozitu, tím že byly zavedeny tři typy strukturních buněk, které lépe zohledňují reálnou strukturu. Tyto typy buněk představují tři krajní případy. I přes to, že struktura není přesně respektována ani tímto modelem, je její vliv zahrnut do modelu daleko více, než u základního modelu kombinovaného z iso-stress a iso-strain modelů.

Pokud jde o experiment, dynamická měření poskytla poměrně přesné hodnoty všech tří nezávislých elastických parametrů pro rovinnou desku. Měření prokázalo, že elastické vlastnosti závisí na technologickém postupu a teorie tuto závislost kvalitativně vysvětlila.

Matematická aplikace připravených modelů byla realizována pomocí metody konečných prvků. Aplikovaná dynamická metoda simulace kmitů byla v souladu s experimentem a shoda teoretické předpovědi s experimentem byla uspokojivá. Připravené strukturní modely umožňují na základě vstupních elastických vlastností vláken a matrice a z předpokládané struktury spolehlivě odhadnout elastické vlastnosti produktu. Tím byly cíle práce naplněny.

V oblasti experimentu by se další práce měly soustředit na statická měření na vějíři řezů (více různých směrů) a získání příslušných elastických parametrů. Dále by bylo vhodné upravit model tak, aby vycházel z vlastností lamin a ne buněk. Aplikace metody konečných prvků by se měla provádět staticky, tak se získají spolehlivější hodnoty s praktickým využitím.

6. Práce autora se vztahem ke studované problematice

- [1] Vozková P.: Analýza strukturních defektů v tkaninových kompozitech C/C. s atlasovou vazbou. Diplomová práce. TU v Liberci, Liberec, 2003.
- [2] Vozková, P.: Classification of Voids' System in the Woven Composite Structure. Proceedings of the Conference Reinforced Plastics 2006, Balatonvilagos, Hungary, 2006, p. 165-172
- [3] Vozková, P.; Salačová, J.: Description/Possibilities: Ideal and Real Structure of Woven Composites. Proceedings of the Conference Texco 2006 International Material Conference, Ruzomberok, Slovakia, 2006, p. 147-152, ISBN 80-7372-102-3
- [4] Vozková, P.: Vlastnosti uhlíku. Práce ke zkoušce z PGS, TU v Liberci, 2006
- [5] Vozková, P.: Voids' System in the Woven Composite Structure. International forum on Textile Science and Engineering for Doctoral Candidates. Journal of Donghua University, Sanghai, China, 2006, p. 91-96, ISSN 1672-5220 English Edition.
- [6] Vozková, P.: Relation between Structure and Properties in Woven Composites. Proceedings of the Conference Strutex 13rd International Conference, TU v Liberci, 2006, p. 99-104 ISBN 80-7372-135-X
- [7] Vozková, P.: Možnosti popisu mechanických vlastností kompozitů. Práce ke zkoušce z PGS, TU v Liberci, 2006
- [8] Vozková, P.; Salačová J.: Elastic Properties of Woven Composite. CD Proceedings of the Conference Comsol Conference, Prague, 2006, ISBN 80-239-8131-5
- [9] Vozková, P.: Elastické vlastnosti tkaninových kompozitů. Proceedings of the Conference Vyztužené plasty 2007, Karlovy Vary, 2007, p. 31-36
- [10] Vozková, P.: Simulation of Woven Composite Properties. Proceedings of the 6th International Conference Textil Science, TU v Liberci, 2007, p. 71-72, ISBN 978-80-7372-207-4
- [11] Vozková, P.: Elastic Properties of Woven Composites. CD Proceedings of the Conference 15th Annual International Conference on Composites/Nano Engineering, Haikou, Hainan Island, China, 2007
- [12] Salačová, J.; Vozková, P.: Woven Composites – from Microscope Scanning to FEM Computing. Conference ICSAM-2007, Patras, Greece, 2007
- [13] Vozková, P.: Properties Modelling in the Woven Reinforced Composites. BEM-FEM Conference, St.Petersburg, Russia, 2007
- [14] Vozková, P.: Modelling of Elastic Properties of C/C Woven Composite. Conference Strutex 14th, TU v Liberci, 2007
- [15] Vozková, P.: Víceúrovňové modelování mechanických vlastností textilních kompozitů. Práce ke státní doktorské zkoušce, TU v Liberci, 2007
- [16] Vozková, P.: Elastic modulus FEM modelling of the layered woven composite material. kapitola v knize Recent Advances in Modelling and Simulation. Editor: Aleksandar Lazinica. I-Tech Education and Publishing, Vienna, Austria, ISBN 978-3-902613-25-7. (přijato k publikaci v 2008)
- [17] Vozková, P.; Salačová J.: FE modelling of textile reinforced composites and comparison with real testing. Conference TexComp9, Newark, Delaware, USA, 2008 (přijato k prezentaci v říjnu 2008)

7. Literatura

- [1] Agarwal, B.D.; Broutman, L.J.: Vláknové kompozity. SNTL, Praha, 1987
- [2] Cox, B.; Flanagan, G.: Handbook of Analytical Methods for Textile composites. Nasa Contractor Report 4750, Virginia, USA, 1997
- [3] Berthelot, J.-M.: Composite Materials. Mechanical Behavior and Structural Analysis. Springer-Verlag New York, USA, 1999
- [4] Savage, G.: Carbon-Carbon Composites. Chapman and Hall, London, UK, 1993
- [5] Broughton, B.; Lodeiro, M.J.: Environmental and Fatigue Testing of Fibre-Reinforced Polymer Composites. Centre for Materials Measurement and Technology, UK, 2000
- [6] Bogdanovich, A.E.; Pastore, C.M.: Mechanics of textile laminated composites. Chapman and Hall, London, UK, 1996
- [7] Kolektiv autorů: Composite material handbook. Volume 4. Metal matrix composites. Department of Defence, USA, 1999
- [8] Introduction to Nondestructive Testing. Prezentace organizace pro nedestruktivní testování The Collaboration for NDT Education. Vytvořeno 2002. <http://www.ndt-ed.org/GeneralResources/IntroToNDT/GenIntroNDT.htm>
- [9] Internetové stránky o nedestruktivním testování NDT net. Rolf Diederichs, vytvořeno: 2007-07-03. <http://www.ndt.net/ndtaz/ndtaz.php>
- [10] Černý, M.: Měření elastických konstant ortotropního materiálu ve tvaru desek a trubek metodou rezonančních frekvencí. Disertační práce. ČVUT, Praha, 2000
- [11] Černý, M.; Glogar, P.; Manocha, L.M.: Resonant frequency study of tensile and shear moduli of carbon fibre reinforced composites. Pergamon, Carbon 38 (2000) 2139-2149
- [12] Reddy, J.N.: An Introduction to the Finite Element Method. Third Edition, Mc Graw-Hill Higher Education, New York, 2006. ISBN 0-07-246685-5
- [13] Fitzer, E.; Manocha, L.M.: Carbon reinforcement and Carbon-Carbon Composites. Springer verlag, Berlin, 1998
- [14] Marvalová, B.: Určení efektivních mechanických vlastností kompozitů vyztužených tkaninou plátnové vazby. Docentská habilitační práce. TU v Liberci, Liberec, 2000
- [15] Lomov, S.V.; a kol: Meso-FE modelling of textile composites: road map, data flow and algorithms. International conference ICCM-15, Kyoto, Japan, 2007
- [16] Yurgartis, S.W.; Morey, K.; Jortner, J.: Measurement of yarn shape and testing in plain weave composites. Composites Science and Technology, Vol.46, No.1, 1993, 39-50
- [17] Seják, P.; Košek, M.: Analysis of Stochastic Character on Yarn Waviness in Woven Composites. Proc. of ICCE 11, University of New Orleans, New Orleans, USA, 2004
- [18] Verpoest, I.; Lomov, S.V.: Virtual textile composites software WiseTex: Integration with micro-mechanical, permeability and structural analysis. Science Direct, Composites Science and Technology 65 (2005) 2563-2574
- [19] Mikolanda, T., Lomov, S., Košek, M.: VRTex – a System for 3D Visualization of Textile Structures, Int. Conference STRUTEX 11, Liberec, 2004, p. 109-116

- [20] Šejnoha M.: Homogenizace heterogenních materiálů – podobnost mezi textilními kompozity a historickými zděnými konstrukcemi. Přednáška v rámci Centra pro jakost a spolehlivost výroby pro TUL TF. Liberec, 2007
- [21] Brepta, R.: Vlny napětí a rázové jevy v lineárně elastických a viskoelastických prostředích. TU v Liberci, Lenam, s.r.o. Liberec, Liberec, 1997, ISBN 80-7083-228-2
- [22] Brepta, R.; Půst, L.; Turek, F.: Mechanika kmitání. Technický průvodce 71. Sobotáles, Praha, 1994
- [23] Tomková, B.: Modelování termofyzikálních vlastností kompozitů s tkanou výztuží. Disertační práce. Technická univerzita v Liberci, Liberec, 2006
- [24] Miravete, A.: 3-D textile reinforcements in composite materials. Book of contributors. Woodhead Publishing Ltd Cambridge England and CRC Press USA, 2000
- [25] Stříž, B.: Mechanika textilií Část 2: Aplikace mechaniky kontinua. TUL, Liberec, 2002
- [26] Nye, J.F: Physical properties of crystals: their representation by tensors and matrices. Clarendon press, Oxford, 2004. ISBN 0-19-851165-5
- [27] Internetové stránky firmy Toray. Výrobní protokoly vláken T800, 2006. <http://www.torayusa.com/>
- [28] Internetové stránky Amazon.com – o materiálech od A do Z. <http://www.azom.com/>
- [29] Taljera, R.; Manson, J.-A.E.: Polymer Matrix Composites. Pergamon, Elsevier, Amsterdam, 2001
- [30] Comsol Multiphysics User's Guide Version 3.2. Structure Mechanical Module. 2005
- [31] Comsol Multiphysics 3. Školení programu Comsol Multiphysics. Humusoft s.r.o., 2004

8. Summary

The thesis deals with evaluation of mechanical properties of carbon/carbon composites with plain weave reinforcement. It is available to study their properties by non-destructive methods. The first main theme is measuring of elastic modules using excitation of vibrations through the composite body. The next it is simulation of the same parameters composite sample helping finite element method in standard software Comsol Multiphysics.

Textile reinforced composites are brittle material and it is destructed without plastic deformation when Hook's law is valid. It is detected a maximum tension in the material whereat do not happen material deformation and failure. It is used method of resonant frequency evaluated spectrum longitudinal and vertical vibrations. This helps to interpret whole symmetry analysis in the plate.

Geometry for simulation is based on idealised structure. The assumption of iso-stress and iso-strain conditions is widely used to simplify the homogenization process. It is possible to simulate tests with programming in finite element method. Relations describing stage, geometry and material properties are defined in program as precise as possible from experiment. Output is described as simulations in 2D for related properties.

For demonstration was modelled composite with Carbon graphitised reinforcement and Vitreous Carbon matrix. Fibers were premised transversely isotropic and matrix was defined as isotropic. System was defined as plate sheet with free ends in 2D. To the simulation in Comsol Multiphysics were included equations of the composite state and properties of the components.

Shrnutí

Disertační práce je založena na stanovení mechanických vlastností kompozitu C/C s plátňovou výztuží. Pro stanovení těchto vlastností bylo použito nedestruktivní testování. Jedno z hlavních témat je soustředěno na testování elastických modulů pomocí buzení vibrací v těle kompozitu. Dalším tématem je simulace elastických parametrů metodou konečných prvků v komerčním softwaru Comsol Multiphysics.

Kompozity s textilní výztuží jsou křehké materiály a destruuji se bez plastické deformace v oblasti, kdy je platný Hookeův zákon. Je detekováno maximální napětí v materiálu dokud nedochází k žádné nevratné deformaci ani poškození. Metoda rezonančních frekvencí umožňuje získání spektra podélných a příčných vibrací. To napomáhá k analyzování celkové symetrie kompozitní desky.

Geometrie kompozitní struktury využitá k simulaci je založena na určitém stupni idealizace. Nejjednodušší idealizace může být založena na jednoduchých modelech iso-stress a iso-strain. Pomocí metody konečných prvků a výpočetního softwaru však lze popsat strukturu důkladněji a definovat materiálové vlastnosti, geometrii, a stav tělesa mnohem přesněji. Výstupem je zde simulace dvou-dimenzionální struktury víceúrovňového modelu.

Pro simulaci byl modelován kompozit s grafitizovanou uhlíkovou výztuží a maticí blízkou skelnému uhlíku. Vlákná byla zjednodušena na příčně izotropní a matrice na izotropní symetrii. Systém byl definován jako deskový kompozit s volnými konci.

Vydala Textilní fakulta, Technické univerzity v Liberci
jako interní publikaci pod pořadovým číslem
DFT/12/2008 v počtu 20 výtisků