

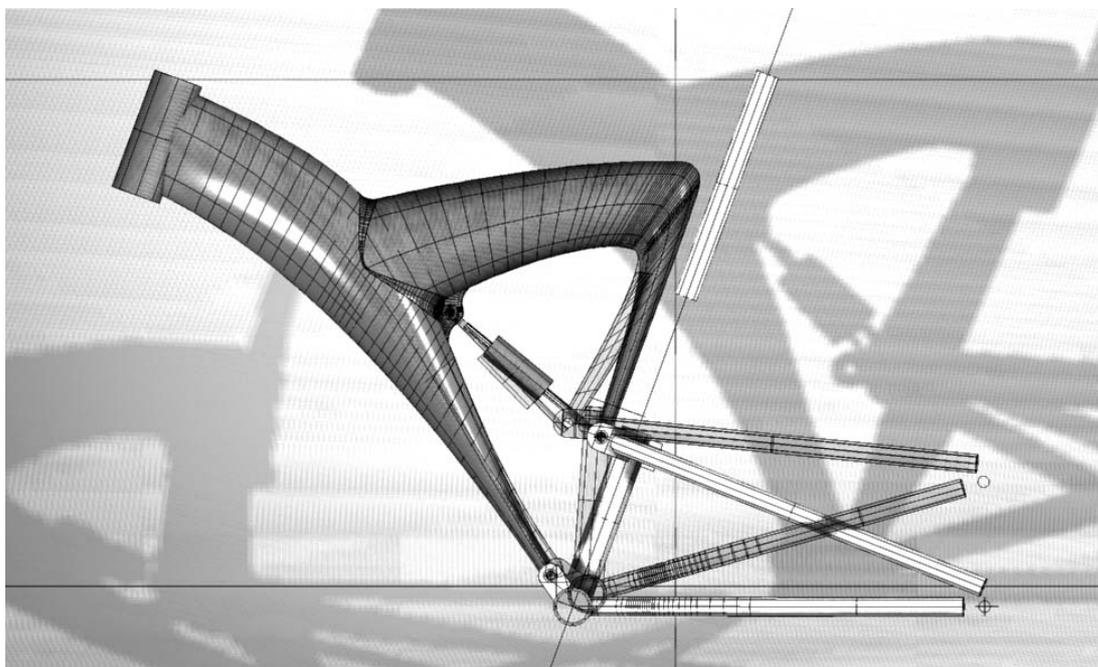
STRESS AND STRAIN ANALYSIS OF CONSTRUCTION PARTS MADE FROM COMPOSITE MATERIALS

L. Moláček*

Summary: This paper presents the numerical analysis of stress and strain state of composite materials. There is mentioned fundamental of basic types of anisotropic materials (anisotropic, ortotropic, transverse-ortotropic and isotropic). Behaviour of full suspension composite bicycle-frame is presented at the end of the paper. This frame would have to discharge claims on strenght, elasticity and stiffnes.

1. ÚVOD

Tento článek je věnován problematice pevnostní analýze a následně i optimalizaci tvaru (tloušťky) konstrukčního prvku, který je zhotoven z kompozitního materiálu. V našem případě je středem zájmu rám horského kola, který disponuje netradiční konstrukcí, ale i překvapujícími jízdními vlastnostmi. Tato nová koncepce rámu (obr.1) pochází z dílny designéra Mgr.Art.Pavla Masopusta.



Obr.1. Design rámu horského kola

K napjatostní optimalizaci zde zmiňovaného kompozitového rámu využívám program ANSYS 5.6, který pracuje v metodě konečných prvků.

* Ing. Lubomír Moláček, Fakulta strojní, VUT Brno, Technická 2, 619 69 Brno, molis@email.cz

Definice kompozitu

Slovo „*kompozitní*“ znamená vytvořený nebo skládající se nejméně ze dvou odlišných částí. Materiál mající dvě nebo více odlišných materiálových složek nebo fází je podle toho tedy složeným materiálem. Avšak jen tehdy, když mají vytvářející fáze značně rozdílné fyzikální vlastnosti, a po té i vlastnosti složeného materiálu jsou zřetelně odlišné od vlastností jeho složek, takový materiál nazýváme materiálem kompozitním. Do této skupiny nepatří běžné kovy a plasty, i když obsahují různé prvky. Tyto složky nevykazují dostatečně odlišné parametry (pevnost, tuhost, geometrie).

Kompozity tvoří jedna nebo více nespojitých fází, ponořených ve spojitě fázi. Diskontinuitní fáze je obvykle tvrdší a pevnější než spojitá fáze a nazývá se *vyztužení* nebo *vyztužovací materiál*, zatímco spojitá fáze se nazývá *matrice*. Vlastnosti kompozitů jsou silně ovlivňovány vlastnostmi svých materiálových složek, jejich distribucí a interakcí mezi nimi. Vlastnosti systému jsou funkcí objemových složek a geometrie vyztužujících vláken. Proto při popisu kompozitu jako materiálového systému je potřeba vedle specifikace materiálů složek a jejich vlastností specifikovat i geometrii vyztužení vzhledem k systému. Geometrie vyztužení může být popsána tvarem, velikostí a distribucí velikosti.

2. CHOVÁNÍ ANIZOTROPNÍHO MATERIÁLU

V této části bude srovnání anizotropních, ortotropních, příčně-ortotropních a izotropních materiálů. Budu zde především sledovat počet členů tuhostní matice a materiálové konstanty, které je třeba znát pro popsání jednotlivých kategorií.

Základní rovnice pro popis napjatosti lineárně elastického materiálu je Hookův zákon (1). Ve kterém je vyjádřen funkční vztah napětí, deformace a materiálových a geometrických charakteristik. V obecné podobě má tvar tenzoru napětí σ a tenzoru deformace ϵ , které mají po 6 složkách v prostorové úloze.

$$\sigma_i = C_{ij} \cdot \epsilon_j \quad (1)$$

C_{ij}matice elastických konstant

$$C_{ij} = fce(E_{ij}, G_{ij}, \nu_{ij}) \quad (2)$$

Anizotropní materiál

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{41} & C_{42} & C_{43} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{51} & C_{52} & C_{53} & C_{54} & C_{55} & C_{56} \\ C_{61} & C_{62} & C_{63} & C_{64} & C_{65} & C_{66} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \epsilon_3 \\ \epsilon_4 \\ \epsilon_5 \\ \epsilon_6 \end{bmatrix} \quad (3)$$

Matice elastických konstant C_{ij} obsahuje 21 nezávislých materiálových konstant pro popis anizotropního materiálu. To je podmíněno platností symetrie, $C_{ij} = C_{ji}$.

Ortotrovní materiál

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{bmatrix} \quad (4)$$

Jednosměrný kompozit lze považovat za ortotropní materiál, má své tři materiálové osy. Pro jeho popis potřebujeme 9 nezávislých materiálových konstant.

Nulové prvky matice C_{ij} vyjadřují nezávislost mezi délkovým přetvořením a smykovým napětím, mezi zkoso a normálovým napětím, nebo vzájemnou nezávislost mezi smykovým napětím a zkoso v různých rovinách. V tabulce 1 jsou vyčísleny počty materiálových konstant v matici C_{ij} pro různé typy materiálů.

Tab.1: Počty elastických parametrů pro různé typy materiálů a pro různé dimenze

Míra anizotropie materiálu	Dimenze úlohy					
	3-rozměrná		2-rozměrná		1-rozměrná	
	obec.s.s	spec.s.s.	obec.s.s	spec.s.s.	obec.s.s	spec.s.s.
Anizotropní	21	21	6	6	1	1
Ortotrovní	21	9	6	4	1	1
Příčně ortotropní	10	5	6	4	1	1
Izotropní	2	2	2	2	1	1

3. VÝPOČTOVÉ MODELOVÁNÍ

Při výpočtovém modelování ortotropního materiálu se musíme vyvarovat chybám, které vyplývají ze způsobu zadávání materiálových konstant. Ve výše uveřejněné tabuce je přehled počtu nutných materiálových charakteristik. V případě, kdy nezadáme kompletní počet materiálových charakteristik, si je program doplní sám podle defaultního nastavení.

Důležité je povšimnout si významů indexů v Poissonových číslech ν_{ij} . U nejčastěji používané konvence udává první index směr působícího napětí a druhý index představuje směr poměrné deformace, lze se však setkat i s opačným způsobem zápisu. Jedině správné použití nám může zaručit správnost výsledků v daném programu.

1.hlavní Poissonovo číslo ν_{ij} kde i -index udává směr působícího napětí a j -index udává směr určované poměrné deformace, potom platí

$$\frac{\nu_{ij}}{E_i} = \frac{\nu_{ji}}{E_j} \quad (5)$$

2.vedlejší Poissonovo číslo ν_{ij} kde i -index udává směr určované poměrné deformace a j -index udává směr působícího napětí. Tento způsob zápisu je využit v programu ANSYS, vedlejší Poissonovo číslo má symbol NUXY.

$$\frac{\nu_{ij}}{E_j} = \frac{\nu_{ji}}{E_i} \quad (6)$$

4. MODELOVÉ TĚLESO

Modelovým tělesem je kompozitový rám. Ten se skládá z několika dílů: zadní kyvná stavba, hlavní rám tvaru Y, který lze rozčlenit na tuhé a pružné části. Hlavní část rámu je zhotovena z různých kompozitních materiálů. Kompozitový rám byl řešen dvěma modely. První model byl kompletní rám řešený skořepinovými prvky. Druhý model je bližší zaměřen na pružící element, který je diskretizován objemovými prvky. Každou vrstvu v laminátu modeluji jako samostatnou usměrněnou laminu. U pružícího laminátu měním materiál ve vrstvách a úhel vrstev v laminátu je $\pm 5^\circ$, to je z důvodu únavové pevnosti.

Materiál

Sklo+epoxid

Výztuž: v podobě jednosměrné tkaniny (rovingy)

Směšovací poměr $V_f = 0.5$

Moduly pružnosti: $E_L = 46 \text{ GPa}$

$$E_T = 13.2 \text{ GPa}$$

Hlavní Poissonovo číslo $\nu_L = 0.26$

Uhlík+epoxid

Výztuž: v podobě jednosměrné tkaniny (rovingy)

Směšovací poměr: $V_f = 0.5$

Moduly pružnosti: $E_L = 150 \text{ GPa}$

$$E_T = 11.8 \text{ GPa}$$

Hlavní Poissonovo číslo $\nu_L = 0.26$

Typy prvků

Při torbě modelu jsem použil objemové, povrchové a nosníkové prvky. Objemové prvky jsem použil k řešení pružného elementu, tyto prvky obsahovaly 8 uzlových bodů. Solid prvky lépe popisují průběh napjatosti na modelu. Při použití skořepinových prvků je napětí a deformace aritmetickým průměrem po tloušťce. Skořepinovými prvky jsem modeloval hlavní kompozitovou část rámu. Zadní kyvnou část jsem nahradil nosníkovými prvky, tato část rámu nebyla zájmem sledování.

Vnější zatížení

Vnější zatížení jsem umístil na zadní osu kola nebo na osy pedálů. Velikost zatížení jsem zadával konstantní. Sumu zátěžných sil jsem volil ve velikostech 1000N, 2000N a 5000N ve směru osy y, tj. ve směru vektoru gravitačního zrychlení. Velikost zátěžných sil jsem konzultoval s pracovníky firmy Hottinger Baldwin Messtechnik sídlící v Brně. Na půdě této firmy jsem provedl experimentální měření s cílem získání maximálních špiček zatížení, které je schopen vyvinout člověk vlastní tíhou.

Výpočtový model jsem vázal v prostoru vazbami typu vetknutí v místě hlavového složení a obecnou vazbou pro případ zatěžování do pedálových os v místě zadní osy kola.

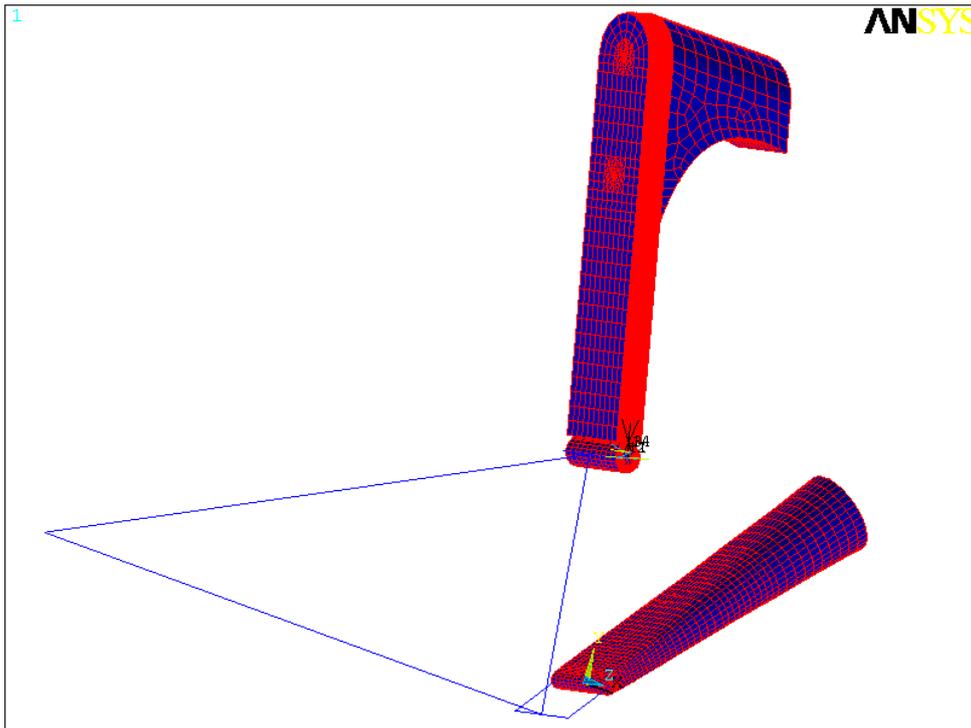
5. ZÁVĚR

Z provedených výpočtů jsem dospěl k rozvržení tloušťky sklolaminátové skořepinové konstrukce rámu. Zmapoval jsem oblasti se špičkovými hodnotami napětí a též i deformace. Z výpočtu jsem obdržel hodnoty propružení (průhybu) pružícího elementu bicyklu pro sumy vnějšího silového zatížení (1000N, 2000N, 5000N). Do rámu kola bude včleněna tlumící jednotka, která nám zaručí přípustnou deformaci ε_c a zklidní jízdní vlastnosti bicyklu.

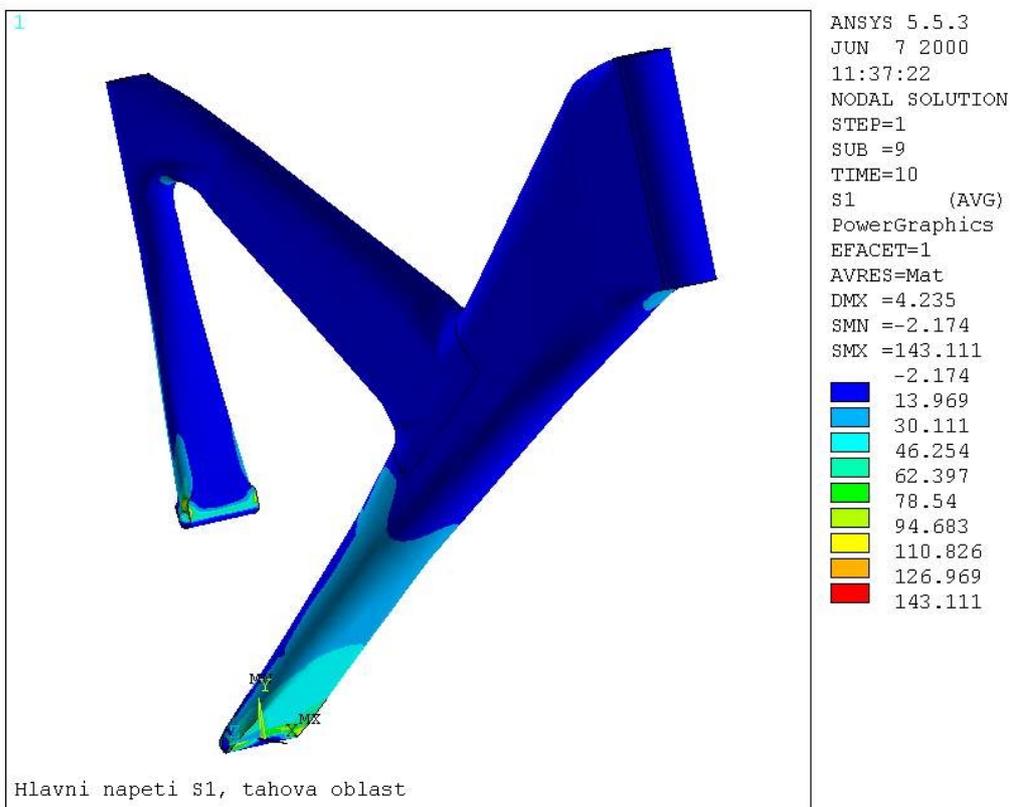
Na závěr bych chtěl především poděkovat mému školiteli Prof. RNDr. Ing. Janu Vrbkovi, DrSc. za cenné rady a pomoc při zpracování dané problematiky a dále můj dík patří i odborným pracovníkům firmy Hottinger Baldwin Messtechnik sídlící v Brně, kteří mě umožnili provést experimentální měření na jejich zařízení.

6. REFERENCES

- [1] Tsai S.W., Hahn H.T.: Introduction to Composite Materials, Technomic Publishing Company, Inc., 1980.
- [2] Burša J., Janíček P., Deutscher J.: Výpočtové modelování neizotropních vlastností materiálů, Ústav mechaniky těles, VUT-FS, 1997.
- [3] Agarwal B.D., Broutman L.J.: Vláknové kompozity, Praha, SNTL, 1987.
- [4] R&G GmbH Faserverbundwerkstoffe D-71107 Waldenbuch, Katalog 6, 1992.
- [5] Ballantine R., Grant R.: Velká kniha o bicyklech, Gemini Limited, Bratislava, 1993.
- [6] Composite Science and Technology, International conference ICCT/3, Durban, South Africa, 2000.
- [7] Fürbacher I., Macek K., Steidl J. a kolektiv autorů: Lexikon technických materiálů, část 10, díl 3, kap.2, č. 3.2-1, Verlag Dashöfer, 2001.
- [8] Hyer, M. W., Waas, A. M.: Micromechanics of Linear Elastic Continuous Fiber Composites, Comprehensive Composite Materials, 1, USA, 2000.
- [9] Zok, F. W.: Fracture and Fatigue of Continuous Fiber-reinforced, Metal Matrix Composites, Comprehensive Composite Materials, 3, CA, USA, 2000.
- [10] Talreja, R.: Fatigue of Polymer Matrix Composites, Comprehensive Composite Materials, 3, CA, USA, 2000.
- [11] ANSYS Online Help, 1999.



Obr.2. Zjednodušený model pružícího elementu.



Obr.3. Rozložení hlavního napětí u skořepinového modelu .