



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta strojní
12120 - Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel

Rešerše použití karbonových poloos pro vůz Formula Student

Analysis of CFRP Half Shaft Design for Formula Student Vehicle

Bakalářská práce

Studijní program: Teoretický základ strojního inženýrství

Studijní obor: bez oboru

Vedoucí práce: Ing. Nikita Asteaverkhau

Alexander Kolomiets

Praha 2015

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma Rešerše použití karbonových poloos pro vůz Formula Student vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenu, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum

.....

Alexander Kolomiets

Abstrakt

Bakalářská práce je rozdělena do dvou částí. V první části je popsána metodika návrhu poloosy s uhlíkových vláken zatíženou krouticím momentem. Dále je popsán samotný návrh a kontrola pevnosti karbonové poloosy podle požadavků z vozu FS.06 kategorie Formula Student. V druhé části je popsán návrh lepeného spoje poloosy a homokinetického kloubu typu tripod.

Klíčová slova: *Poloosa, kompozit, teoretický návrh, kontrola pevnosti, lepený spoj.*

Abstract

The thesis is divided into two parts. The first section describes the methodology of design the carbon fiber half shaft under torque load. It also describes the proposal and control the torsion strength carbon fiber half shaft according to the requirements of the vehicle FS.06 Formula Student category. The second part describes the design of bonded joint of half shaft and homokinetic tripod type joint.

Keywords: *half shaft, composite, theoretical design, strength control, bonded joint.*

Poděkování

Za cenné rady a pomoc bych chtěl poděkovat vedoucímu bakalářské práce Ing. Nikitě Astraverkhau.

Osobně bych chtěl poděkovat své rodině a kamarádům za podporu po celou dobu studia.

Obsah

Abstrakt.....	3
Poděkování	4
Obsah.....	5
Úvod	6
1 Funkce polosy	7
1.1 Zatížení	7
1.1.1 První krok: přímočarý pohyb	8
1.1.2 Druhý krok: otačení a smyk	9
1.1.3 Třetí krok: maximální dynamické zatížení.....	9
2 Výpočet ocelové poloosy.....	10
3 Kompozit	12
3.1 Laminát.....	13
4 Analýza laminátů	14
5 Teorie pevnosti v krutu	16
5.1 Ztráta stability	16
5.2 Pevnost v krutu	17
6 Vlastní návrh	19
7 Lepený spoj.....	21
7.1 Opravné faktory.....	22
7.1.1 Druh materiálu.....	22
7.1.2 Druh spoje	22
7.1.3 Skutečná vůle.....	22
7.1.4 Geometrie	22
7.2 Výpočtová část	23
7.3 Únava spoje.....	23
8 Výsledek.....	25
Závěr	26
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	27
Příloha 1 Karbonová poloosa s uložením tripodu	28
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	29

Úvod

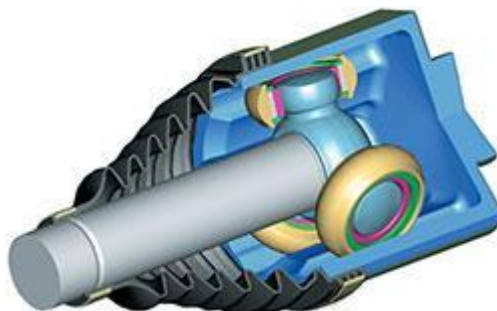
V dnešní době jsou kompozitní materiály používané v různých oblastech, např.: stavebnictví, letectví, medicína, sport, auta atd. Autosport je velmi významnou oblastí použití kompozitních materiálů, zvláště uhlíkového vlákna, kvůli svým vlastnostem (nízká hmotnost, vysoké pevnostní charakteristiky). Závodní týmy kategorie Formula Student používá karbonové vlákno pro stavbu sportovního vozu. Z kompozitních materiálů se skládá, např.: karosérie, ráfky, hřídele, zavěšení atd. V této práci bude popsán návrh složení karbonové poloosy podle požadavků z vozu FS.06 týmu ČVUT.(obr.1)



Obr. 1 Vůz FS. 06 kategorie Formula Student [1]

1 Funkce polosy

Poloosa je systém, který přenáší výkon a kroutící moment od diferenciálu na kola a zároveň musí zajistit potřebnou pohyblivost kola vzhledem k řízení a zavěšení. Tento systém obsahuje samotnou poloosu a dva homokinetické klouby.(obr. 1.1). Tým ČVUT Formula Student používá homokinetické klouby typu tripod. Tripod se skládá z tělesa, třech jehlových ložisek, krytu a gumového těsnění.



Obr. 1.1 Uložení poloosy v homokinetickém kloubu [2]

Jak je vidět na obr.1.1 pomocí jehlových ložisek, uložených do drážek se může poloosa otáčet a vyvolávat axiální pohyb.

1.1 Zatížení

Na kolo působí třecí síla, osová síla, tahová síla, reakční síla a kroutící moment. Uvedené síly tvoří ohybové momenty. Osová síla navíc působí tahem a tlakem. Formula Student používá lichoběžníkové zavěšení, které odstraňuje ohybové momenty a tah/tlak. Poloosa je zatížena pouze kroutícím momentem. Pro náš návrh budeme potřebovat znát, jaké momenty působí na poloosu během provozu. Pro stanovení těchto momentů potřebujeme technické údaje vozu:

Hmotnost vozu (bez pilota): 197kg

Hmotnost vozu (s pilotem): 270kg

Rozložení hmotnosti (vpředu:vzadu): 45:55%

Pneumatiky (vpředu/vzadu): Hoosier 18,0×7,5 -10 R25B/Hoosier 18,0×7,5 – 10 R25B

Maximální kroutící moment na diferenciálu: 465 Nm

Výpočet momentů, které působí na poloosu bude rozdělen na tři kroky.

1.1.1 První krok: přímočarý pohyb [3]

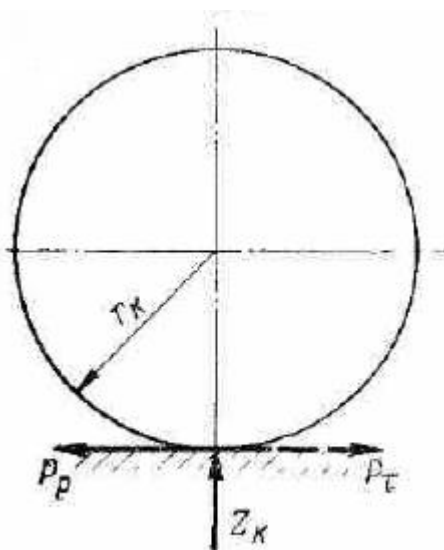
Při přímočarém pohybu auto vyvolává tahovou sílu P_p . Při brzdění auto vyvolává brzdnu sílu. Maximální tahovou sílu lze spočítat dle vzorce:

$$P_p = Z_k \times \varphi$$

Maximální brzdná síla bude

$$P_\tau = Z_k \times \varphi_\tau$$

kde Z_k je reakce kola. Reakce kola má stejnou velikost, jako tíhová síla, ale opačný směr (obr. 1.2). Pro výpočet reakce potřebujeme znát hmotnost na jedno kolo.



Obr. 1.2 Reakce kola Z_k [3]

Rozložení hmotnosti (vpředu:vzadu) je 45:55%, hmotnost auta s pilotem je 270 kg, takže na zadní kola působí $270 \times 0,55 = 148,5$ kg. Uvažujeme symetrické rozložení hmotnosti na zadní nápravě a z toho vyplývá, že na jedno kolo působí hmotnost $m = 148,5 \div 2 = 74,25$ kg. Reakce kola spočítáme podle vzorce:

$$Z_k = m \times g = 74,25 \times 9,81 = 728,39 \text{ N}$$

Adhezní součinitel $\varphi = 0,9$, výsledná tahová síla je

$$P_p = Z_k \times \varphi = 728,39 \times 0,9 = 655,51 \text{ N}$$

Adhezní součinitel pro brzdnu sílu bude $\varphi_\tau = 1,2$, výsledná síla je

$$P_\tau = Z_k \times \varphi_\tau = 728,39 \times 1,2 = 874,06 \text{ N}$$

Tahová a brzná síly vyvolává kroučící momenty opačných směru, který působí na kolo a tím pádem i na poloosu. Pro výpočet těchto momentu potřebujeme znát poloměr kola. Vůz FS.06 používá pneumatiky o průměru $d = 18,3''$. Převedeme průměr na metrický systém.

$$1'' = 0,0254 \text{ m}$$

$$d = 18,3'' = 0,464 \text{ m}, r_k = 0,232 \text{ m.}$$

Výsledný tahový moment je:

$$M_p = P_p \times r_k = 655,51 \times 0,232 = 152,3 \text{ Nm}$$

Brzdný moment je:

$$M_\tau = P_\tau \times r_k = 874,06 \times 0,232 = 202,78 \text{ Nm}$$

1.1.2 Druhý krok: otačení a smyk [3]

Při otáčení auta na kolo působí osová síla, která tvoří tlak/tah a ohybový moment. Ve vozu kategorie Formula Student tyto síly a ohybový moment působí jen na zavěšení, poloosa je zatížena pouze kroučícím momentem, proto druhý krok pro nás je zanedbatelný.

1.1.3 Třetí krok: maximální dynamické zatížení [3]

Maximální dynamické zatížení vzniká při náhlém startu auta. To znamená, že v jeden okamžik na poloosu působí moment od diferenciálu a kolo ještě zůstává v klidu. Při náhlém šlápnutí na plyn, při zablokovaném diferenciálu, bude celkový moment působit na jednu poloosu. Maximální moment je 465 Nm.

2 Výpočet ocelové poloosy

Nejdřív zjistíme parametry ocelové poloosy, pro porovnání s naší variantou. Český tým Formula Student používá poloosy výrobce Taylor Race Engineering (obr. 3.1). Poloosa je vyrobená z oceli třídy 4340 (ocel nízkolegovaná niklem, chromem a molybdenem). Vlastnosti oceli jsou uvedené v tab. 2.1



Obr. 3.1 Ocelová poloosa výrobce Taylor Race Engineering [4]

Pevnost v tahu [MPa]	745
Mez pevnosti v krutu [MPa]	430
Mez únavy v krutu [MPa]	187
Modul objemové pružnosti [GPa]	140
Modul pružnosti ve smyku [MPa]	80
Modul pružnosti [GPa]	190-210
Hustota [kg/m ³]	7850 kg/m ³

Tab. 2.1 Vlastnosti oceli 4340 [5]

Technické údaje:

$$D = 20,3 \text{ mm}$$

$$L_1 = 510 \text{ mm}$$

$$L_2 = 460 \text{ mm}$$

$$m_1 = \rho \times \frac{\pi \times D^2}{4} \times L_1 = 7850 \times \frac{\pi \times 0,0203^2}{4} \times 0,51 = 1,296 \text{ kg}$$

$$m_2 = \rho \times \frac{\pi \times D^2}{4} \times L_2 = 7850 \times \frac{\pi \times 0,0203^2}{4} \times 0,46 = 1,169 \text{ kg}$$

Protože poloosa může být zatížena maximálním kroutícím momentem při náhlém šlapnutí na plyn a zablokovaném diferenciálu, spočítáme maximální dovolený moment.

$$\tau_{max} = \frac{M_{k_{max}}}{W_k} \Rightarrow$$

$$M_{k_{max}} = \tau_{max} \times W_k = \frac{\tau_{max} \times D^3 \times \pi}{16} = \frac{430 \times 20,3^3 \times \pi}{16 \times 1000} = 706,3 \text{ Nm}$$

$$M_k = 465 \text{ Nm}$$

$$k_{max} = \frac{M_{k_{max}}}{M_k} = \frac{706,3}{465} = 1,52$$

Poloosa během provozu je zatížena proměnným kroutícím momentem. Pro výpočet koeficientu bezpečnosti použijeme mez únavy v krutu.

$$\tau_{mez} = 0,25 \times R_m = 0,25 \times 745 = 186,25$$

$$M_p = 202,78 \text{ Nm}$$

$$\tau_{mez} = \frac{M_{k_{mez}}}{W_k} \Rightarrow M_{k_{mez}} = \tau_{mez} \times W_k = \frac{\tau_{mez} \times D^3 \times \pi}{16} = \frac{186,25 \times 20,3^3 \times \pi}{16 \times 1000} = 307 \text{ Nm}$$

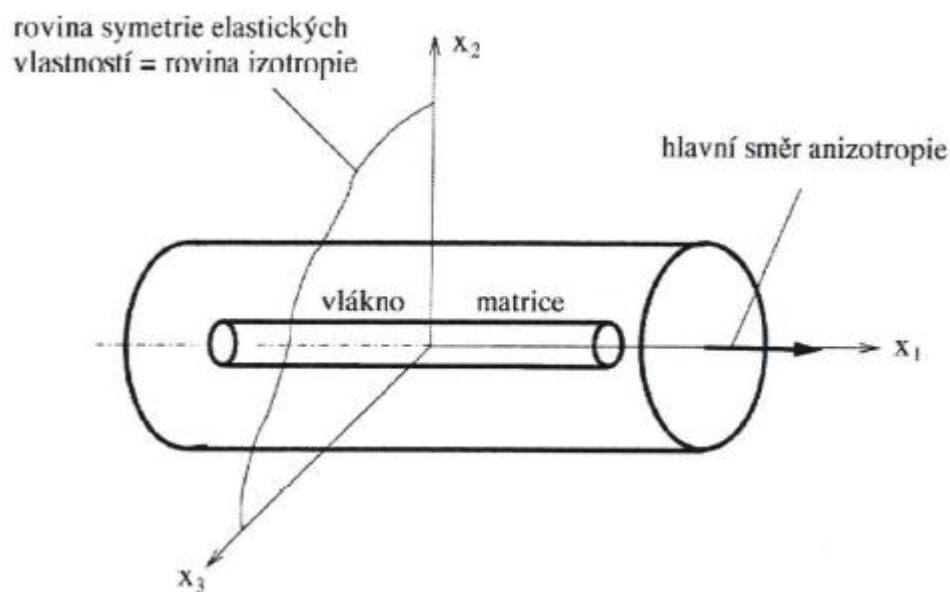
$$k_{mez} = \frac{M_{k_{mez}}}{M_p} = \frac{307}{202,78} = 1,51$$

Jak je vidět z výpočtů, maximální kroutící moment při střídavém zatěžování je výrazně menší než při statickém namáhání. Nicméně, případ, kdy poloosa bude zatížena maximálním statickým momentem nastává zřídka (podmínkou je náhlé šlapnutí na plyn při zablokovaném diferenciálu). Takové zatížení není považováno za cyklické. To znamená, že poloosa odpovídá pevnostním podmínkám.

3 Kompozit

Kompozitní materiál, je materiál, který obsahuje dvě nebo více složek. Tyto složky mají různé mechanické vlastnosti. Pro náš návrh budeme používat kompozit, složený z uhlíkových vláken a epoxidové matrice. Uhlíkové vlákno má vysokou pevnost v podélném směru a nízkou pevnost v příčném. Matrice slouží k udržování vláken v jednom směru.

Kompozitní materiál z uhlíkového vlákna a epoxidové matrice, je popsán jako příčně izotropní materiál. Kompozit má různé vlastnosti v příčném a podélném směru. Na obr. 3.1 je znázorněn případ příčně izotropního materiálu. [6]



Obr. 3.1 Příčně izotropní materiál [6]

Pro návrh karbonové poloosy budeme potřebovat znát vlastnosti uhlíkového vlákna a matrice, objemový podíl vlákna v kompozitu. Výpočet těchto vlastností probíhá podle následujících vzorců:

$$E_L = V_f \times E_f + V_m \times E_m$$

$$E_T = \frac{E_f \times E_m}{V_f \times E_f + V_m \times E_m}$$

$$\nu_{LT} = V_f \times \nu_f + V_m \times \nu_m$$

$$G_{LT} = \frac{G_m}{1 - V_f \times \left(1 - \frac{G_m}{G_f}\right)}$$

3.1 Laminát

Pro výrobu součástí z kompozitních materiálů nestačí jedna vrstva materiálu, ale více. Složení dvou nebo více vrstev kompozitu tvoří laminát.

„Při výpočtu laminátu, který budeme uvažovat jako tenkou desku, budou následující předpoklad:

- *Každá lamina je ortotropní a kvazihomogenní*
- *Tloušťka laminy ve srovnání s délkou a šířkou je velmi malá*
- *Spoj mezi laminami je dokonalý, a proto je posunutí spojité*
- *Posunutí v příčném směru není lineární*
- *Vzhledem k tomu, že tloušťka laminátu je velmi malá, je možno uvažovat rovinný stav napjatosti.*
- *příčná zkosení $\gamma_{xz} = \gamma_{yz} \doteq 0$ a proto zůstanou kolmice ke středové ploše kolmé i po deformaci a budou přímkové*
- *normálová vzdálenost od středové roviny zůstává konstantní, a proto lze zanedbat přetvoření v příčném směru“ [6]*

4 Analýza laminátů

Provedeme analýzu pomocí Klasické Laminární Teorie (CLT). Napětí v laminátu lze popsat podle Hookova zákona rozepsáného v maticovém tvaru

$$\begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix}_k = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & Q_{16} \\ Q_{21} & Q_{22} & Q_{26} \\ Q_{61} & Q_{62} & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx}^\circ \\ \varepsilon_{yy}^\circ \\ \gamma_{xy}^\circ \end{bmatrix} + z \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & Q_{16} \\ Q_{21} & Q_{22} & Q_{26} \\ Q_{61} & Q_{62} & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{bmatrix}$$

Z tohoto zákona lze zjistit síly a momenty působící na laminu

$$\mathbf{N} = \begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{bmatrix} = \sum_{k=1}^n \int_{h_{k-1}}^{h_k} \begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix} dz \quad \mathbf{M} = \begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \sum_{k=1}^n \int_{h_{k-1}}^{h_k} \begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix} z dz$$

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{k=1}^n \mathbf{Q}_k \int_{h_{k-1}}^{h_k} dz \\ \sum_{k=1}^n \mathbf{Q}_k \int_{h_{k-1}}^{h_k} z dz \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx}^\circ \\ \varepsilon_{yy}^\circ \\ \gamma_{xy}^\circ \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \sum_{k=1}^n \mathbf{Q}_k \int_{h_{k-1}}^{h_k} z dz \\ \sum_{k=1}^n \mathbf{Q}_k \int_{h_{k-1}}^{h_k} z^2 dz \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{k=1}^n \mathbf{Q}_k \int_{h_{k-1}}^{h_k} z dz \\ \sum_{k=1}^n \mathbf{Q}_k \int_{h_{k-1}}^{h_k} z^2 dz \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx}^\circ \\ \varepsilon_{yy}^\circ \\ \gamma_{xy}^\circ \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \sum_{k=1}^n \mathbf{Q}_k \int_{h_{k-1}}^{h_k} z^2 dz \\ \sum_{k=1}^n \mathbf{Q}_k \int_{h_{k-1}}^{h_k} z^3 dz \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \\ M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} & B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ A_{21} & A_{22} & A_{26} & B_{21} & B_{22} & B_{26} \\ A_{61} & A_{62} & A_{66} & B_{61} & B_{62} & B_{66} \\ B_{11} & B_{12} & B_{16} & D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ B_{21} & B_{22} & B_{26} & D_{21} & D_{22} & D_{26} \\ B_{61} & B_{62} & B_{66} & D_{61} & D_{62} & D_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx}^\circ \\ \varepsilon_{yy}^\circ \\ \gamma_{xy}^\circ \\ k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{bmatrix} \quad \begin{aligned} A_{ij} &= \sum_{k=1}^n (Q_{ij})_k (h_k - h_{k-1}) \\ B_{ij} &= \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n (Q_{ij})_k (h_k^2 - h_{k-1}^2) \\ D_{ij} &= \frac{1}{3} \sum_{k=1}^n (Q_{ij})_k (h_k^3 - h_{k-1}^3) \end{aligned}$$

Důležitým prvkem pro nás je matice vazební tuhosti B, která spojuje složky momentů a složky normalových vnitřních sil. Znamená to, že normálové a smykové síly způsobí nejen přetvoření, ale taky i ohybání a zkroucení. Pro náš případ (plocha je

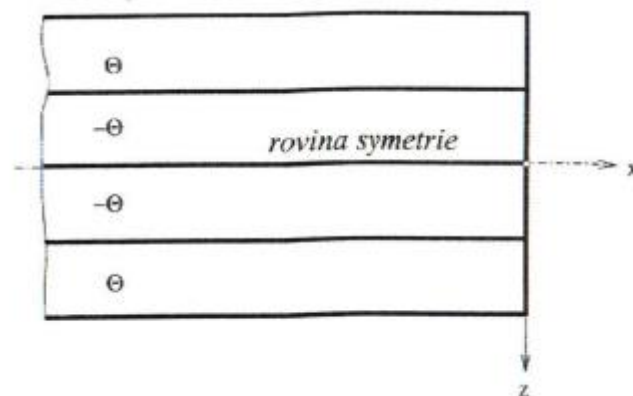
zatížená jen kroutícím momentem) je vhodné odstranit vazby mezi tahem, ohybem a krutem. Pro lamináty tohoto typu platí:

$$B = 0, A_{16} = A_{26} = 0$$

A po úpravě dostaneme

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \\ M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ A_{21} & A_{22} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & A_{66} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ 0 & 0 & 0 & D_{21} & D_{22} & D_{26} \\ 0 & 0 & 0 & D_{61} & D_{62} & D_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx}^\circ \\ \varepsilon_{yy}^\circ \\ \gamma_{xy}^\circ \\ k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{bmatrix}$$

Aby tento předpoklad platil, potřebujeme skládat vrstvy stejné tloušťky ve tvaru $[\Theta, -\Theta, -\Theta, \Theta]$, jak je ukázáno na obr. 5.2. Lamináty tohoto typu se nazývají vyrovnané symetrické lamináty.



Obr.5.2 Vyrovnaný symetrický laminat [6]

5 Teorie pevnosti v krutu

Výpočet pevnosti poloosy můžeme rozdělit na dvě části: ztráta stability v krutu a pevnost v krutu.

5.1 Ztráta stability

Při zatížení kompozitní trubky kroučícím momentem může dojít nejenom k porušení vláken, ale i ke ztrátě stability a deformace trubky. Odolnost oproti této deformaci musí být větší než pevnost vláken v krutu. Pro výpočet kritického kroučícího momentu použijeme experimentálně zjištěné rovnice, uvedené v [7]:

$$T = \frac{1,854}{\sqrt{L}} \times E_1^{0,375} \times E_2^{0,625} \times t^{2,25} \times D^{1,25}$$

$$T = \frac{2.289}{\sqrt{L}} \times E_1^{0,375} \times E_2^{0,625} \times t^{2,25} \times D^{1,25}$$

kde

E_1 je modul pružnosti ve směru osy rotace

E_2 je modul pružnosti ve směru kolmém na osu rotace

L je délka poloosy

t je tloušťka poloosy

D je maximální průměr poloosy

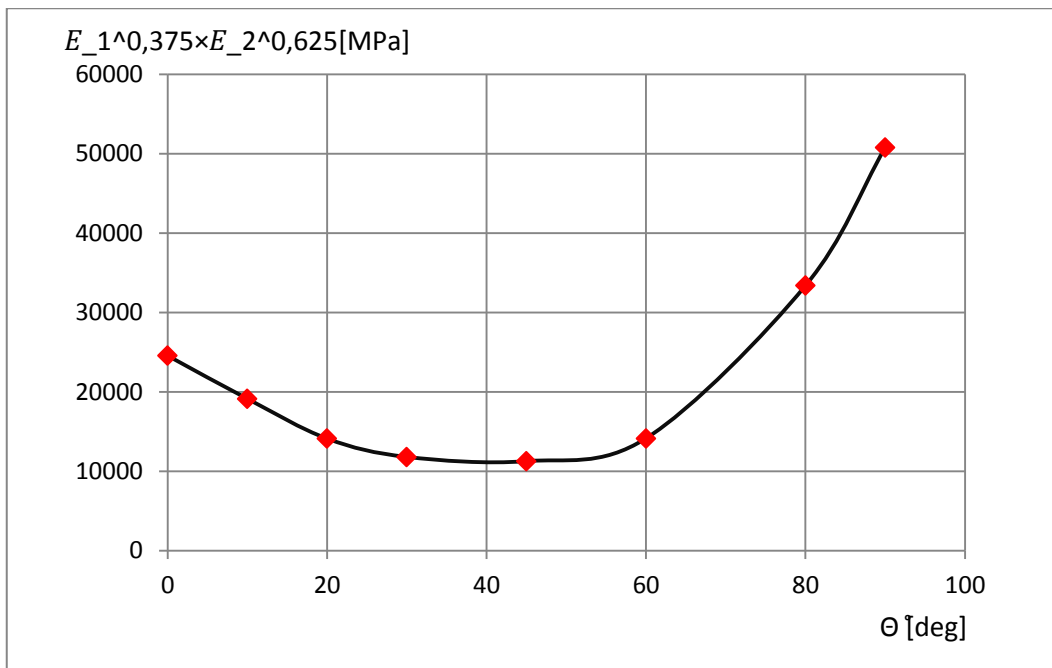
Z požadavku pro vůz FS.06 kategorie Formula Student známe délku a maximální průměr poloosy, proto pro náš návrh torzní tuhost bude záviset na modulu pružnosti a tloušťce laminátu. Moduly pružnosti zjistíme z následujících vztahů.

$$\frac{1}{E_1} = \frac{\cos^4 \theta}{E_L} + \frac{\sin^4 \theta}{E_T} + \left(\frac{1}{G_{LT}} - \frac{2 \times \nu_{LT}}{E_L} \right) \times \sin^2 \theta \times \cos^2 \theta \quad [6]$$

$$\frac{1}{E_2} = \frac{\sin^4 \theta}{E_L} + \frac{\cos^4 \theta}{E_T} + \left(\frac{1}{G_{LT}} - \frac{2 \times \nu_{LT}}{E_L} \right) \times \sin^2 \theta \times \cos^2 \theta \quad [6]$$

Z toho je vidět, že moduly pružnosti ve směru osy X a osy Y závisí na úhlu natočení vláken, takže :

$E_1^{0,375} \times E_2^{0,625}$ je funkce úhlu θ . Tuto závislost je znázorněná na obr. 5.1.



Obr. 5.1 Závislost $E_1^{0,375} \times E_2^{0,625}$ na úhlu natočení

Jak je vidět z obr. 5.1 největších hodnot nabývá $E_1^{0,375} \times E_2^{0,625}$ pro úhel $\theta = 70^\circ$ a výš. Nejmenší hodnoty jsou pro úhel $\theta = 45^\circ$. Pokud budeme používat tento úhel musíme zvětšit tloušťku poloosy.

5.2 Pevnost v krutu

Pro kontrolu pevnosti volíme kritérium maximálního napětí

$$\begin{aligned} -F_{Lc} &\leq \sigma_L \leq F_{Lt} \\ -F_{Tc} &\leq \sigma_T \leq F_{Tt} \\ -F_{LT} &\leq \tau_{LT} \leq F_{LT} \end{aligned}$$

Na poloosy působí čistý krut

$$M_k = 2 \times \pi \times R \times (R \times N_{xy} + B_{16}^* \times N_x + B_{26}^* \times R_p) \quad [8]$$

Protože jsme zvolili symetricky vyrovnaný laminát, prvky B_{16}^* a B_{26}^* budou nulové a rovnice se upraví na tvar:

$$M_k = 2 \times \pi \times R \times R \times N_{xy}$$

a výsledná smyková síla je:

$$N_{xy} = \frac{M_k}{2 \times \pi \times R^2}$$

Tuto sílu dosadíme do programu Lamiex 3.1 a zjistíme napětí.

Protože budeme mít úhly natočení odlišné od nuly, potřebujeme převést hodnoty napětí na souřadnicový systém laminátu,

$$\begin{bmatrix} \sigma_L \\ \sigma_T \\ \tau_{LT} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos^2 \Theta & \sin^2 \Theta & 2 \sin \Theta \cos \Theta \\ \sin^2 \Theta & \cos^2 \Theta & -2 \sin \Theta \cos \Theta \\ -\sin \Theta \cos \Theta & \sin \Theta \cos \Theta & \cos^2 \Theta - \sin^2 \Theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \tau_{xy} \end{bmatrix}$$

a to přepíšeme do tvaru rovnic:

$$\sigma_L = \cos^2 \theta \times \sigma_{xx} + \sin^2 \theta \times \sigma_{yy} + 2 \times \sin \theta \times \cos \theta \times \tau_{xy}$$

$$\sigma_T = \cos^2 \theta \times \sigma_{xx} + \sin^2 \theta \times \sigma_{yy} + 2 \times \sin \theta \times \cos \theta \times \tau_{xy}$$

$$\tau_{LT} = -\sin \theta \times \cos \theta \times \sigma_{xx} + \sin \theta \times \cos \theta \times \sigma_{yy} + (\cos^2 \theta - \sin^2 \theta) \times \tau_{xy}$$

Jak je vidět z rovnic, nejlepší volbou je úhel $\pm 45^\circ$, protože se odstraní smykové napětí τ_{LT} .

6 Vlastní návrh

Laminát se bude skládat z 12 vrstev a každá bude mít tloušťku 0,25 mm. Úhly natočení vrstev jsou [45,-45, 45,-45,45,-45,-45,45,-45,45,-45,45]. Kompozit se skládá z uhlíkového vlákna T600 a epoxidové matrice. Vlastnosti složek jsou uvedené v Tab.6.1

E_{fl}[MPa]	230000	ν_{LT}[-]	0,335
E_{ft}[MPa]	15000	ν_{TT}[-]	0,018
G_f[MPa]	50000	E_m[MPa]	4500
ν_f[-]	0,3	G_m[MPa]	1600
E_L[MPa]	139800	ν_m[-]	0,4
E_T[MPa]	7759	V_f[%]	65
G_{LT}[MPa]	3817	ρ [kg/m³]	1530
F_{Lt}[MPa]	900	F_{Lc}[MPa]	2490
F_{Tt}[MPa]	50	F_{Tc}[MPa]	230
F_{LT}[MPa]	100		

Tabulka 6.1. Vlastnosti vlákna, matrice a laminy

Vlastnosti celého laminátu jsou vidět v tabulce 6.2

E_x[MPa]	13888
E_y[MPa]	13888
G_{xy}[MPa]	35800
ν_{xy}[-]	0,8194
ν_{yx}[-]	0,8194

Tabulka 6.2. Vlastnosti laminátu

Průměr trubky je 20,3 mm, délka je 510 mm, kritický kroutící moment je:

$$T = \frac{1,854}{\sqrt{510}} \times 13888^{0,375} \times 13888^{0,625} \times 3^{2,25} \times 20,3^{1,25} = 11116530 \text{ Nmm}$$

$$= 1111,653 \text{ Nm}$$

$$T = \frac{2,289}{\sqrt{510}} \times 13888^{0,375} \times 13888^{0,625} \times 3^{2,25} \times 20,3^{1,25} = 13724780 \text{ Nmm}$$

$$= 1372,478 \text{ Nm}$$

Maximální kroutící moment, kterým může být zatěžována poloosa je 465 Nm. Při porovnání M_k a T zjistíme, že celkový kroutící moment je 2,39 až 2,95 krát menší než kritický moment T .

Pomocí programu Lamiex 3.1 zjistíme složky napětí σ_L , σ_T a τ_{LT}

$$\sigma_L = 461 \text{ MPa}$$

$$\sigma_T = 17 \text{ MPa}$$

$$\tau_{LT} = 0 \text{ MPa}$$

Bezpečnost je

$$k_L = \frac{F_{Lt}}{\sigma_L} = \frac{900}{461} = 1,95$$

$$k_L = \frac{F_{Lt}}{\sigma_L} = \frac{50}{17} = 2,9$$

Hmotnost poloosy:

$$D = 20,3 \text{ mm}$$

$$L_1 = 510 \text{ mm}$$

$$L_2 = 460 \text{ mm}$$

$$m_1 = \rho \times \frac{\pi \times (D^2 - d^2)}{4} \times L_1 = 1530 \times \frac{\pi \times (0,0203^2 - 0,0143^2)}{4} \times 0,51 \\ = 0,127 \text{ kg}$$

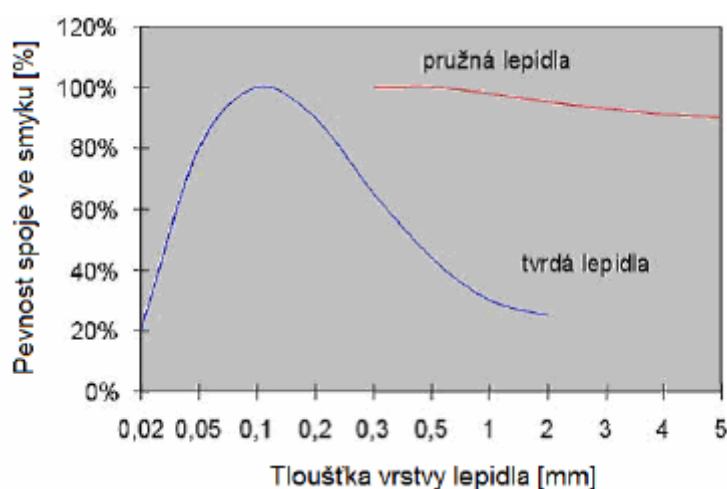
$$m_2 = \rho \times \frac{\pi \times (D^2 - d^2)}{4} \times L_2 = 1530 \times \frac{\pi \times (0,0203^2 - 0,0143^2)}{4} \times 0,46 \\ = 0,115 \text{ kg}$$

7 Lepený spoj

V předchozí části byl popsán postup, jak navrhnout poloosu z kompozitního materiálu. Spojení ocelové poloosy a tripodu bylo provedeno pomocí drážkování. Tento způsob nelze použít pro náš případ z důvodu porušení vláken, které způsobí ztrátu pevnosti poloosy. Ze stejného důvodu nemůžeme použít spojení pomocí pera nebo šroubů. Jediným způsobem je použití lepeného spoje.

Pro provedení tohoto spoje potřebujeme upravit těleso tripodu, odstranit drážkování a zvětšit délku tělesa. Vnitřní průměr tělesa upravíme s ohledem na tloušťku lepeného spoje.

Tloušťka lepidla je důležitým faktorem, který ovlivňuje pevnost lepeného spoje. Závislost pevnosti na tloušťce je znázorněna na obr. 8.1



Obr. 7.1 Závislost pevnosti spoje na tloušťce vrstvy lepidla [9]

Z obr. 8.1 lze stanovit, že optimální tloušťka lepidla pro smykové namáhání je 0,05 až 0,25 mm. Doporučená tloušťka lepidla je uvedena výrobcem.

Pevnost lepeného spoje na krut lze stanovit ze vzorce:

$$T = \frac{\pi \times d^2 \times L}{2000} \times ([\tau_{B2} \times f_c] + [P \times \mu])$$

kde

T je krouticí moment

d je jmenovitý průměr

L je délka spoje

τ_{B2} je statická smyková pevnost lepidla

f_c je násobek opravných faktorů $f_c = f_1 \times f_2 \times f_3 \times f_4$

P je radiální tlak na styku s přesahu (pro surné uložení $P=0$)

μ je koeficient tření [10]

7.1 Opravné faktory [10]

Podle výrobce lepidel Loctite existuje několik opravných faktorů pro stanovení pevnosti spoje.

7.1.1 Druh materiálu

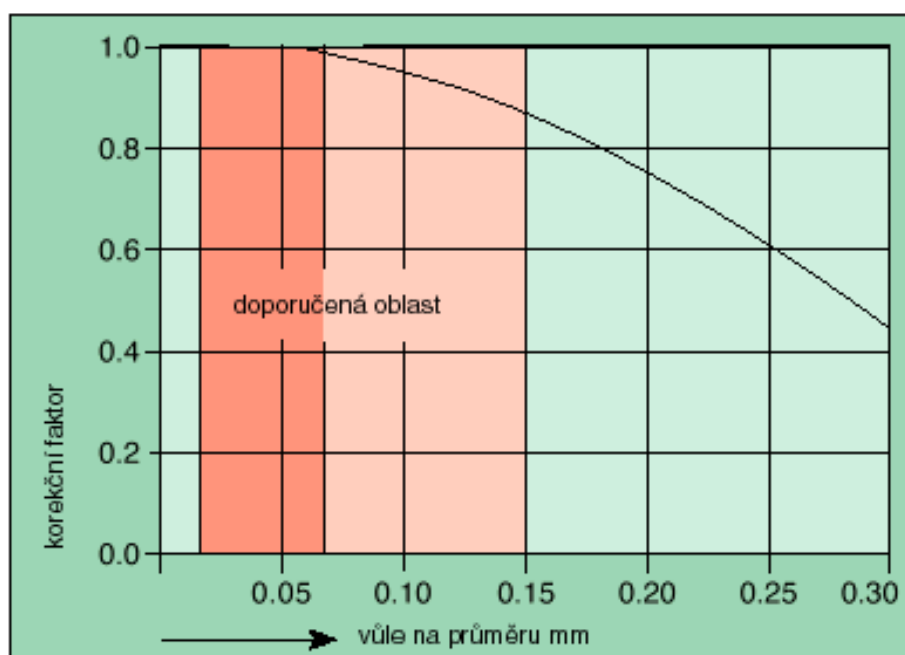
Pevnost lepidla je částečně závislá na druhu materiálu. Pro náš případ opravný faktor f_1 je roven 1.

7.1.2 Druh spoje

Pro surné uložení opravný faktor f_2 je roven 1.

7.1.3 Skutečná vůle

Závislost lepeného spoje na vůli je znázorněna na obr. 8.2



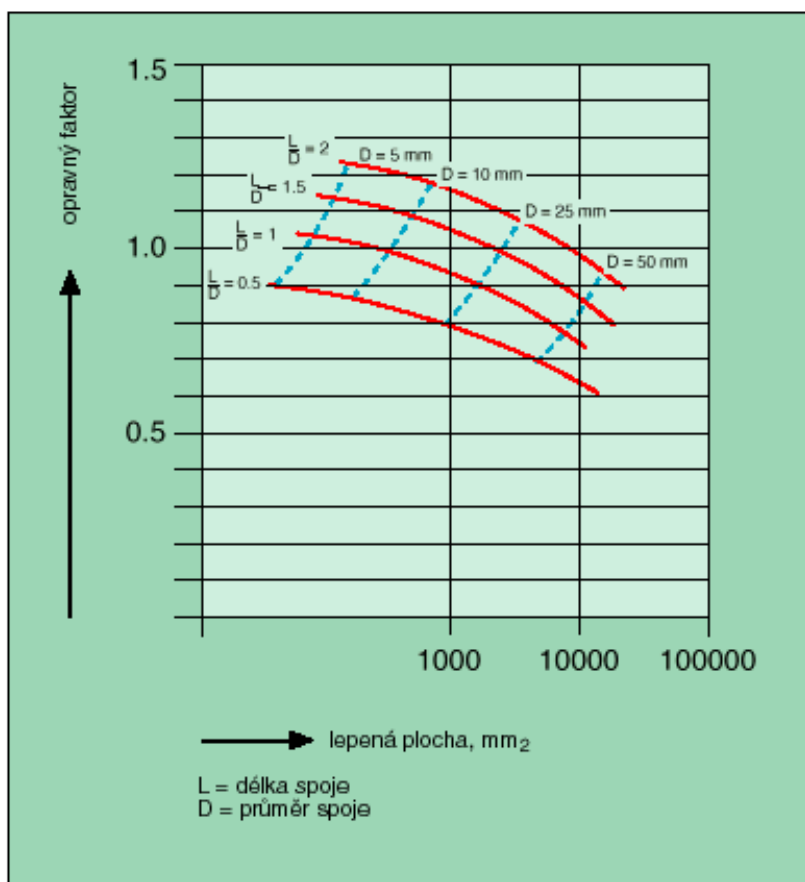
Obr. 7.2 Závislost korekčního faktoru na vůli [10]

Pro náš návrh opravný faktor f_3 je 0,75.

7.1.4 Geometrie

Smykové napětí uvnitř válcového spoje není rovnoměrně rozděleno po celé jeho délce. Maximální napětí jsou soustředěna na okrajích součástí. To znamená, že pevnost uzlu se nezvyšuje lineárně se zvětšující se délkou spoje.

Také poměr účinné délky k průměru spoje (poměr L/D) ovlivňuje konečnou pevnost lepení. Oba tyto vlivy jsou souhrnně vyjádřeny v činiteli geometrie f_4 (obr. 8.3)



Obr 7.3 Závislost opravného faktoru na poměru L/D [10]

7.2 Výpočtová část

Volím $t=0,2$ mm, průměr spoje je 20,5 mm, délka spoje je 40 mm. Výsledný moment je:

$$T = \frac{\pi \times d^2 \times L}{2000} \times [\tau_{B2} \times f_c] = \frac{\pi \times 20,5^2 \times 40}{2000} \times (22 \times 1 \times 1 \times 0,9 \times 1,1) = 575 \text{ Nm}$$

Maximální kroutící moment, kterým je zatěžovaná poloosa je 465 Nm. Při porovnání M_k a T zjistíme, že celkový kroutící moment je 1,23 krát menší než kritický moment T .

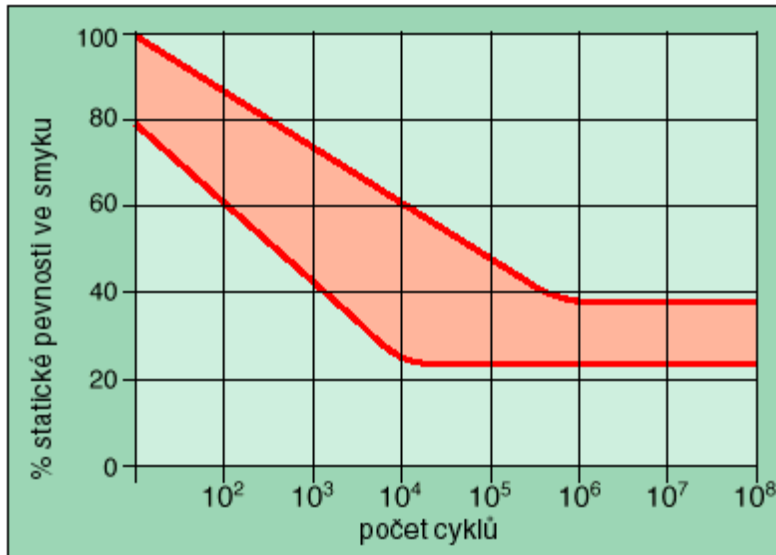
7.3 Únava spoje

Pro spojení součástí budeme používat lepidlo firmy Loctite. LOCTITE EA 3430 je dvou komponentní epoxidové lepidlo, vhodné pro spojení součástí z ocelí, skla a

uhlíkového vlákna. Maximální pevnost lepidla ve smyku je 22 MPa. Nyní spočítáme průběžné smykové napětí:

$$\tau_{B2} = \frac{Mk \times 2000}{\pi \times d^2 \times L \times f_c} = \frac{202,78 \times 2000}{\pi \times 20,5^2 \times 40 \times 1 \times 1 \times 0,9 \times 1,1} = 7,75 \text{ MPa}$$

Lepený spoj je zatěžován na 35% od statické pevnosti ve smyku. Na obr. 7.4 tomu odpovídá počet cyklů 10^4 až 10^6 , což splňuje požadavky.

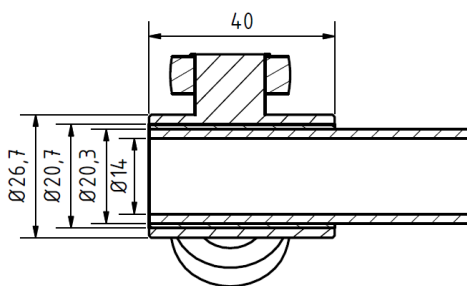


Obr. 7.2 Wöhlerova křivka [10]

8 Výsledek

Úprava tripodu

Pro lepený spoj potřebujeme upravit těleso tripodu. Nové těleso nemá drážkování, má zvýšenou delku a vnitřní poloměr (obr. 8.1, obr. 8.2). Jehlové ložiska, jejich počet a umístění na tělese zůstává neměnné. Celé uložení je znázorněno v příloze 1.



Obr. 8.1 Umístění tripodu na kompozitní poloose



Obr. 8.2 Nový tripod

Nyní provedeme porovnání vlastností ocelové a kompozitní poloosy (tab. 8.1)

	Ocelová poloosa	Kompozitní poloosa
m [kg]	1.296	0.127
Mk_{crit} [Nm]	706	1111.
k_{max}	1.52	2,39

Závěr

Bylo provedeno řešení a kontrola poloosy pomocí klasické laminační teorie a teorie ztráty stability.

Podářilo se nám ušetřit 1,169 kg na jedné poloose, resp. 2,238 kg na obou, což je 0,9% celkové hmotnosti auta.

Kompozitní poloosa může být zatížena 1,57 krát větším kritickým momentem, než by došlo ke ztrátě stability.

Kompozitní poloosa má 1,57 krát větší pevnost při namáhání největším statickým momentem a stejnou pevnost při dynamickém namáhání.

Spojení kovových a kompozitních dílů lze provést pomocí lepidla se zachováním pevnostních požadavků.

Lepený spoj je schopen vydržet počet cyklů 10^4 až 10^6 .

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

A	matice tahové tuhosti [Nmm^{-1}]
B	matice vazební tuhosti [N]
D	matice ohybové tuhosti [Nmm]
<i>D</i>	vnější průměr trubky [mm]
<i>E_x</i>	modul pružnosti v podélném směru [MPa]
<i>E_y</i>	modul pružnosti v příčném směru [MPa]
<i>E_{fl}</i>	modul pružnosti vlákna v podélném směru [MPa]
<i>E_{ft}</i>	modul pružnosti vlákna v příčném směru [MPa]
<i>E_L</i>	modul pružnosti laminy ve směru vláken [MPa]
<i>E_T</i>	modul pružnosti vlákna kolmo na vlákna [MPa]
<i>F_{Lc}</i>	pevnost v tlaku ve směru vláken [MPa]
<i>F_{Lt}</i>	pevnost v tahu ve směru vláken [MPa]
<i>F_{Tc}</i>	pevnost v tlaku kolmo k vláknům [MPa]
<i>F_{Tt}</i>	pevnost v tahu kolmo k vláknům [MPa]
<i>F_{LT}</i>	pevnost v interlaminárním smyku [MPa]
<i>G_f</i>	modul pružnosti vlákna ve smyku [MPa]
<i>G_m</i>	modul pružnosti matrice ve smyku [MPa]
<i>G_{LT}</i>	modul pružnosti laminy ve smyku [MPa]
<i>G_{xy}</i>	modul pružnosti kompozitu ve smyku [MPa]
<i>L</i>	délka lepeného spoje [mm]
<i>m</i>	hmotnost [kg]
<i>N_x</i>	jednotková síla ve směru <i>x</i> [N/mm]
<i>N_y</i>	jednotková síla ve směru <i>y</i> [N/mm]
<i>N_{xy}</i>	jednotková smyková síla [N/mm]
<i>M_x</i>	jednotkový moment ve směru <i>x</i> [Nmm/mm]
<i>M_y</i>	jednotkový moment ve směru <i>y</i> [Nmm/mm]
<i>M_{xy}</i>	jednotkový smykový moment [Nmm/mm]
Q	matice mimoosové tuhosti [MPa]
<i>V_f</i>	objemový podíl vláken [%]
<i>d</i>	vnitřní průměr trubky [mm]
<i>L</i>	délka trubky [mm]
<i>tl</i>	tloušťka lepidla [mm]
<i>ν_f</i>	Poissonovo číslo vlákna [-]
<i>ν_m</i>	Poissonovo číslo matrice [-]
<i>ν_{LT}</i>	Poissonovo číslo laminy [-]
<i>ν_{TL}</i>	Poissonovo číslo laminy [-]
<i>ν_{xy}</i>	Poissonovo číslo kompozitu [-]
<i>ν_{yx}</i>	Poissonovo číslo kompozitu [-]
<i>ρ</i>	hustota [kg/m^3]
T	kroučící moment [Nm]

Příloha 1 Karbonová poloosa s uložením tripodu



SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] CTU Cartech [online]. [cit. 2015-06-30]. Dostupné z: <http://cartech.cvut.cz/fs-06-2/>
- [2] [online]. [cit. 2015-06-30]. Dostupné z: <http://www.autoopt.ru/articles/products/2958132/>
- [3] Бухарин Н. А., Прозоров В. С., Щукин М. М. : Автомобили. Конструкция, нагрузочные режимы, рабочие процессы, прочность агрегатов автомобиля. Учебное пособие для вузов. Л., “Машиностроение” (Ленингр. отд-ние). 1973. 504 с.
- [4] [online]. [cit. 2015-06-30]. Dostupné z: <http://www.taylor-race.com/part.cfm?id=4373>
- [5] [online]. [cit. 2015-06-30]. Dostupné z: <http://www.neonickel.com/cS/alloys/alloy-steels/4340-alloy-steel/>
- [6] LAŠ, Vladislav. Mechanika kompozitních materiálů. Západnočeská univerzita v Plzni, 2004. ISBN 80-7043-273-X.
- [7] Mahmood M. Shokrieh and Akbar Hasani: Shear Buckling of Composite Drive Shaft. FPCM6 The 6th International Conference on Flow Processes in Composite Materials. Auckland, New Zeland 15 16 July 2002.
- [8] Ing. Zdeněk Padovec, Ing. Michal Vašíček : Návrh a analýza napětí kompozitní trubky pro zavěšení kola závodního vozu.
- [9] TRHOŇ, Vojtěch. *Vliv povrchu na pevnost lepeného spoje*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 58 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jaroslav Kubíček.
- [10] UPEVNĚOVÁNÍ KOVOVÝCH VÁLCOVÝCH DÍLŮ [online]. [cit. 2015-06-30]. Dostupné:<http://www.markotech.cz/wpcontent/uploads/2012/06/Loctite/pdf/8.Zajisteni%20kovovych%20valcovych%20dilu.pdf>
- [11] Robin Poul. Program LamiEx v.3.1 2006.