

Vývoj a pevnostní analýza nosné struktury typu monokok pro vůz kategorie Formula Student

Ing. Nikita Astraverkhau, Ing. Filip Zavadil, Ing. Michal Vašíček

Vedoucí práce: Prof. Ing. Jan Macek, DrSc.

Abstrakt

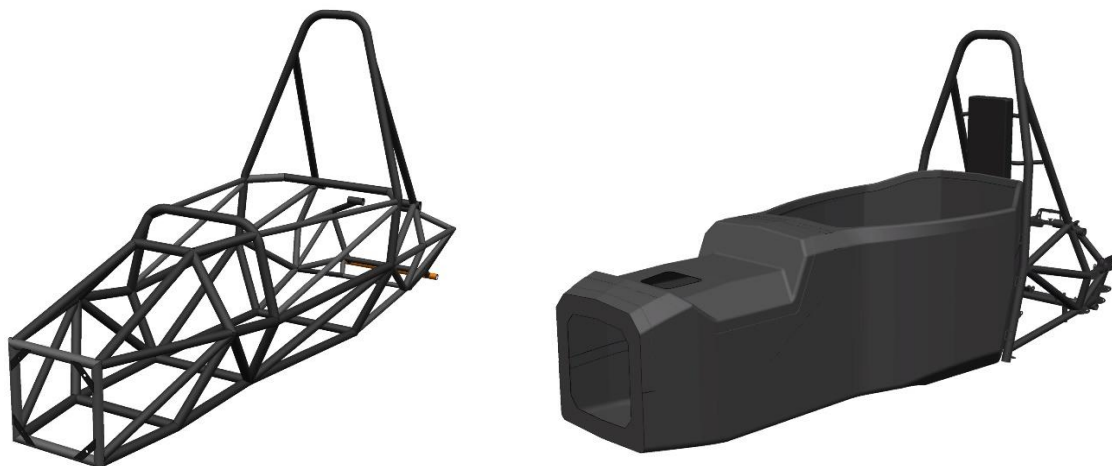
Článek představuje vývoj nosné struktury typu monokok pro vozidlo kategorie Formula Student týmu CTU CarTech. Vývoj se zaměřil na vyrobiteľnost konstrukce, na splnění požadavků pravidel soutěže Formula Student a především na optimální volbu skladby kompozitových sendvičových panelů. Za tímto účelem byl proveden materiálový výzkum podpořený experimentem a vytvořen MKP model celé nosné struktury vozu. Metodika návrhu skladby byla založena na analýze konstrukce v širokém spektru zátěžných stavů specifických pro vůz kategorie Formula Student. Na základě těchto zátěžných stavů byla skladba jednotlivých oblastí nosné struktury optimalizována s ohledem na dosažení co nejmenší hmotnosti a torzní tuhosti porovnatelné s torzní tuhosti ocelového prostorového rámu vozů předchozí generací. Výsledný návrh a jeho realizace prokázala výraznou hmotností úsporu, ačkoliv byla zvýšena tuhost i pevnost struktury.

Klíčová slova

Monokok; kompozitní materiály; materiálový výzkum; spektrum zátěžných stavů; torzní tuhost; MKP

1. Úvod

V rámci projektu CTU CarTech bylo již postaveno 5 vozů typu Formula Student. První 4 vozy byly postavené na koncepci vozidla s prostorovým svařovaným rámem z vysokopevnostních ocelových trubek. Aby tým mohl být úspěšný v mezinárodní soutěži Formula Student, musí neustále pokračovat v odlehčování celé konstrukce vozu. V případě posledního trubkového rámu použitého týmem u vozu FS.04 byla dosažena téměř minimální hmotnost nosné struktury tohoto typu s ohledem na předpisy Formula Student.



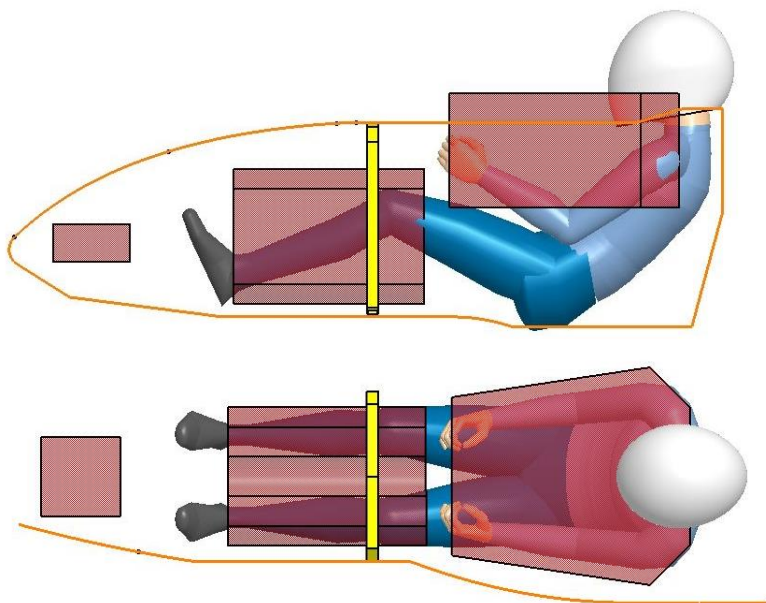
Obr.1 Porovnání nosné struktury FS.04 (vlevo) [3] a FS.05 (vpravo)

Z tohoto důvodu pro vůz s označením FS.05 bylo rozhodnuto o změně koncepce nosné struktury z prostorového svařovaného rámu na koncepci semi-monokok, která je tvořena napůl monokokem z uhlíkových vláken a napůl prostorovým svařovaným rámem. Aby výsledná konstrukce opravdu přinesla požadované snížení hmotnosti, byl proveden materiálový výzkum možných skladeb kompozitových sendvičových panelů, byl vytvořen MKP model celé nosné struktury vozu a provedeny jeho analýzy a byl vytvořen technologický postup výroby výsledné nosné struktury.

2. Předpisy Formula Student

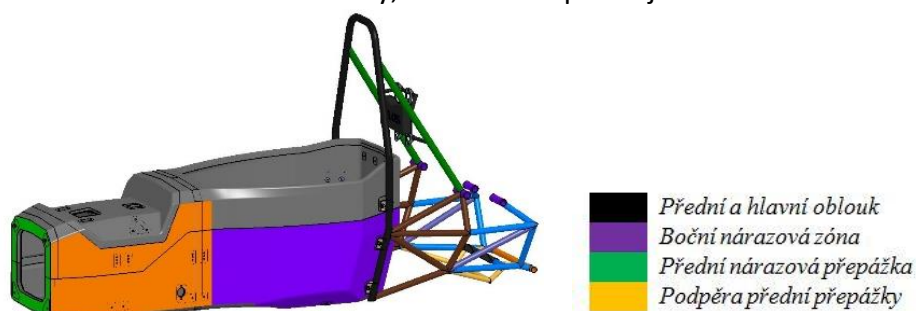
Nejvíce omezujícím prvkem pro tvorbu konstrukce nosné struktury jsou samozřejmě předpisy soutěže Formula Student. Pro nosnou strukturu existuje hned několik předpisů, jejichž splnění zaručuje bezpečnost jezdce.

Předpisy lze rozdělit do několika skupin. První skupina jsou předpisy omezující tvar nosné struktury. Zaměřují se především na vnitřní prostor pro tělo a nohy jezdce.



Obr. 2 Zobrazení předepsaných prostor pro tělo a nohy jezdce [2]

Druhá skupina předpisů se zaměřuje hlavně na pevnostní vlastnosti s ohledem na bezpečnost jezdce v kritických situacích jako je například čelní a boční náraz. V případě nosné struktury typu monokok, má každý tým povinnost prokázat splnění podmínek předpisu pomocí experimentálních zkoušek provedených na předepsaných vzorcích. Tyto předpisy se vztahují na různé oblasti nosné struktury, s čímž koresponduje rozdělení modelu dle Obr. 3.



Obr. 3 Rozdělení dílčích částí monokoku [2]

3. Fyzické zkoušky podle předpisů Formula Student

Jak již bylo zmíněno, dle pravidel je nutno provést řadu experimentů k prokázání mechanických vlastností zvolené struktury a její rovnocennosti vůči předepsaným hodnotám v rozdílných částech vozu.

Celkem byly provedeny tři typy fyzických zkoušek:

- Zkouška tříbodového ohybu pro prokázání ekvivalentní hodnoty součinu EI vůči předepsaným třem ocelovým trubkám v oblasti boční nárazové zóny
- Zkouška potahu ve stříhu v oblastech boční nárazové zóny a v oblasti uchycení přední nápravy
- Zkouška uchycení bezpečnostních pásů

3.1. Zkouška tříbodového ohybu

Zkouška tříbodového ohybu se provádí na vzorku skladby shodné s boční nárazovou zónou předepsaných rozměrů 500mm x 200mm se vzdáleností podpěr 400mm. Dále je vyžadováno provést tříbodový ohyb jedné až tří ocelových trubek předepsaných parametrů pro boční nárazovou zónu z důvodu prokázání správnosti provedení zkoušky. Pro ocelovou trubku lze díky jejím izotropním vlastnostem jednoduše popsat její průhybovou čáru v závislosti na zatížení a tak lze ověřit správnost provedení zkoušky.

Při náhradě boční nárazové zóny sendvičovou strukturou musí být prokázána ekvivalentnost na hodnotách násobku modulu pružnosti v tahu a průřezové charakteristiky. Z materiálových vlastností předepsaných jako nutné minimum vyplývá nutnost uvažovat hodnotu modulu pružnosti v tahu oceli 200GPa. Hodnota průřezové charakteristiky je dána průřezem předepsané geometrie trubky. V konkrétní části je dále předepsáno dosažení vlastností součtu parametrů všech tří trubek, které jsou sendvičovou strukturou nahrazeny. Tímto jsou tedy dány minimální hodnoty, kterým musí vyhovět skořepinová nosná struktura v dané oblasti.

Výpočet minimální hodnoty, které je nutno dosáhnout sendvičovou strukturou:

$$I_t = \frac{\pi \cdot (D^4 - d^4)}{64} = \frac{\pi \cdot (25^4 - 21,5^4)}{64} = 8686,1 \text{ mm}^4 \quad (1)$$

$$EI_t = E \cdot I_t = 200 \cdot 8686,1 = 1737,2 \text{ Pa} \cdot \text{m}^4 \quad (2)$$

Z těchto hodnot vyplývá, že výsledným minimálním parametrem, který musí být splněn je hodnota trojnásobku EI_t .

$$EI_{t \text{ min}} = 3 \cdot (E \cdot I_t) = 3 \cdot 1737,2 = 5211,6 \text{ Pa} \cdot \text{m}^4 \quad (3)$$

Pro potřeby zkoušky byl tedy zpočátku připraven vzorek se skladbou čtyř vrstev v každém z potahů s orientací vláken 0/45/90/-45° symetricky okolo jádra. Jako jádro byla zpočátku použita pěna Airex R82.60. Struktura boční nárazové zóny musí být velmi tuhá a pevná, a proto byla navržena tloušťka jádra 20mm.

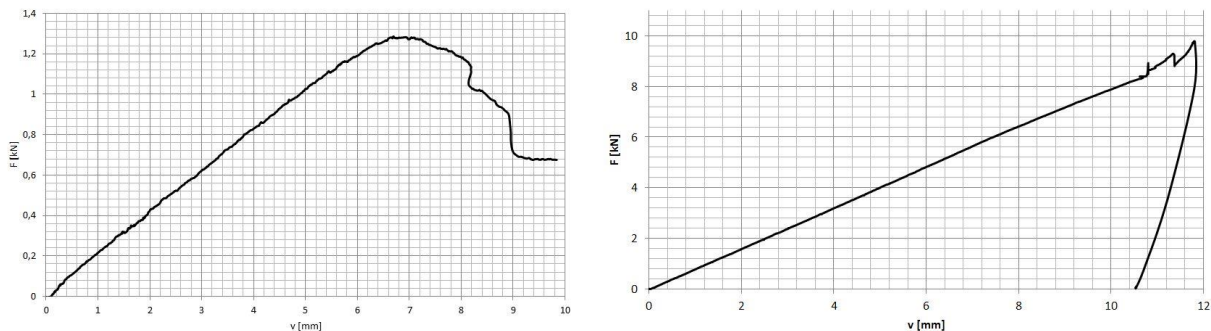
Během zkoušky tříbodového ohybu vzorku s pěnovým jádrem bylo dosaženo průhybu okolo 8 mm při působení síly 2kN. To však nebylo dostačující a tak musela být struktura změněna. Jako největší problém se jevila malá odolnost jádra vůči působení lokální tlakové síly. Proto byla jako materiál jádra následně zvolena hliníková voština s označením ECM6.4-

82, která má výrazně lepší mechanické vlastnosti (pevnost v tlaku) při minimálním nárůstu hustoty viz Tab. 1

	hustota [kg/m³]	pevnost v tlaku [N/mm²]	pevnost ve střihu [N/mm²]
<i>Airex R82.60</i>	60	0,7	0,8
<i>ECM 6.4-82</i>	82	4,5	2,4

Tab. 1 porovnání vybraných vlastností jednotlivých jader

Při použití hliníkové voštiny a totožné skladby jednotlivých uhlíkových potahů bylo dosaženo maximální síly 9,76kN a průhybu 11,7mm.



Graf 1 Závislost síly na průhybu vzorku s jádrem Airex R82.60 (vlevo) a ECM6.4-82 (vpravo)

Z lineární části grafu byl následně dopočten výsledný modul pružnosti dané skladby.

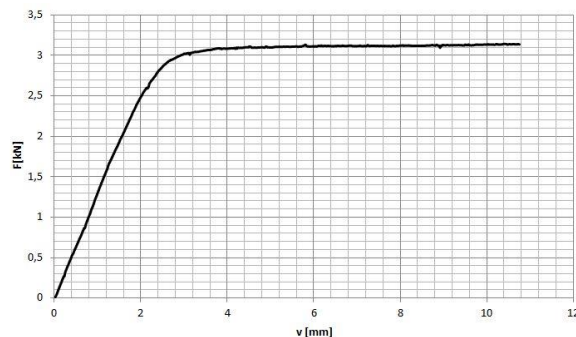
$$E = \frac{(F_2 - F_1) \cdot L_p^3}{48 \cdot I_x \cdot (v_2 - v_1)} = \frac{(8372,4 - 0) \cdot 400^3}{48 \cdot 23971 \cdot (10,785 - 0)} = 57,9 \text{ GPa} \quad (4)$$

Výsledný násobek EISI boční nárazové zóny je tedy

$$EI_{SI} = E \cdot I_{SI} = 57,9 \cdot 90556,1 = 5243,2 \text{ Pa} \cdot \text{m}^4 \quad (5)$$

Hodnota EI_{SI} je větší než hodnota nutného minima vypočtena v (3). A takto navržená struktura tedy může být použita jako náhrada tří ocelových trubek předepsaných pravidly pro boční nárazovou zónu.

Posledním krokem v této části bylo provedení zkoušky třibodového ohybu jedné z ocelových trubek průměru 25mm s tloušťkou stěny 2mm pro prokázání správnosti provedení zkoušky.



Graf 2 Závislost síly na průhybu zkoušené trubky [2]

Z grafu průhybu trubky můžeme z lineární části odečíst naměřenou hodnotu síly 2kN pro průhyb 1,49mm. Jednoduchým výpočtem průhybu nosníku konstantního průřezu na dvou podporách lze zjistit přibližnou chybu měření výpočtem příslušného průhybu (v) pro zvolenou sílu zatížení (F) nosníku uprostřed mezi podporami.

$$I_T = \frac{\pi \cdot (D^4 - d^4)}{64} = \frac{\pi \cdot (25^4 - 21^4)}{64} = 9628,2 \text{ mm}^4 \quad (6)$$

$$v = \frac{F \cdot L p^3}{48 \cdot E \cdot I} = \frac{2 \cdot 400^3}{48 \cdot 200 \cdot 9628,2} = 1,385 \text{ mm} \quad (7)$$

Z dopočtené hodnoty průhybu pro sílu 2kN vyplývá chyba měření v daném bodě 0,105mm.

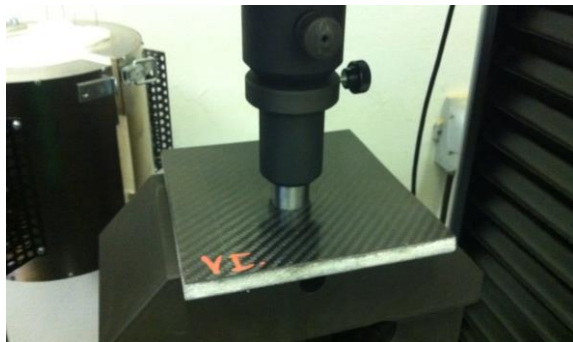
3.2. Zkouška potahu ve stříhu

Další hodnotou, kterou je nutno prokázat fyzickou zkouškou, je hodnota pevnosti potahu ve stříhu v oblastech boční nárazové zóny a v oblasti uchycení přední nápravy, tedy podpěry přední nárazové přepážky. Musí být připraveny vzorky, které skladbou odpovídají příslušné části monokoku a do nich následně vtlačěn razník o průměru 25mm. Minimálními silami, kterým musí příslušné části odolat, jsou:

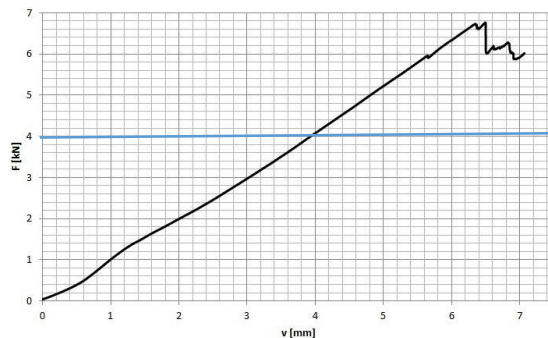
- 4kN pro oblast podpěry přední nárazové přepážky
- 7,5kN pro oblast boční nárazové zóny.

Oblast podpěry přední nárazové přepážky

Pro zkoušky pevnosti potahu ve stříhu byly připraveny vzorky, jejichž skladba odpovídá základním zvoleným čtyřem vrstvám uhlíkového prepregu s výslednou tloušťkou potahu 0,8mm. Jako jádro byl použit Airex R82.60 tloušťky 10mm. Při zkoušce byl vzorek volně položen na rovné desce, ve které byl v místě působení síly otvor 50mm, aby nedocházelo k podepření vzorku v místě působícího zatížení.



Obr. 4 Střihová zkouška vzorku podpěry přední nárazové přepážky [2]

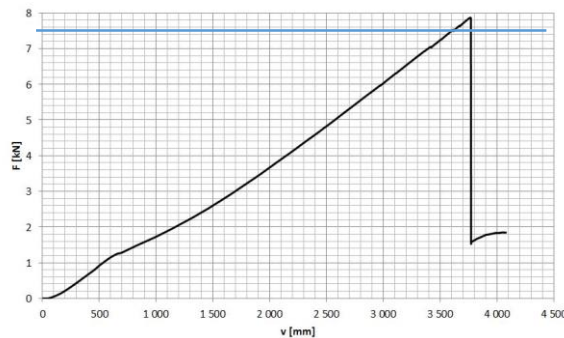


Graf 3 Závislost síly na posuvu s vyznačenou minimální požadovanou hodnotou [2]

Jak již bylo zmíněno, v oblasti podpěry boční nárazové zóny je pravidly stanovena nutnost odolání vzorku síle min. 4kN před porušením potahu střížníkem. Maximální dosažená síla při fyzickém testu byla 6,64kN.

Oblast boční nárazové zóny

Zde zvolená skladba se skládá ze čtyř vrstev uhlíkového prepregu pod úhly /0/45/90/-45/ v každém z potahů symetricky kolem hliníkové voštiny tloušťky 25mm.



Graf 4 Závislost síly na posuvu na vzorku boční nárazové zóny s vyznačenou min. hodnotou

Minimální hodnotou, které musí být při této stříhové zkoušce potahu boční nárazové zóny dosaženo, je 7,5kN. Maximální dosažená hodnota byla z dat siloměru trhacího stoje stanovena na 7,87kN. Navržená struktura tedy vyhověla požadavku.

3.3. Zkouška uchycení bezpečnostních pásů

Jak již bylo zmíněno, pravidla se zaměřují především na prvky pasivní bezpečnosti pilota. Z toho vyplývá nutnost dodržení předpisů vztahujících se k bezpečnostním pásům. Vůz musí být vybaven šestibodovými bezpečnostními pásy, které musí mít platnou homologaci dle FIA. Pro tyto pásy musí být ve voze připraveno uchycení, pro které jsou předepsány minimální požadavky na sílu, kterou musí jednotlivá uchycení přenést.

Jedná se o ramenní úchyt pásu, pro jehož uchycení je předepsána nutnost přenést zatížení silou 13kN. Stejně síle musí odolat také břišní pás. Podstatně menší síle 6,5kN musí odolat poslední z uchycení, a sice úchyt pásu zabraňujícího pohybu pilota směrem do sedačky (anti-submerge efekt). Tento úchyt může být podle pravidel spojen s místem uchycení břišního pásu, potom ale musí snést minimální zatížení 19,5kN.

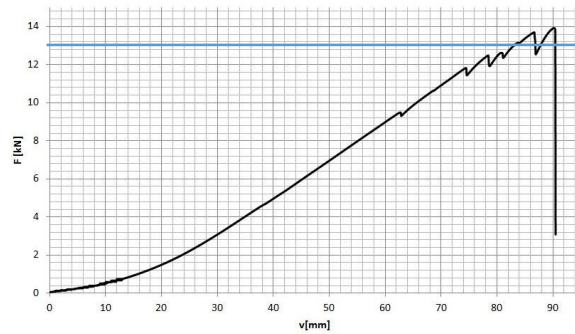
Pro jednotlivá uchycení pásů byly navrženy vložky, které jsou přímo zalaminovány ve struktuře sendviče a umožňují připojení kotevních bodů k sendvičové struktuře. K návrhu velikosti jednotlivých vložek napomohla znalost pevnosti potahu ve stříhu. Jako materiál vložek byl zvolen Ertalon 66 GF30 tloušťky 10mm, ze kterého byly jednotlivé vložky nařezány vodním paprskem.

Uchycení ramenního pásu

Ramenní pás je uchycen přes hliníkový úchyt, který je k monokoku přichycen dvěma šrouby M6 skrz dvě vložky a následně pojištěn podložkou a samojistnou matkou. V místech uchycení těchto šroubů byly navrženy vložky o průřezu 30 x 30 mm.



Obr. 5 Uchycení ramenního pásu [2]



Graf 5 Závislost zatěžující síly na posuvu s vyznačenou pravidly předepsanou minimální hodnotou [2]

Minimální hodnota, kterou musí toto uchycení přenést je dle pravidel 13kN. Tento parametr byl splněn, ale nepodařilo se zjistit maximální sílu, při které dojde k vytržení insertu z důvodu přetržení bezpečnostního pásu. Tato zkouška byla s jedním vzorkem čtyřikrát opakována a vždy se zatížení dostalo na hodnotu vyšší než požadované minimum 13kN. Na vzorku nebyly ani po opakované zkoušce shledány žádné známky porušení.

Uchycení břišního pásu

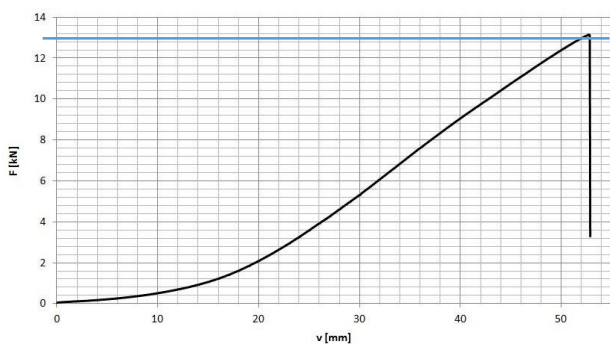
Pro úchyt břišního pásu byl navržen jeden insert rozměru 25 x 45mm. Skrz tento insert byl prošroubován pevnostní šroub M10 třídy 12.9 a na něho našroubována matice s okem pro přichycení pásu.

Pro úchyt břišního pásu je předepsána jako minimální hodnota, kterou musí toto uchycení být schopno přenést 13kN. Při zkoušce byl insert vytržen silou 13,2kN. Uchycení tedy z hlediska pravidel vyhovělo předepsaným požadavkům.

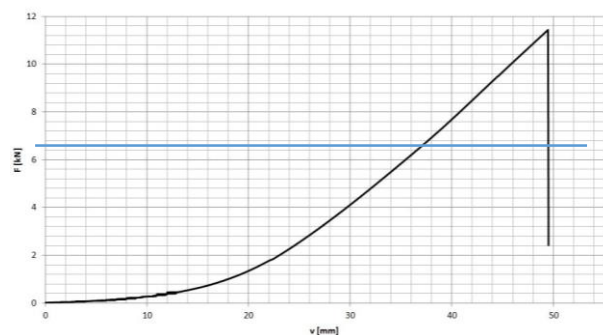
Uchycení kyčelního pásu

Pro toto uchycení byl navržen jeden insert o rozměrech 30 x 30mm. Skrz tento insert byl prošroubován pevnostní šroub M8 a na něj nasazena matice s okem pro zachycení pásu.

V případě rozdělení spodních úchytů pásu je pravidly požadováno, aby tento insert přenesl zatížení 6,5kN. Maximální přenesené zatížení bylo 11,4kN. Tento insert by tedy mohl být ještě menší, ale z důvodů bezpečnosti byly jeho rozměry zachovány.



Graf 6 Závislost zatěžující síly na posuvu příčnicku vzorku břišního pásu s vyznačenou pravidly předepsanou minimální hodnotou [2]



Graf 7 Závislost zatěžující síly na posuvu příčnicku vzorku kyčelního pásu s vyznačenou minimální pravidly předepsanou hodnotou [2]

4. Materiálové charakteristiky tkaniny

Materiálové charakteristiky zvolené tkaniny byly zjišťovány za účelem ověření dosažených mechanických vlastností zhotoveného laminátu.

Mezi hodnoty potřebné k popisu vlastností kompozitního (ortotropního) materiálu patří modul pružnosti v tahu (E), modul pružnosti ve smyku (G) a Poissonova konstanta (μ) ve směrech ortotropie. Se znalostí těchto hodnot jsme schopni popsat chování daného materiálu například při MKP simulacích.

4.1. Zkoušený materiál

Zvoleným a také zkoušeným materiálem byl uhlíkový prepreg s označením EHKF 420C - C20 - 45 vyráběný švýcarskou firmou Gurit. Jedná se o uhlíkovou tkaninu s keprovou vazbou a třemi tisíci vlákny v pramenci. Gramáž výsledné uhlíkové tkaniny je 200g/m². Tato tkanina je prosycena epoxidovou pryskyřicí EH 420, která je určena pro vytvrzování při teplotě 125°C pod dobu 90 minut. Výsledná váha jednoho metru čtverečního tohoto prepregu je přibližně 365g/m².

4.2. Příprava zkušebních vzorků

Veškeré materiálové zkoušky byly provedeny dle norem ASTM. Například tahovou zkoušku pro kompozitní materiály popisuje norma ASTM D 3039, která udává podmínky zkoušky a určuje parametry a rozměry zkoušeného vzorku.

Byla tedy odlaminována deska skládající se ze čtyř vrstev uhlíkového prepregu, u kterého byly jednotlivé vrstvy položeny se stejnou orientací vláken. Vytvrzení proběhlo v autoklávu při přetlaku 3 bary. Tato deska byla následně nařezána diamantovým kotoučem na jednotlivé vzorky rozměru 300mm x 25mm. Vzorky byly nařezány pod úhly 0° pro zkoušku modulu pružnosti v tahu a pod úhlem 45° pro zkoušku modulu pružnosti ve smyku.

Vzorky bylo podle předpisu ASTM normy nutno opatřit příložkami pro upnutí do čelistí trhacího stroje a to hliníkovými příložkami rozměru 25 x 25mm. Tyto příložky byly přilepeny dvousložkovým epoxidovým lepidlem Loctite 9466.

Pro zkoušení jednotlivých vzorků byl použit univerzální zkušební trhací stroj LabTest 5.100SP1. Tento stroj je určen pro statické mechanické zkoušky v tahu, tlaku, ohybu, krutu a cyklickém namáhání vzorků i celých výrobků. Zařízení bylo opatřeno laserovým extenzometrem, díky kterému bylo možné předejít zkreslení výsledků zkoušky vlivem deformace lepeného spoje a deformace samotné hliníkové příložky. Měření prodloužení se provádělo na úseku 80mm.

4.3. Modul pružnosti v tahu

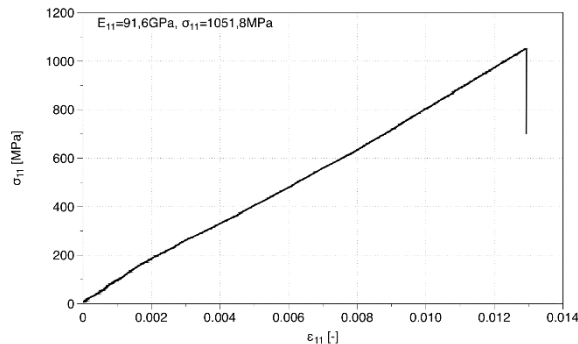
Pro výpočet modulu pružnosti v tahu bylo nutné změřit závislost síly na deformaci (prodloužení) vzorku. Průřez vzorku byl znám a proto bylo možné přepočítat sílu na napětí (8). Dále jsme schopni z podílu extenzometrem změřeného prodloužení a původní délky měřené části vypočítat poměrnou deformaci (9). Z těchto hodnot jsme schopni z Hookeova zákona dopočítat modul pružnosti v tahu.

$$\sigma = \frac{F}{S} \quad [Pa] \quad (8)$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \quad [-] \quad (9)$$

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad [Pa] \quad (10)$$

Dalším způsobem jak lze zjistit hodnotu modulu pružnosti v tahu je jeho odečtení ze směrnice přímky v grafu. Platí zde, že pokud proložíme lineární částí závislosti napětí na deformaci přímkou, pak je hodnota směrnice této přímky rovna hodnotě modulu pružnosti v tahu.



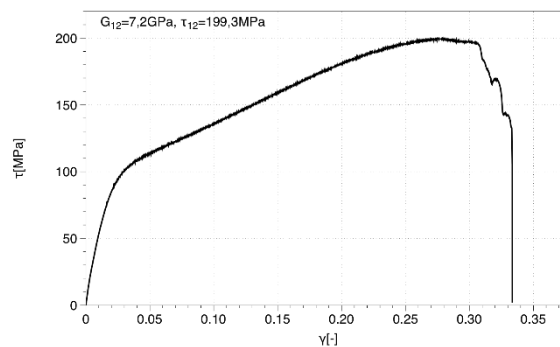
Graf. 8 Zkouška tkaniny v tahu [2]

Z provedených zkoušek vyšel průměrný modul pružnosti v tahu 90GPa. Tato hodnota je poměrně vysoká a je zapříčiněna zvolenou technologií vytvrzení kompozitu v autoklávu. Tato technologie se v dnešní době řadí na samotnou špici v možnostech kvality zpracování kompozitních materiálů.

4.4. Modul pružnosti ve smyku

Modul pružnosti ve smyku (G) je materiálová konstanta popisující vlastnosti mezi smykovým napětím (τ) a jím způsobenou deformací nazývanou zkos (γ). Podobně jako pro modul pružnosti v tahu lze i na modul pružnosti ve smyku aplikovat Hookeův zákon nejčastěji zobrazovaný v podobě výpočtu úhlu smyku (11).

$$\gamma = \frac{\tau}{G} \quad (11)$$



Graf. 9 Zkouška tkaniny ve smyku [2]

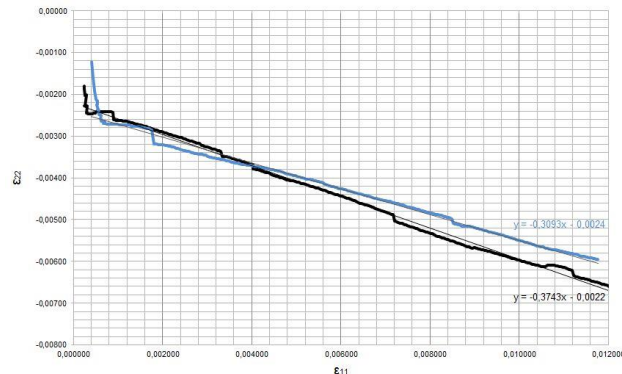
Z hodnot znázorněných v grafu 9 vyplývá hodnota modulu pružnosti ve smyku 7,2GPa.

4.5. Poissonova konstanta

Poslední měřenou hodnotou byla Poissonova konstanta. Jedná se o poměr podélné deformace (deformace ve směru namáhání) a příčné deformace (deformace ve směru kolmém na směr namáhání). V případě izotropních materiálů je tato konstanta nezávislá na směru zatížení, v případě anizotropních materiálů, mezi které patří i kompozity se Poissonova číslo mění podle směru zatížení struktury.

$$\mu = \left| \frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_x} \right| \quad (12)$$

Pro určení Poissonovy konstanty bylo tedy zapotřebí změřit podélné a příčné prodloužení resp. zkrácení. Pro tyto účely byl použit trhací stroj osazený příčným a podélným extenzometrem. Z naměřených hodnot v obou směrech byly vypočteny jednotlivé deformace a následně byly hodnoty vyneseny v grafu, ze kterého byly jednotlivé hodnoty Poissonovy konstanty odečteny jako směrnice přímky lineární interpolace jednotlivých měření.



Graf 10 Poissonovy konstanty [2]

V grafu 4 můžeme vidět minimální a maximální naměřenou hodnotu Poissonovy konstanty, která je rovna hodnotě 0,335.

5. Analýza struktury

5.1. Popis modelu

Výpočetní konečně-prvkový model nosné části vozidla byl vytvořen s cílem ověřit její tuhostní a pevnostní vlastnosti. Model obsahuje 3 následující podsestavy:

1. Kompozitová sendvičová struktura monokoku,

modelována pomocí skořepinových prvků s lineární interpolační funkcí. Materiálový model byl potahů MAT8 (lineární ortotropní) a jádra MAT1 (lineární isotropní).

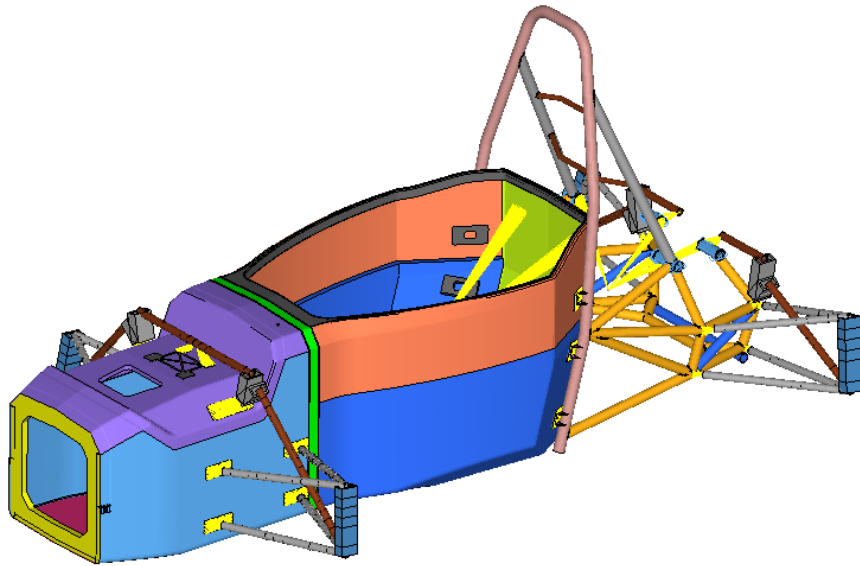
2. Trubkový rám,

který je ke struktuře monokoku připojen šroubovými spoji, je reprezentován skořepinovými elementy s lineární interpolační funkcí a materiálovým modelem MAT1. Model rámu obsahuje i hnací agregát, který je uvažován jako dokonale tuhé těleso připojené do rámu entitou typu RBE1 (Rigid body element). Výraznou měrou tak zvyšuje tuhost rámu. Obě skořepinové části jsou síťovány na střednicové ploše výchozí geometrie.

3. Nápravy

jsou s ohledem na analýzu především rámu a monokoku výrazně zjednodušeny a modelovány 1D nosníkovými prvky s materiálovým modelem MAT1. Jejich připojení (v reálné konstrukci sférickou nebo rotační vazbou) k primární struktuře je provedeno pomocí vazbových RBE3 elementů, u kterých je možné definovat vazbu nezávislého uzlu vůči závislým pomocí předpisu stupňů volnosti. Tak je zaručen odpovídající přenos sil z náprav do primární struktury.

Model byl vytvořen v systému jednotek mm, kg, ms a tedy zobrazovaná rozložení napětí jsou v GPa.

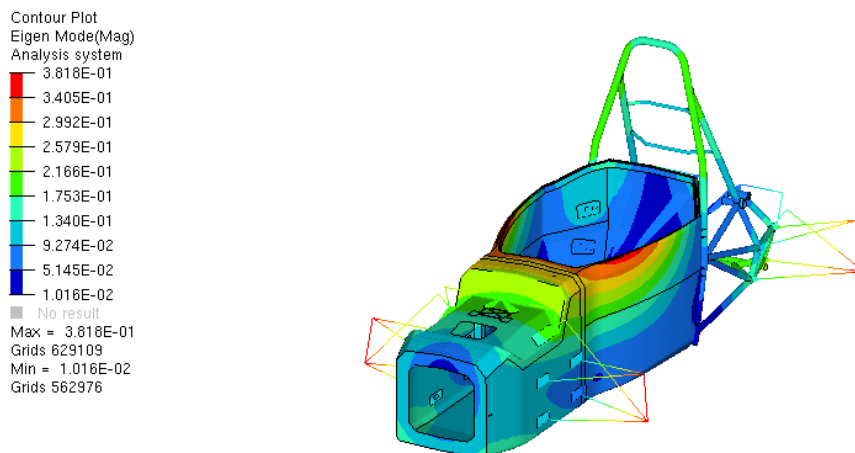


Obr. 6 Výpočetní model nosné struktury se zobrazením průřezu 1D elementu

5.2. Zvolené zátěžné stavy a výsledky

5.2.1. Výpočet volných vlastních frekvencí konstrukce

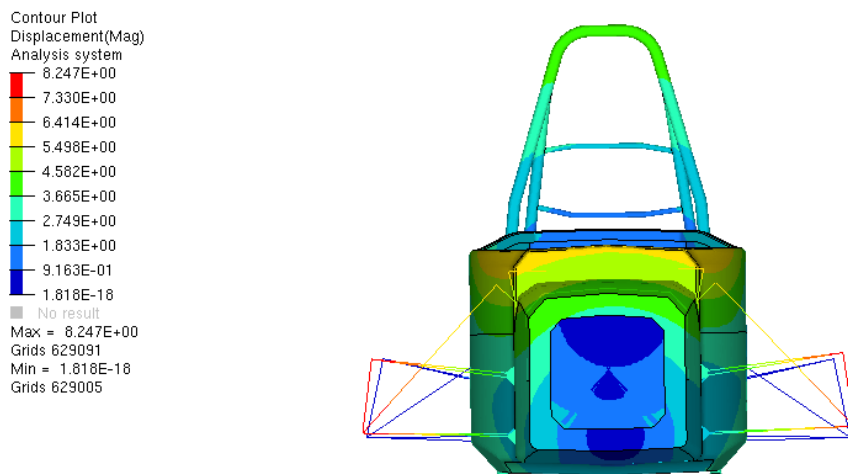
Prvotní analýza konstrukce byla zaměřena na kontrolu nejnižší vlastní frekvence volné soustavy a ověření připojení rámu a náprav. Požadavek na hodnotu vlastní frekvence primární konstrukce pramení z cíle omezit vznik interferencí s vlastními frekvencemi nejvýznamnějších zdrojů kmitání jako jsou hnací agregát (chod ve volnoběžných otáčkách) a odpružené kolo při jízdě po vozovce (nerovné). Výsledná hodnota první vlastní frekvence 54,7Hz je výrazně nad pásmem zmíněných vlastních frekvencí zdrojů (20-35Hz) a tedy konstrukce v tomto ohledu vyhovuje.



Obr. 7 První vlastní tvar kmitů

5.2.2. Stanovení torzní tuhosti

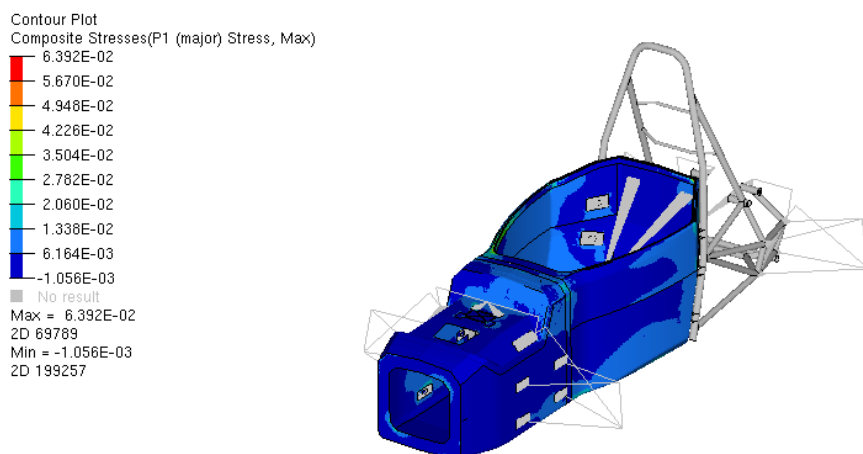
Druhý z funkčních požadavků na primární konstrukci je dostatečná (vhodná) torzní tuhost (mezi nápravami). Ke krutu nosné konstrukce dochází při nerovnoměrném rozložení svislých sil na jednotlivá kola (zahájení jízdy v zatáčce, přechod mezi zatáčkami, jízda po nerovnostech) a výsledná tuhost ovlivňuje chování vozidla v těchto jízdních stavech. Analýza torzní tuhosti byla mimo jiné provedena za účelem validace výpočtového modelu a mezigeneračního srovnání nosných struktur.



Obr. 8 Zobrazení posuvů náprav při torzní zkoušce

5.2.3. Kontrola namáhání v krutu

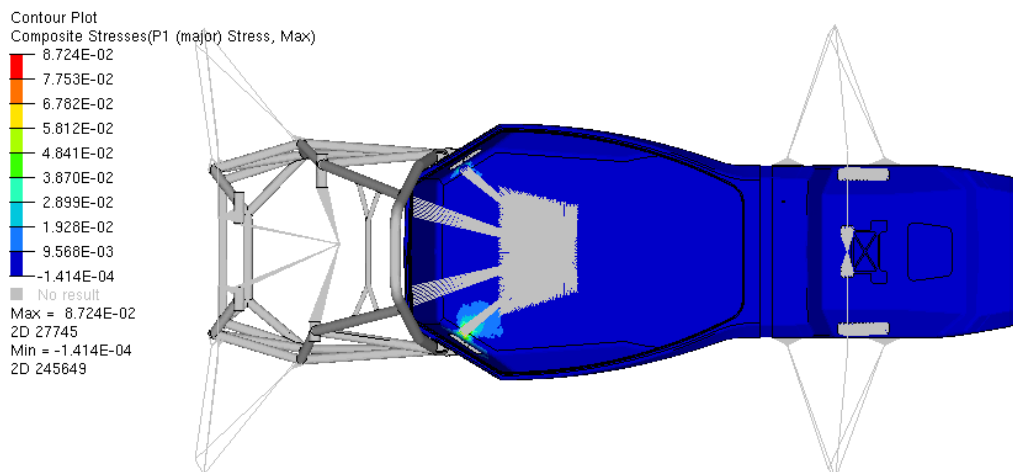
Mimo výše uvedené funkční požadavky byla ověřena schopnost konstrukce snést provozní zatížení bez poškození. Nejvýznamnější provozní zatížení mají dynamický charakter. Za účelem zjednodušení lze uvažovat vhodně zvýšené hodnoty statického zatížení a v těchto stavech analyzovat konstrukci. Kontrola namáhání v krutu odpovídá stavu, kdy vozidlo přejíždí jedním z kol nerovnost na vozovce, což v extrémních případech může vyvolat až 3x vyšší zatížení (tzv. statický násobek), než svislé statické zatížení kola.



Obr. 9 Hlavní napětí laminátů při namáhání v krutu

5.2.4. Kontrola namáhání v příčném ohybu

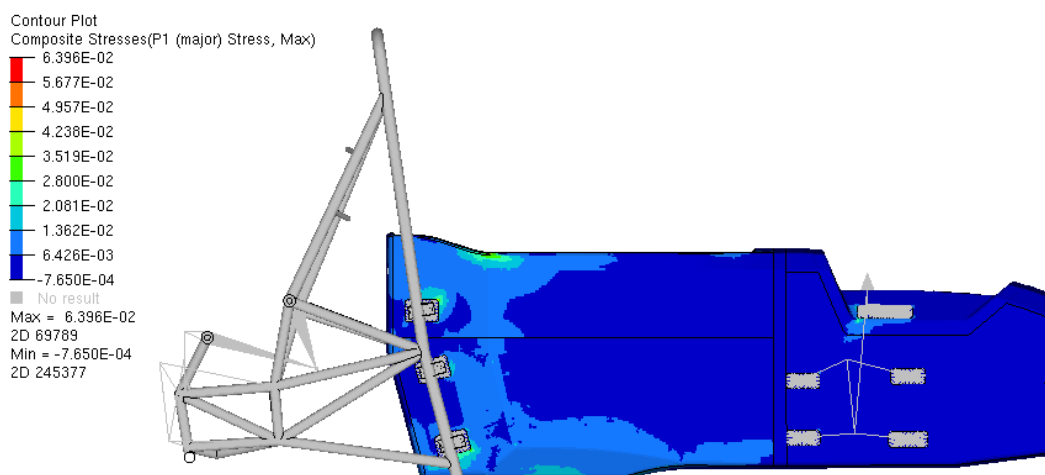
Druhým extrémním stavem je ustálená jízda v zatáčce, která zatěžuje konstrukci příčným ohybem. Statický násobek je v tomto případě určen schopností pneumatiky přenášet boční zatížení, která je v tomto konkrétním případě zvýšena vytvořeným aerodynamickým přítlakem vozidla a jeho hodnota je 2,5. Mimo vlastní setrvačnost vozu je konstrukce zatížena setrvačnými silami jezdce (85kg) a hnacího agregátu (63kg).



Obr. 10 Hlavní napětí kompozitové struktury při příčném ohybu

5.2.5. Kontrola namáhání v podélném ohybu

Mimo příčného ohybu je konstrukce vystavena též podélnému ohybu, který je vyvolán svislým zatížením konstrukce a k ní připojených agregátů při jízdě po nerovné vozovce (nerovnosti s vysokou vlnovou délkou), kdy nedochází k odlehčení jednotlivých kol. Uvažovaný statický násobek má hodnotu 3.



Obr. 11 Hlavní napětí kompozitové struktury při podélném ohybu

Konstrukce byla kontrolována na mezní stav plasticity u kovových dílů a mezní stav pevnosti (popř. přetvoření při poruše) u kompozitových dílů se zvolenými bezpečnostmi. Ve všech zátěžných stavech konstrukce vyhovuje.

6. Závěr

Výpočetní model byl vytvořen nejen s cílem analyzovat konstrukci, ale též s cílem pozdější optimalizace skladby potahů sendvičů a jader s ohledem na požadovanou tuhost, splnění zátěžných stavů a hmotnost, která má významný vliv na výkonnost vozu a spotřebu paliva v závodě. Zvolené přístupy a metody umožňují využít takto připravený model nosné struktury pro tyto optimalizace, avšak budou předmětem dalších prací.

Popsaný postup vývoje nosné struktury typu monokok byl využit při návrhu nosné struktury pro vůz FS.05 týmu CTU CarTech a zkušenosti získané během návrhu byli aplikované pro další verzi této struktury pro vůz s označením FS.06.

Seznam symbolů

D	vnější průměr ocelové trubky	[mm]
d	vnitřní průměr ocelové trubek	[mm]
E	Youngův modul pružnosti	[MPa]
G	smykový modul pružnosti	[MPa]
F	síla	[N]
I	kvadratický moment průřezu	[mm ⁴]
L	délka vzorku	[mm]
S	plocha	[mm ²]
γ	zkos	[-]
ε	relativní prodloužení	[-]
μ	Poissonová konstanta	[-]
v	posuv	[mm]
σ	napětí	[MPa]
τ	smykové napětí	[MPa]

Seznam použité literatury

- [1] *Formula SAE rules 2013*. Formula SAE Rules str. 20 – 65. Dostupné na URL: <<http://students.sae.org/competitions/formulaseries/rules/>>
- [2] Zavadil Filip. *Skořepinová nosná struktura vozu Formula Student*. České vysoké učení technické v Praze, 2013.
- [3] Astraverkhau, Nikita. *Metodika návrhu nosné části vozu kategorie Formula Student*. České vysoké učení technické v Praze, 2011.