



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

**KONSTRUKČNÍ NÁVRH TRUBKOVÉHO RÁMU FORMULE
STUDENT**

FORMULA STUDENT SPACEFRAME CONSTRUCTION

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jan Ženčák

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Michal Janoušek

BRNO 2016

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav automobilního a dopravního inženýrství
Student: **Jan Ženčák**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Michal Janoušek**
Akademický rok: 2015/16

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Konstrukční návrh trubkového rámu Formule Student

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Vypracujte konstrukční návrh trubkového rámu Formule Student a popište požadavky na něj kladené.

Cíle bakalářské práce:

Popište pravidla týkající se nosného rámu Formule Student.

Popište požadavky kladené na rám Formule Student.

Vypracujte konstrukční návrh trubkového rámu dle pravidel soutěže Formule Student.

Seznam literatury:

JAN, Zdeněk, ŽDÁNSKÝ, Bronislav a ČUPERA, Jiří.: Automobily (1): Podvozky. Brno: Avid, spol. s r.o., 2009. ISBN 978-80-87143-11-7.

2016 Formula SAE® Rules, 2016. 2015 Formula SAE® Rules.

<http://www.fsaeonline.com/content/2015-16%20SAE%20Rules%20revision%2091714%20kz.pdf>
(accessed Oct 20, 2015).

MILLIKEN, William a MILLIKEN, Douglas.: Race Car Vehicle Dynamics. 1st edition. Warrendale: SAE, 1995. 857 s. ISBN 1-56091-526-9.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2015/16

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Václav Píštěk, DrSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty



ABSTRAKT

Bakalářská práce popisuje požadavky kladené na rám vozidla pro soutěž Formule Student pravidly a konstrukcí ostatních částí vozu. Cílem práce bylo navrhnout konstrukci rámu s použitím vysoko pevnostní oceli a provést materiálové testy požadované pravidly soutěže. Po analýze pravidel byla zvolena chrom-molybdenová ocel 15 130. Byl vypracován konstrukční návrh a analýza torzní tuhosti za pomoci softwaru Creo 2.0. Byly vytvořeny a otestovány vzorky pro ověření, zda je zvolený materiál použitelný v souladu s pravidly soutěže Formule Student.

KLÍČOVÁ SLOVA

materiálové testy, Formule Student, konstrukce rámu, torzní tuhost

ABSTRACT

This bachelor thesis describes requirements for Formula Student chassis given by rules and construction of other parts of car. The objective were design construction of the frame with use of high tensile strength steel and perform material tests required by rules of the competition. After rules analysis was chosen chrome molybdenum steel 15 130. Construction design and torsion stiffness analysis were performed. Test samples were manufactured and tested for verification chosen material is according to rules of Formula Student competition.

KEYWORDS

material tests, Formula Student, construction of frame, torsion stiffness



BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ŽENČÁK, J. *Konstrukční návrh trubkového rámu Formule Student*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 43 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Michal Janoušek.



ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Michala Janouška a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 27. května 2016

.....

Jméno a přímení



PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu práce Ing. Michalu Janouškovi za cenné rady a podporu. Nesmím zapomenout poděkovat Jiřímu Urbánkovi z firmy CCI za výrobu svařovaných vzorků a Ing. Josefu Zapletalovi Ph.D. z Ústavu materiálových věd a inženýrství za pomoc a rady při testování všech vzorků.



OBSAH

Úvod	9
1 Konstrukční požadavky na rám vozidla Formule Student.....	10
1.1 Pravidla soutěže Formule Student 40	10
1.1.1 Definice základních částí primární struktury rámu	10
1.1.2 Geometrické požadavky na primární strukturu rámu	15
1.1.3 Materiálové a rozměrové požadavky na části primární struktury	18
1.2 Požadavky dané konstrukcí vozu Dragon 5.....	20
2 Volba polotovarů a materiálu	22
2.1 Polotovary pro části primární struktury	22
2.2 Materiál pro části primární struktury	23
3 Tvorba geometrie.....	25
3.1 Geometrie primární struktury	25
3.1.1 Paralelní boční nárazová struktura	25
3.2 Geometrie doplňkových struktur	26
3.2.1 Přední část rámu	26
3.2.2 Střední část rámu	27
3.2.3 Zadní část rámu	27
4 Torzní tuhost.....	29
4.1 Prutová náhrada	29
4.2 Okrajové podmínky	29
4.3 Výpočet torzní tuhosti.....	30
4.4 Vyhodnocení simulace.....	31
5 Mechanické zkoušky	32
5.1 Zkoušení materiálu	32
5.1.1 Pevnostní charakteristiky materiálu	32
5.1.2 Ověření svarů.....	34
5.2 Zkoušení H-vzorků	35
5.2.1 Označení a kombinace H-vzorků	35
5.2.2 Výsledky a jejich vyhodnocení	36
Závěr.....	39
Seznam použitých zkratk a symbolů	41
Seznam příloh.....	43



ÚVOD

Cílem této práce je navrhnout trubkový rám pro vozidlo Dragon 5 v kategorii Formule Student s využitím pravidel pro alternativní materiály a rozměry profilů rámu.

Nejdříve je provedena analýza požadavků kladených na rám vozu pravidly soutěže Formule Student, kde jsou popsány minimální požadavky na vlastnosti použitého materiálu a geometrie polotovarů pro různé části rámové konstrukce. Pravidla dále popisují minimální počet trubek, které je nutné použít pro každou část rámu. Což zajišťuje bezpečnost řidiče. V kombinaci s požadavky, které na rám klade umístění dalších komponent vozidla, jako je pohonné ústrojí a body zavěšení podvozku, budou stanoveny minimální požadavky na alternativní materiál a provedena jeho volba s ohledem na dostupné rozměry polotovarů. Analyzovány budou i konstrukčními řešení ostatních částí vozu Dragon 5.

Bude vypracováno konkrétní konstrukční řešení splňující pravidla s cílem dosáhnout co nejmenší hmotnosti a měrné torzní tuhosti rámu stejné nebo vyšší než u předchozího monopostu Dragon 4. Při návrhu bude brán zřetel hlavně na ergonomii řidiče, podvozkovou a motorovou skupinu a jejich požadavky na geometrii rámu v jejich okolí.

K ověření předpokladů o tuhosti bude provedena analýza torzní tuhosti pomocí metody konečných prvků. Jednotlivé profily budou nahrazeny prutovými náhradami s přiřazenými vlastnostmi nahrazeného profilu. Budou stanoveny okrajové podmínky. Z výsledné deformace a hmotnosti se vypočítá torzní tuhost a měrná torzní tuhost.

Budou popsány vzorky pro stanovení materiálových vlastností jednotlivých polotovarů a vzorky požadované pravidly Formule Student pro ověření ekvivalence polotovaru s menší tloušťkou stěny, zároveň budou vyhodnoceny materiálové testy vzorků dle pravidel soutěže.



1 KONSTRUKČNÍ POŽADAVKY NA RÁM VOZIDLA FORMULE STUDENT

Požadavky na konstrukci rámu pro vozidlo kategorie Formule Student jsou rozděleny na dvě části. První část vyplývá z pravidel soutěže Formule Student, druhá část je určena konkrétní konstrukcí a zástavbovým prostorem jednotlivých částí vozu.

1.1 PRAVIDLA SOUTĚŽE FORMULE STUDENT [1]

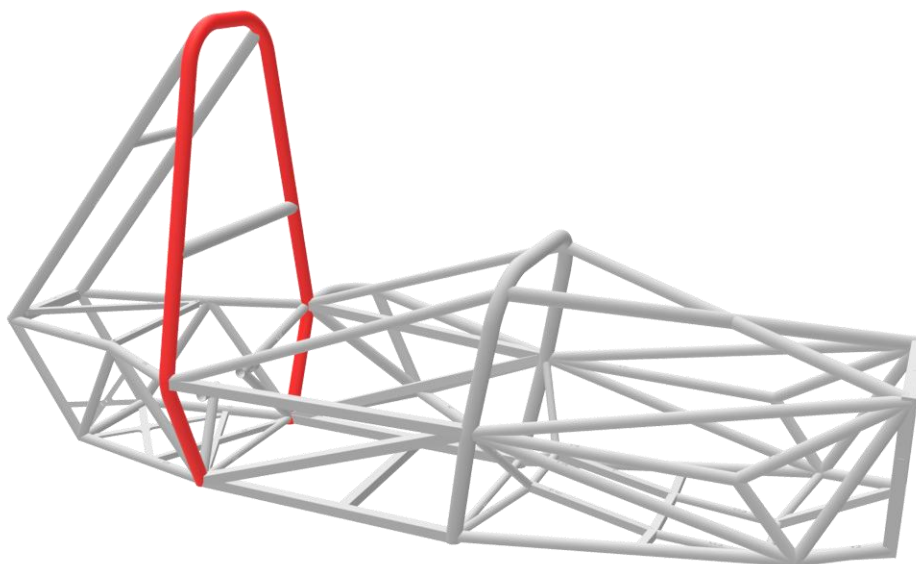
Konstrukci vozu upravují pravidla mezinárodní studentské soutěže Formule Student. Těmito pravidly je stanoven jak přibližný tvar a struktura rámu, tak i materiál a rozměry trubek použitých při jeho konstrukci.

1.1.1 DEFINICE ZÁKLADNÍCH ČÁSTÍ PRIMÁRNÍ STRUKTURY RÁMU

Primární struktura rámu sestává ze dvou oblouků, jejich vzpěr, přední nárazové přepážky, boční nárazové struktury a podpůrných částí, spojujících vše do jednoho celku.

HLAVNÍ OBLOUK

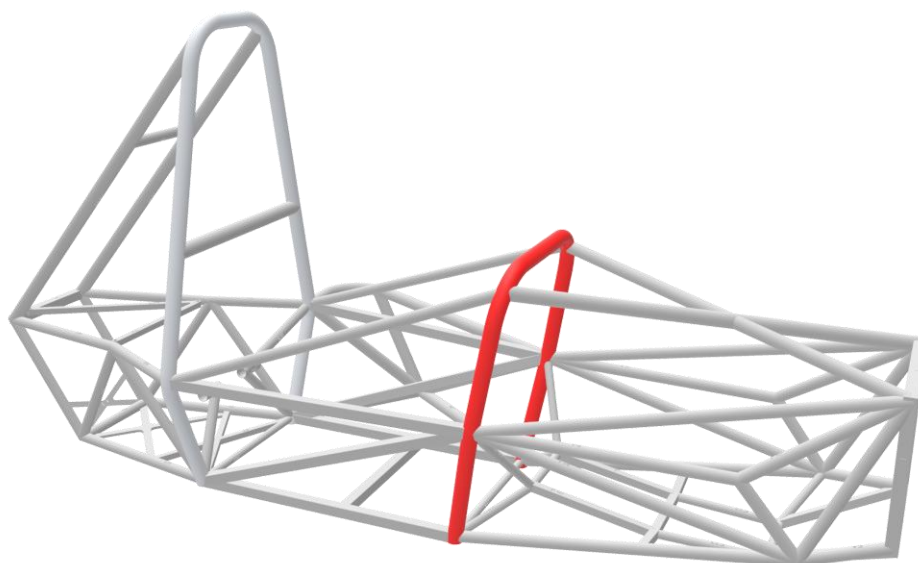
Je to část rámu z nepřerušené ohnuté trubky, která jde od podlahy vozu na jedné straně přes řidičovu hlavu zpět k podlaze vozu na druhé straně. Je umístěna nad nebo těsně za řidičovým trupem. V bočním pohledu musí být oblouk skloněný maximálně do 10° od vertikální polohy. V předním pohledu musí být svislé části oblouku v místě, kde se oblouk připojuje ke spodním členům boční nárazové struktury, alespoň 380 mm vzdálené od sebe.



Obr. 1 Hlavní oblouk

PŘEDNÍ OBLOUK

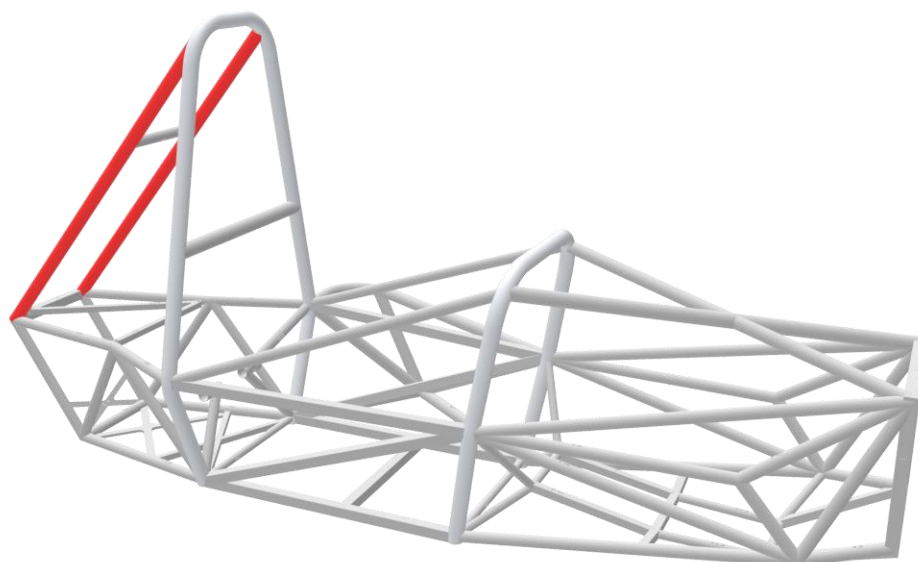
Je to část rámu z nepřerušené ohnuté trubky, která jde od podlahy vozu na jedné straně přes řidičovy nohy zpět k podlaze vozu na druhé straně. V bočním pohledu musí být oblouk skloněný maximálně do 20° od vertikální polohy. Nejvyšší bod oblouku nesmí být nižší než nejvyšší bod volantu v jakékoliv pozici natočení. Vzdálenost mezi obloukem a volantem musí být menší než 250 mm, měřeno horizontálně v ose auta



Obr. 2 Přední oblouk

VZPĚRA HLAVNÍHO OBLOUKU

Hlavní oblouk musí být podepřen dvěma rovnými vzpěrami, jednou na každé straně (pravá a levá). Při pohledu z boku nesmí vzpěra hlavního oblouku a hlavní oblouk ležet na stejné straně vertikální čáry procházející nejvyšším bodem hlavního oblouku. Vzpěra musí být spojena s hlavním obloukem co nejvýš. Nesmí být niž než 160 mm od nejvyššího bodu oblouku. Úhel tvořený hlavním obloukem a vzpěrou hlavního oblouku musí být minimálně 30°.



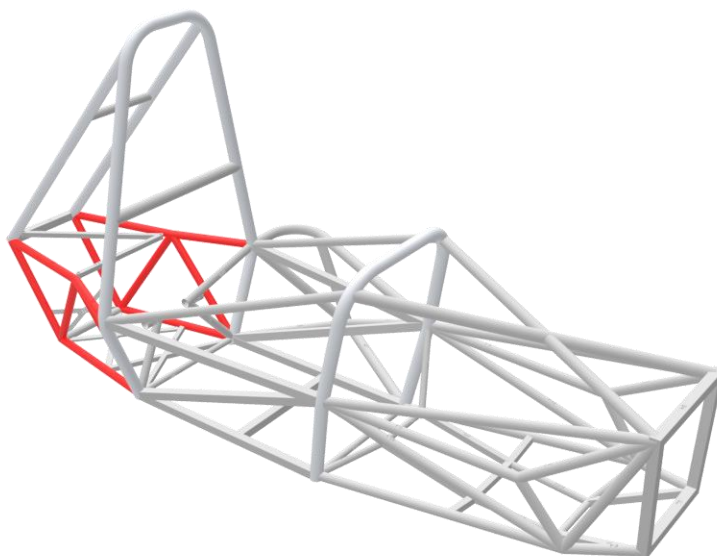
Obr. 3 Vzpěra hlavního oblouku

ZADNÍ PODPŮRNÁ STRUKTURA

Spodní konec vzpěry hlavního oblouku musí být podpořen minimálně dvěma členy rámu na obou stranách při dodržení správné triangulace. Horní člen podpory musí končit v bodu, kde



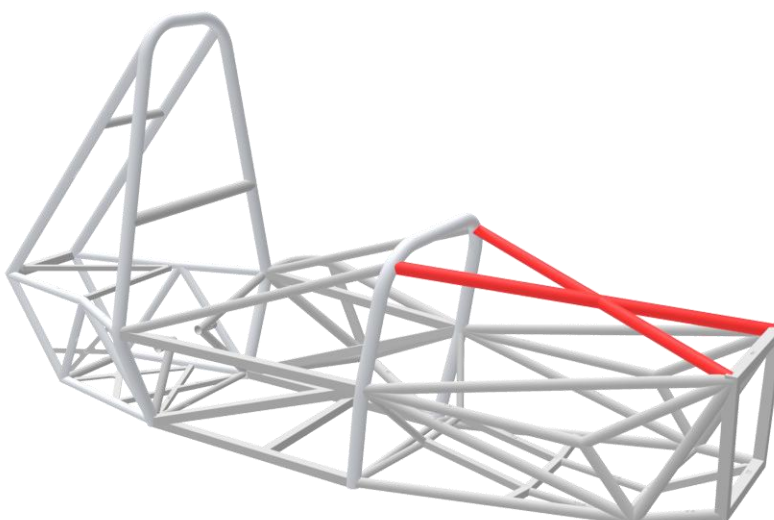
je k hlavnímu oblouku připojen horní člen boční nárazové struktury. Spodní člen podpory musí končit v bodu, kde je k hlavnímu oblouku připojen spodní člen boční nárazové struktury.



Obr. 4 Zadní podpůrná struktura

VZPĚRA PŘEDNÍHO OBLOUKU

Přední oblouk musí být podepřen dvě dvěma rovnými vzpěrami, jednou na každé straně (pravá a levá) směřujícími dopředu a přesahujícími ke struktuře před řidičovými chodidly. Vzpěra musí být spojena s předním obloukem co nejvýš. Nesmí být níž než 50 mm od nejvyššího bodu oblouku. Pokud je přední oblouk skloněn o víc jak 10° dozadu, tak musí být podepřen další vzpěrou.

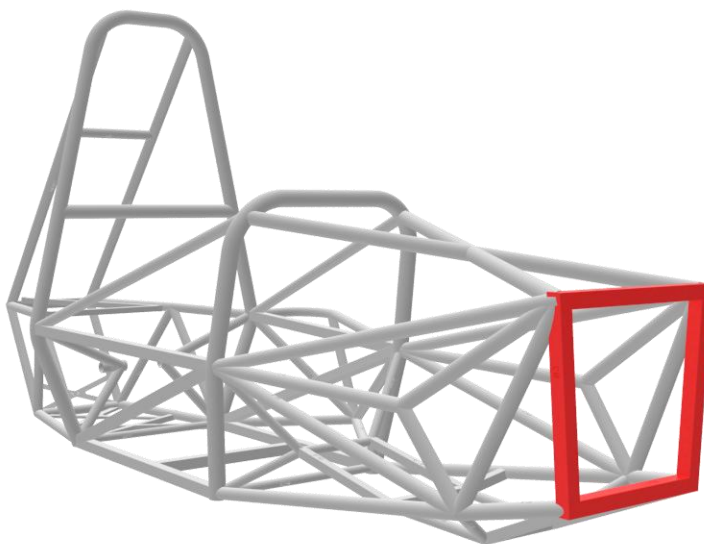


Obr. 5 Vzpěra předního oblouku



PŘEDNÍ NÁRAZOVÁ PŘEPÁŽKA

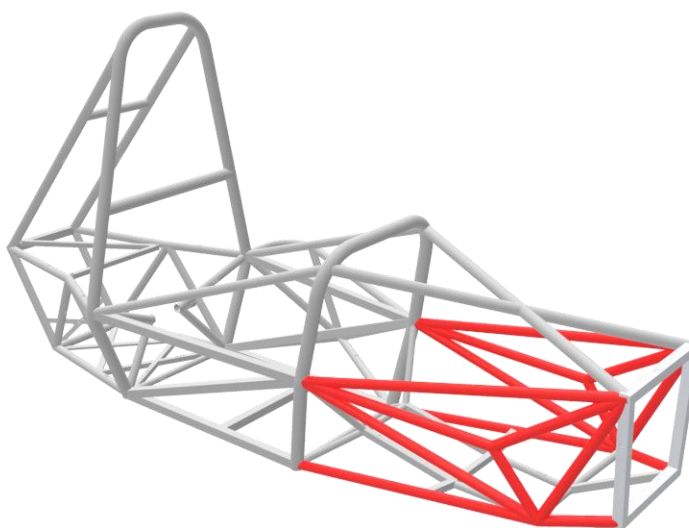
Musí být umístěna před chodidly řidiče, když jsou položeny na pedálech, ale nepůsobí na ně silou. Je k ní připojen deformační člen.



Obr. 6 Přední nárazová přepážka

PŘEDNÍ PODPŮRNÁ STRUKTURA

Přední nárazová přepážka musí být podepřena minimálně třemi členy rámu na každé straně, horním členem, spodním členem a diagonálním členem. Horní podpůrný člen spojuje horní bod přední nárazové struktury s bodem na předním oblouku, kde je připojen horní člen boční nárazové struktury. Dolní podpůrný člen spojuje spodní bod přední nárazové struktury se spodním bodem předního oblouku. Diagonální podpůrný člen zajišťuje triangulaci.

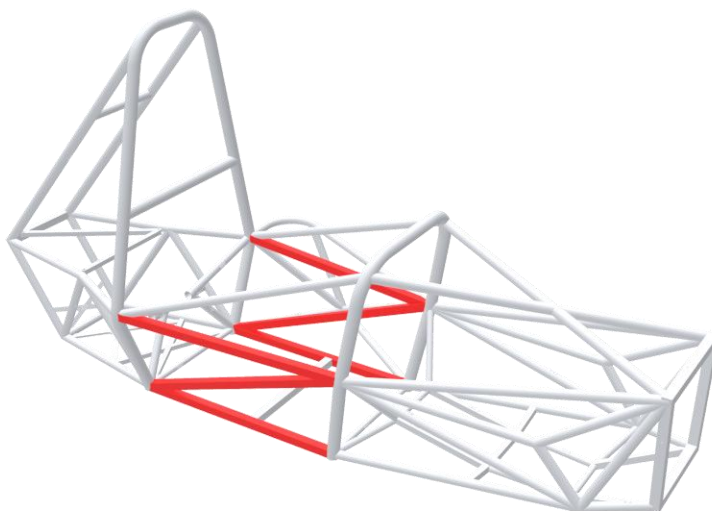


Obr. 7 Přední podpůrná struktura



BOČNÍ NÁRAZOVÁ STRUKTURA

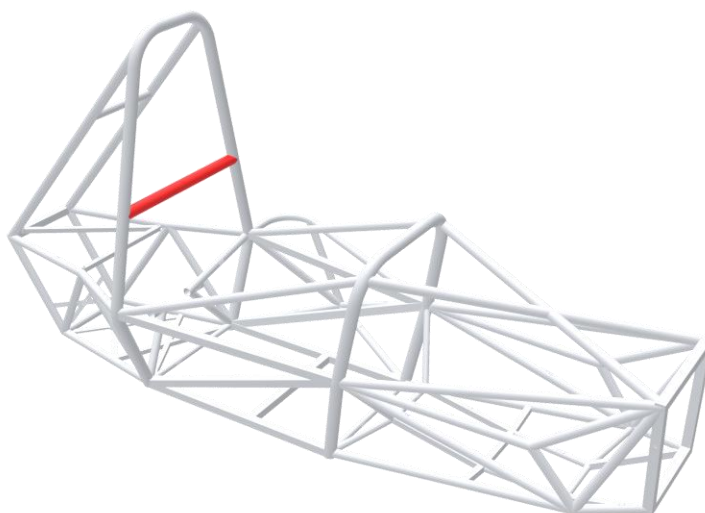
Tato struktura se nachází mezi předním a hlavním obloukem na obou stranách auta. Sestává ze třech členů. Spodní člen spojuje spodní body předního a hlavního oblouku. Horní člen spojuje přední a hlavní oblouk tak, aby celý člen byl v zóně mezi výškami 300 mm a 350 mm nad zemí. Diagonální člen zajišťuje triangulaci.



Obr. 8 Boční nárazová struktura

TRUBKA PRO MONTÁŽ RAMENNÍCH BEZPEČNOSTNÍCH PÁSŮ

K této trubce jsou připojeny ramenní popruhy bezpečnostních pásů řidiče. Od ramen řidiče mohou jít dozadu k montážní trubce v rozsahu úhlů od 10° nahoru do 20° dolů vůči horizontální rovině. Mezi středy těchto popruhů musí být vzdálenost 178 až 229 mm.

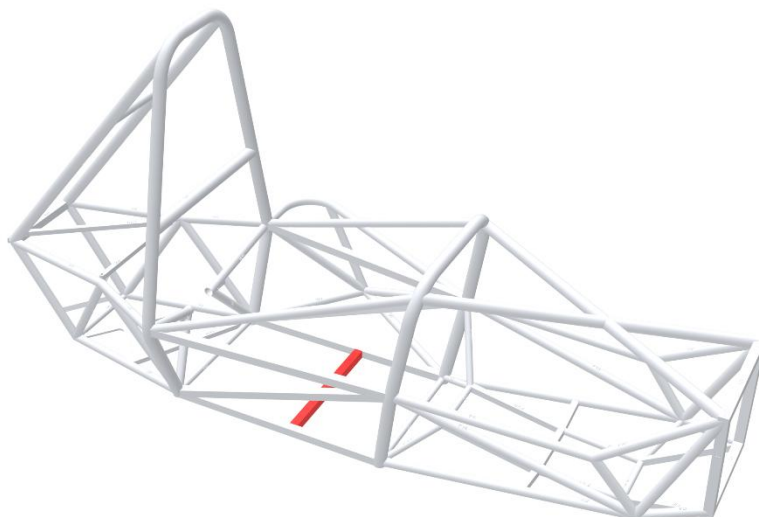


Obr. 9 Trubka pro montáž ramenních bezpečnostních pásů



TRUBKA PRO MONTÁŽ PÁNEVNÍCH BEZPEČNOSTNÍCH PÁSŮ

Zbylé čtyři popruhy z šestibodových pásů jsou připojeny k trubce pod sedačkou řidiče. Od tohoto montážního bodu mají svírat úhel 45° až 65° s horizontální rovinou. Tato trubka se má nacházet 0 až 76 mm před spojnicí rovin zad sedačky a dna sedačky.



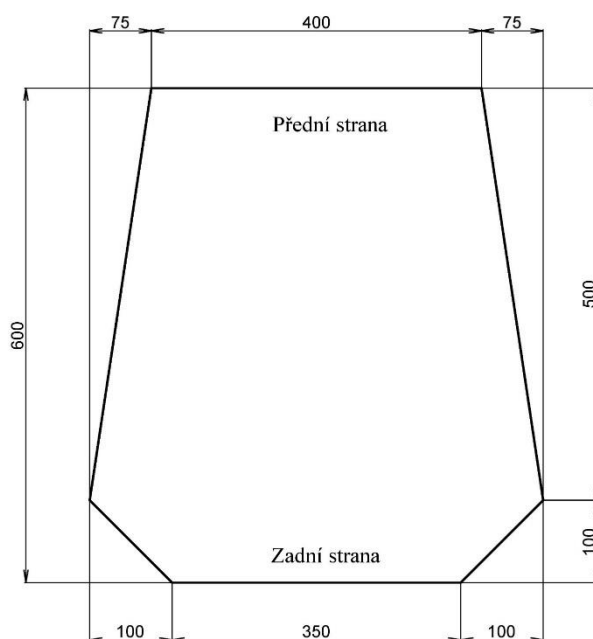
Obr. 10 Trubka pro montáž pánevních bezpečnostních pásů

1.1.2 GEOMETRICKÉ POŽADAVKY NA PRIMÁRNÍ STRUKTURU RÁMU

Na prostor kokpitu pro řidiče jsou pravidly kladeny požadavky pomocí předepsaných šablon, šablony vstupu do kokpitu, šablony vnitřního průřezu kokpitu a šablony řidiče.

ŠABLONA VSTUPU DO KOKPITU

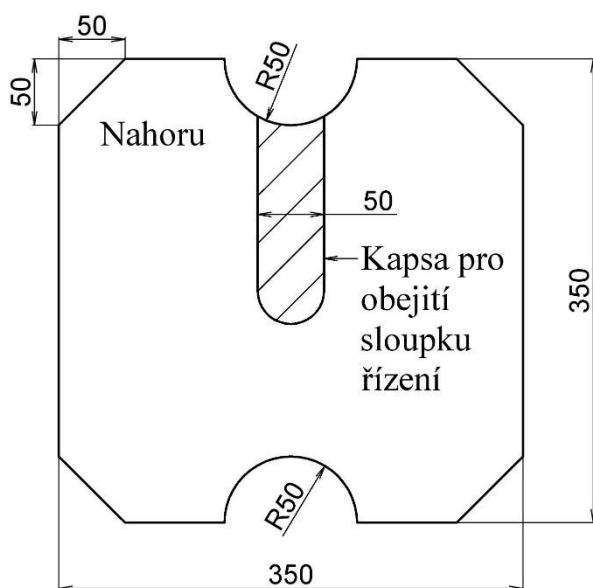
Šablona je při technické přejímce v horizontální poloze vertikálně vkládána do kokpitu až pod horní člen boční nárazové struktury. Posun v podélném směru je dovolen. K provedení této zkoušky může být odmontován volant, sloupek řízení, sedačka a všechny vycpávky. Řadicí mechanismus nemůže být odmontován, pokud není pevně spojen s volantem. S tepelným štítem nesmí být manipulováno.



Obr. 11 Šablona vstupu do kokpitu

ŠABLONA VNITŘNÍHO PRŮŘEZU KOKPITU

Šablona je při technické přejímce posouvána ve vertikální poloze kokpitem od předního oblouku dopředu až do vzdálenosti 100 mm od nejzadnějšího pedálu ve výchozí poloze. Pokud jsou pedály nastavitelné, musí být nastavené do nej přednější polohy. Šablona může mít tloušťku maximálně 7 mm. K provedení této zkoušky může být odmontován volant a kterýkoliv kryt chránící řidičovy nohy proti kontaktu s ostrými nebo pohyblivými částmi vozu, který lze odmontovat bez použití nástrojů a s řidičem v sedačce vozu. Sedačka nesmí být odmontována. Kabely, dráty nebo hadice nesmí bránit průchodu této šablony kokpitem.

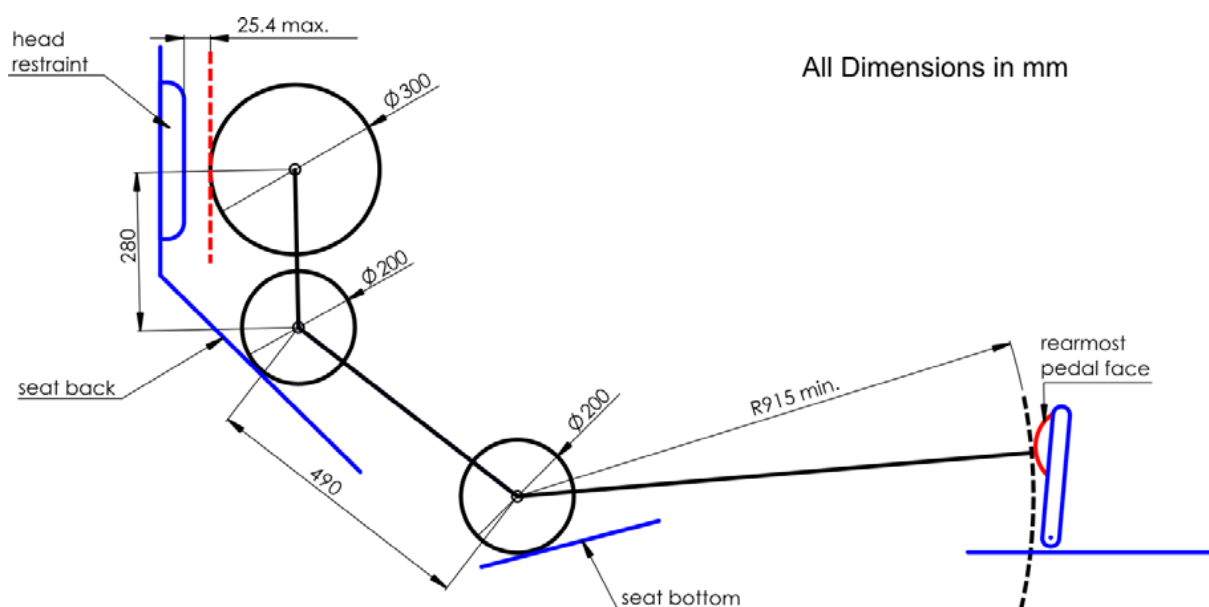


Obr. 12 Šablona vnitřního průřezu kokpitu



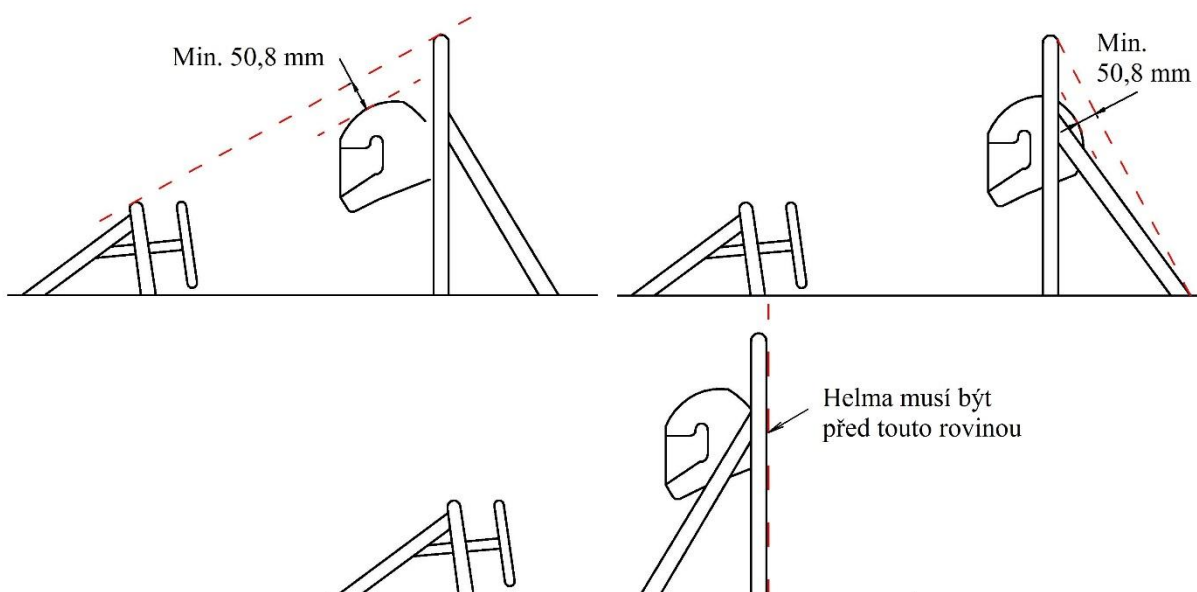
ŠABLONA ŘIDIČE

Šablona reprezentuje 95percentilového muže. Je tvořena třemi spojenými kruhy. Kruh o průměru 200 mm reprezentuje boky a hýždě. Kruh o průměru 200 mm reprezentuje ramena a krk. Kruh o průměru 300 mm reprezentuje hlavu s helmou. Kruhy o průměru 200 mm mají středy vzdálené 490 mm. Kruh o průměru 200 mm reprezentující ramena a kruh o průměru 300 mm reprezentující hlavu s helmou mají středy vzdálené 280 mm. Šablona se do vozu usazuje následovně. Sedačka je v nejzadnější poloze. Pedály jsou v nejpřednější poloze. Spodní kruh reprezentující pánev je usazen na dno sedačky tak, aby vzdálenost mezi jeho středem a nejzadnější plochou pedálů byla minimálně 915 mm. Střední kruh reprezentující ramena je opřen o záda sedačky. Horní kruh reprezentující helmu je ve vzdálenosti maximálně 25,4 mm od opěrky hlavy.



Obr. 13 Šablona řidiče

Helma šablony řidiče nebo kteréhokoliv řidiče normálně usazeného a připoutaného v sedačce musí dodržet minimální vzdálenost 50,8 mm od spojnice vrchu hlavního oblouku a vrchu předního oblouku, minimální vzdálenost 50,8 mm od spojnice vrchu hlavního oblouku a spodního konce vzpěr hlavního oblouku, pokud jsou vzpěry umístěny za hlavním obloukem. Pokud jsou vzpěry hlavního oblouku umístěny před hlavním obloukem, tak helma musí být před rovinou definovanou zadní plochou hlavního oblouku.



Obr. 14 Pozice helmy vůči rámu

1.1.3 MATERIÁLOVÉ A ROZMĚROVÉ POŽADAVKY NA ČÁSTI PRIMÁRNÍ STRUKTURY

Materiál použitý při stavbě trubkového rámu musí být ocel o minimálních vlastnostech dle Tab. 1.

Tab. 1 Minimální vlastnosti oceli

Youngův modul pružnosti	$E = 200 \text{ GPa}$
Mez kluzu	$R_e = 305 \text{ MPa}$
Mez pevnosti	$R_m = 365 \text{ MPa}$

Minimální základní rozměry polotovarů pro části primární struktury rámu jsou uvedeny v Tab. 2.

Tab. 2 Základní rozměry částí primární struktury rámu

Části primární struktury	Rozměry polotovaru
Hlavní oblouk, přední oblouk, trubka pro montáž ramenních bezpečnostních pásů	$\varnothing 25,4 \text{ mm} \times 2,4 \text{ mm}$ nebo $\varnothing 25 \text{ mm} \times 2,5 \text{ mm}$
Boční nárazová struktura, přední nárazová překážka, vzpěry oblouků, trubka pro připojení břišních bezpečnostních pásů	$\varnothing 25,4 \text{ mm} \times 1,65 \text{ mm}$ nebo $\varnothing 25 \text{ mm} \times 1,75 \text{ mm}$ nebo $\varnothing 25,4 \text{ mm} \times 1,6 \text{ mm}$ nebo $25 \text{ mm} \times 1,2 \text{ mm}$
Přední podpůrná struktura, zadní podpůrná struktura	$\varnothing 25,4 \text{ mm} \times 1,2 \text{ mm}$ nebo $\varnothing 25 \text{ mm} \times 1,5 \text{ mm}$ nebo $\varnothing 26 \text{ mm} \times 1,2 \text{ mm}$



Pravidla umožňují použití alternativních materiálů a rozměrů pro všechny části primární struktury kromě hlavního a předního oblouku a vzpěry hlavního oblouku, pro které lze použít z hlediska návrhu pouze standardní materiál. Je možné použít hliníkové polotovary o minimální tloušťce stěny 3 mm, které lze svařit, nebo titanové či kompozitní polotovary, které musí být spojeny šroubovým spojem. V případě využití této části pravidel je nutné vyplnit a odeslat technické komisi závodů dokument Structural Equivalency Spreadsheet (dále jen SES), který slouží k ověření, že byla dodržena pravidla ošetřující použití alternativních materiálů a rozměrů.

Pro ocelové polotovary je možné použít menší tloušťku stěny. Je třeba dodržet rovnici porovnávající základní a alternativní materiál. Tato rovnice vyjadřuje zachování ohybové tuhosti.

$$E_z * I_z \leq E_a * I_a \quad (1)$$

Součin Youngova modulu E [MPa] a kvadratického momentu průřezu k nejslabší ose I [mm⁴] u alternativního materiálu musí být stejný nebo větší než u základního materiálu.

Při použití ušlechtilých ocelí musí materiál přenést stejné zatížení jako základní materiál.

$$S_z * R_{ez} \leq S_a * R_{ea} \quad (2)$$

Součin průřezu profilu S [mm²] a meze kluzu materiálu R_e [MPa] u alternativního materiálu musí být stejný nebo větší než u základního materiálu.

$$S_z * R_{mz} \leq S_a * R_{ma} \quad (3)$$

Součin průřezu profilu S [mm²] a meze pevnosti materiálu R_m [MPa] u alternativního materiálu musí být stejný nebo větší než u základního materiálu.

Minimální tloušťky stěn ocelových polotovarů jsou uvedeny v Tab. 3. případně v Tab. 4, pokud se provedou testy H-vzorků.

Tab. 3 Alternativní ocelové polotovary

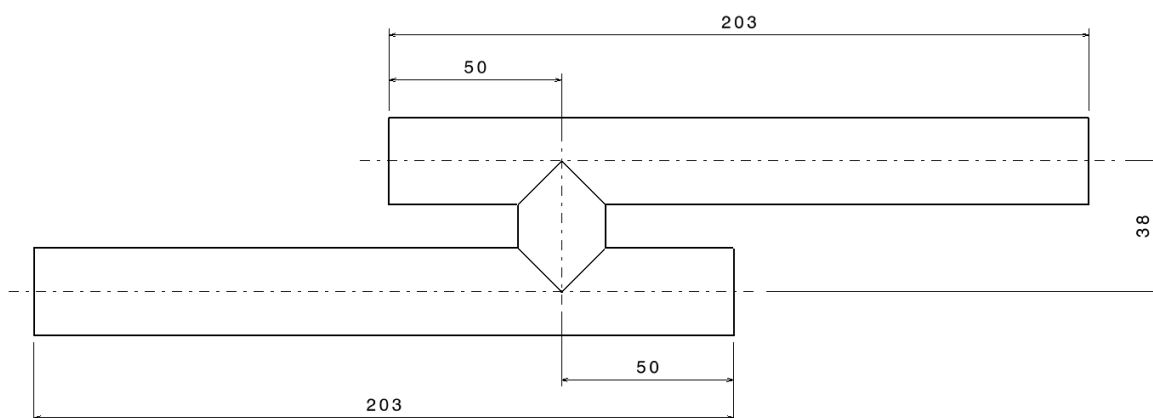
Části primární struktury	Minimální tloušťka stěny
Hlavní oblouk, přední oblouk, trubka pro montáž ramenních bezpečnostních pásů	2,0 mm
Boční nárazová struktura, přední nárazová překážka, vzpěry oblouků, trubka pro připojení břišních bezpečnostních pásů, přední podpůrná struktura, zadní podpůrná struktura	1,2 mm



Tab. 4 Alternativní ocelové polotovary vyžadující testy H-vzorků

Části primární struktury	Minimální tloušťka stěny
Hlavní oblouk, přední oblouk, trubka pro montáž ramenních bezpečnostních pásů	1,6 mm
Boční nárazová struktura, přední nárazová přepážka, vzpěry oblouků, trubka pro připojení břišních bezpečnostních pásů, přední podpůrná struktura, zadní podpůrná struktura	0,9 mm

H-vzorek je svařen ze dvou paralelních trubek délky 203 mm osově od sebe vzdálených 38 mm. Spojovací trubka je kolmá k dvěma paralelním trubkám. Její osa je 50 mm od horního konce jedné trubky a 50 mm od spodního konce druhé trubky viz Obr. 15.



Obr. 15 H-vzorek

Vzorek musí být vyroben ze stejného materiálu, jako je konstrukce rámu. Polotovar se slabší stěnou musí být použit jako krátká příčná trubka. Konce vzorku mohou být upraveny kvůli montáži do trhačky. Tato montáž musí být dodržena u všech vzorků. Tepelné zpracování vzorků musí být stejné jako tepelné zpracování rámu. Úpravy svarů vzorků, jako je například broušení nebo pískování, jsou zakázány.

Pro každou použitou alternativní kombinaci je třeba otestovat dva alternativní a dva základní vzorky a mezi sebou je porovnat. Minimálně se tedy testují 4 vzorky. Vzorky jsou trhány až do mezního stavu porušení spojitosti. Jsou vykresleny křivky závislosti síly na deformaci. Kombinace alternativních polotovarů lze použít, pokud maximální síla obou alternativních H-vzorků dosáhne minimálně 95% maximální síly obou H-vzorků ze základních polotovarů. Výsledky těchto testů musí být obsaženy v dokumentu SES.

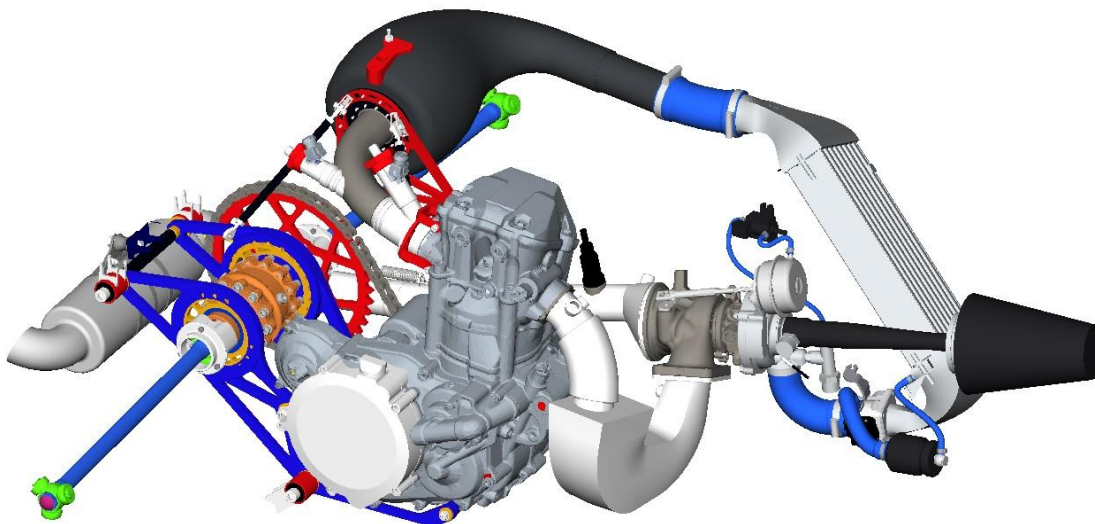
1.2 POŽADAVKY DANÉ KONSTRUKCÍ VOZU DRAGON 5

Tvar a rozměry rámu nejvíce určuje konstrukce jednotlivých částí vozu Dragon 5. Nejvýraznější geometrická omezení plynou od podvozku a motoru s hnacím ústrojím. Velké požadavky jsou kladeny také na váhu a výšku těžiště od země. Rám má mít dostatečnou torzní tuhost, aby umožnil funkci zavěšení a přenesl dostatečnou zpětnou vazbu řidiči.



MOTOR S HNACÍM ÚSTROJÍM

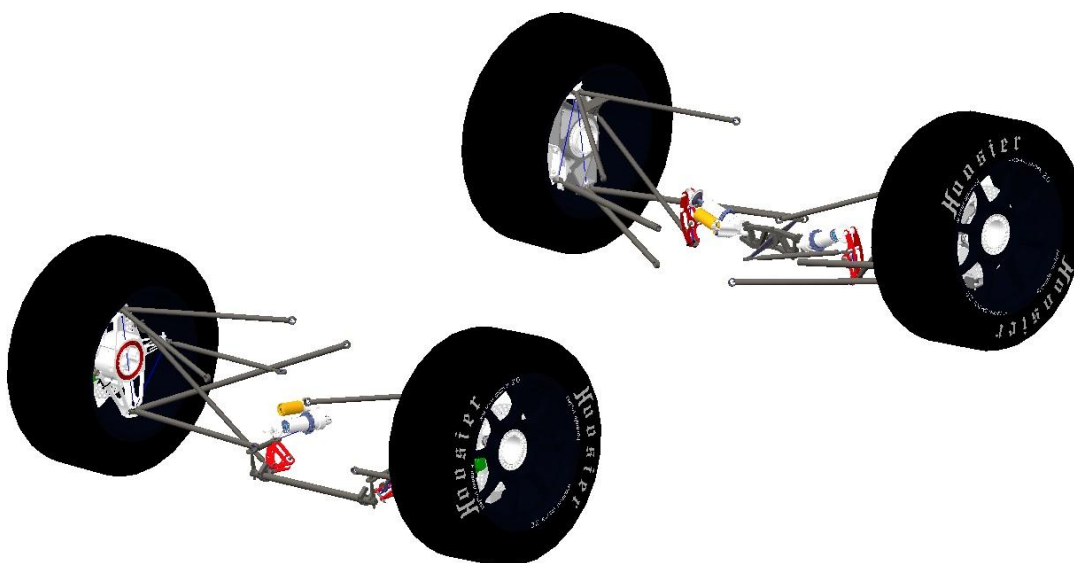
Sestava motoru s periferiemi a hnacím ústrojím je uložena co nejniž kvůli výšce těžiště. Na pravé straně je nejvýraznější víko spojky, na levé straně řetězový převod. Motor s diferenciálem jsou pevně spojeny do jedné sestavy, která je přes silentbloky připojena k rámu. Proto se do rámu nepřenáší síly z řetězového převodu, ale jen vibrace celé sestavy a výsledný krouticí moment diferenciálu.



Obr. 16 Sestava motoru s hnacím ústrojím

PODVOZEK

Od podvozku je odvozen konkrétní tvar primární struktury v přední a zadní části rámu. Uzlové body rámu jsou obvykle umístěny v blízkosti bodů zavěšení podvozku na rám. Tam, kde není v blízkosti primární struktura, je třeba vytvořit strukturu, která zachytí síly z podvozku a přenesení je do zbytku rámu. Tato struktura není omezená pravidly soutěže Formule Student.



Obr. 17 Sestava podvozku



2 VOLBA POLOTOVARŮ A MATERIÁLU

Pro každou část rámu, jak pro primární struktury, tak i pro ostatní struktury, je třeba zvolit polotovar a materiál odpovídající všem požadavkům na něj kladeným. Všechny polotovary jsou voleny z katalogu **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů..**

2.1 POLOTOVARY PRO ČÁSTI PRIMÁRNÍ STRUKTURY

Tyto polotovary byly voleny s pomocí dokumentu SES, kde se ověřuje splnění pravidel pro každou část primární struktury.

Hlavním kritériem je rovnice (1). Jsou voleny ocelové polotovary, takže lze předpokládat, že Youngův modul bude stejný u základního i alternativního materiálu. Porovnávány jsou tedy jen kvadratické momenty průřezu.

Pro kruhový polotovar je kvadratický moment průřezu dle rovnice (4).

$$I = \frac{(D^4 - (D - 2 * t)^4) * \pi}{64} \quad (4)$$

Kde $I [mm^4]$ je kvadratický moment průřezu kolem nejslabší osy, $D [mm]$ je vnější průměr polotovaru a $t [mm]$ je tloušťka stěny polotovaru.

Pro čtvercový polotovar neboli jelek je kvadratický moment průřezu dle rovnice (5).

$$I = \frac{a^4 - (a - 2 * t)^4}{12} \quad (5)$$

Kde $I [mm^4]$ je kvadratický moment průřezu kolem nejslabší osy, $a [mm]$ je charakteristický rozměr polotovaru a $t [mm]$ je tloušťka stěny polotovaru.

Poměrné porovnání základních (index b) a alternativních (index a) polotovarů z hlediska zachování ohybové tuhosti jednotlivých celků primární struktury je v rovnici (6).

$$k = \frac{n_a * I_a}{n_b * I_b} * 100 \quad (6)$$

Součinitel $k [\%]$ vyjadřuje procentuální splnění rovnice (1), $n [-]$ je počet trubek v dané části primární struktury, $I [mm^4]$ je kvadratický moment průřezu k nejslabší ose trubky.

Pro splnění rovnice (1) je třeba, aby hodnota k z rovnice (6) vyšla minimálně 100 %

Výpočet probíhá pro jednu polovinu auta (levou nebo pravou). Výběr polotovarů je shrnut v Tab. 5.



Tab. 5 Volba polotovarů pro primární strukturu

Část primární struktury	Alt. polotovar [mm]	Počet alt. trubek	I _a [mm ⁴]	k [%]
	Zákl. polotovar [mm]	Počet zákl. trubek	I _b [mm ⁴]	
Hlavní oblouk	Ø34,9 x 1,67	1	24124,75	213,10
	Ø25 x 2,5	1	11320,78	
Přední oblouk	Ø34,9 x 1,67	1	24124,75	213,10
	Ø25 x 2,5	1	11320,78	
Vzpěra hlavního oblouku	Ø28,6 x 1,67	1	12857,38	148,02
	Ø25 x 1,75	1	8686,01	
Zadní podpůrná struktura	Ø25,4 x 0,9	3	5204,59	116,61
	Ø25,4 x 1,2	2	6695,05	
Vzpěra předního oblouku	Ø28,6 x 1,67	1	12857,38	148,02
	Ø25 x 1,75	1	8686,01	
Přední nárazová přepážka	25,4 x 25,4 x 0,9	2	8835,58	103,84
	Ø25,4 x 1,6	2	8508,82	
Přední podpůrná struktura	Ø25,4 x 0,9	4	5204,59	103,65
	Ø25,4 x 1,2	3	6695,05	
Boční nárazová struktura	25,4 x 25,4 x 0,9	3	8835,58	103,84
	Ø25,4 x 1,6	3	8508,82	
Trubka pro montáž ramenních bezpečnostních popruhů	Ø34,9 x 1,67	1	24124,75	213,10
	Ø25 x 2,5	1	11320,78	
Trubka pro montáž břišních bezpečnostních popruhů	25,4 x 25,4 x 0,9	1	8835,58	103,84
	Ø25,4 x 1,6	1	8508,82	

2.2 MATERIÁL PRO ČÁSTI PRIMÁRNÍ STRUKTURY

Materiál pro celý rám musí být svařitelný. Z tohoto důvodu je volen jeden druh oceli pro celý rám, aby se předešlo problémům se svařitelností.

Minimální charakteristiky materiálu jsou odvozeny úpravou rovnic (2) a (3). Z rovnice (2) je získána mez kluzu R_{ea} a z rovnice (3) mez pevnosti R_{ma} .

$$R_{ea} \geq R_{eb} * \frac{n_b * S_b}{n_a * S_a} \quad (7)$$

$$R_{ma} \geq R_{mb} * \frac{n_b * S_b}{n_a * S_a} \quad (8)$$

Kde R_e [MPa] je mez kluzu materiálu, R_m [MPa] je mez pevnosti materiálu, n [-] je počet trubek v dané části primární struktury a S [mm²] je průřez polotovaru.



Hledaná hodnota každé meze je nejvyšší hodnota z minimálních mezních napětí získaných po dosazení rozměrů jednotlivých polotovarů. To proto, aby materiál vyhověl pro všechny části primární struktury.

Tab. 6 Výpočet minimálních materiálových vlastností

Část primární struktury	Min. mez kluzu [MPa]	Min. mez pevnosti [MPa]
Hlavní oblouk	309,2	370,0
Přední oblouk	309,2	370,0
Vzpěra hlavního oblouku	275,9	330,2
Zadní podpurná struktura	267,8	320,5
Vzpěra předního oblouku	275,9	330,2
Přední nárazová přepážka	413,7	495,1
Přední podpurná struktura	301,3	360,5
Boční nárazová struktura	413,7	495,1
Trubka pro montáž ramenních bezpečnostních popruhů	309,2	370,0
Trubka pro montáž břišních bezpečnostních popruhů	413,7	495,1
Maximum	413,7	495,1

V Tab. 6 jsou shrnuty výsledky rovnic (7) a (8) po dosazení rozměrů polotovarů. Z těchto výsledků plynou minimální vlastnosti alternativního materiálu.

Tab. 7 Minimální vlastnosti alternativního materiálu

Youngův modul	E = 200 GPa
Mez kluzu	Re = 413,7 MPa
Mez pevnosti	Rm = 495,1 MPa

Proto je zvolen materiál SAE AISI 4130 označený dle DIN 17200 jako 25CrMo4, 15 130 dle ČSN.

V Tab. 8 jsou uvedeny jeho pevnostní charakteristiky.

Tab. 8 Vlastnosti alternativního materiálu

Youngův modul	E = 200 až 210 GPa
Mez kluzu	Re = 470 až 960 MPa
Mez pevnosti	Rm = 560 až 1040 MPa

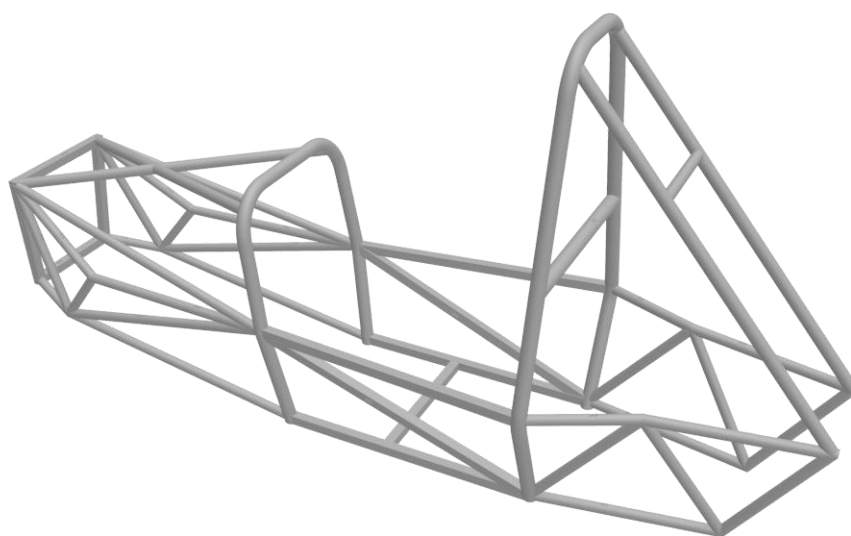


3 TVORBA GEOMETRIE

Geometrie rámu je tvořena primární strukturou rámu a ostatními strukturami. Ostatní struktury slouží k doplnění vlastností rámu dle požadavků. Například k uchycení podvozku v místech, kde se nenachází v blízkosti primární struktura. Konkrétně u podvozku je nutné brát zřetel na pohyb podvozku, aby nedocházelo ke kolizím podvozku s rámem.

3.1 GEOMETRIE PRIMÁRNÍ STRUKTURY

Tato struktura je odvozena od požadavků na ni kladených pravidly Formule Student a konstrukcí ostatních částí vozu.



Obr. 18 Primární struktura rámu

3.1.1 PARALELNÍ BOČNÍ NÁRAZOVÁ STRUKTURA

V pravidlech soutěže Formule Student je uvedeno, že jakákoliv část sání motoru, která se nachází níž než 350 mm nad zemí, musí být chráněna proti nárazu z boku nebo zezadu strukturou splňující pravidla pro boční nárazovou strukturu.

Vzhledem k filozofii vozu Dragon 5, kdy je upřednostňována nízká výška těžiště při zachování poměrně nízké hmotnosti před nejnížší možnou hmotností, byla vytvořena paralelní boční nárazová struktura na levé straně rámu. Ta má za úkol ochránit části sání motoru, které leží vně původní primární struktury rámu a zároveň jsou níž než 350 mm nad zemí. Jedná se o vzduchový filtr, restriktor, klapku a mezichladič stlačeného vzduchu.

Stejně jako v Tab. 5 je i v Tab. 9 volba polotovaru pro paralelní boční nárazovou strukturu.

Tab. 9 Volba polotovaru pro paralelní boční nárazovou strukturu

Část primární struktury	Alt. Polotovaz [mm]	Počet alt. trubek	Ia [mm ⁴]	k [%]
	Zákl. polotovaz [mm]	Počet zákl. trubek	Iz [mm ⁴]	
Paralelní boční nárazová struktura	Ø25,4 x 0,9	6	5204,59	122,33
	Ø25,4 x 1,6	3	8508,82	



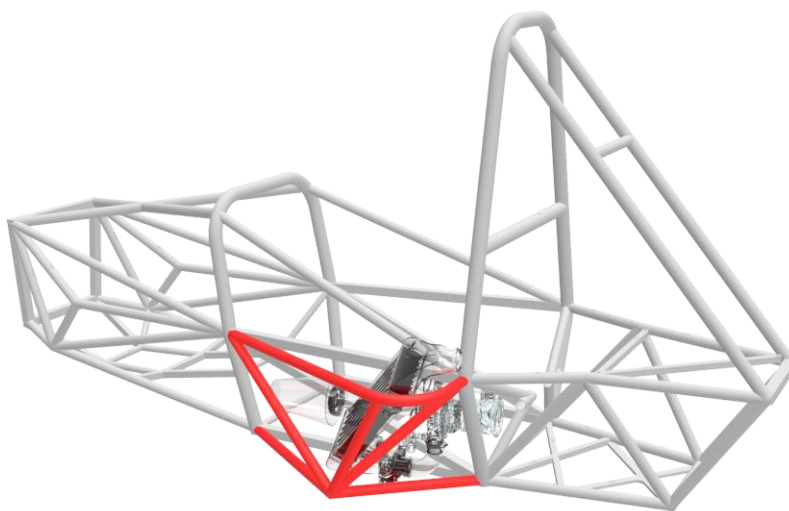
Kontrola, jestli zvolený profil a materiál přenesou stejné zatížení jako základní profil a materiál, je stejně jako v Tab. 6 uvedena v Tab. 10

Tab. 10 Kontrola pevnosti materiálu

Část primární struktury	Min. mez kluzu [MPa]	Min. mez pevnosti [MPa]
Paralelní boční nárazová struktura	263,4	315,2

Hodnoty v Tab. 10 jsou menší v Tab. 7. Z toho plyne, že zvolený materiál vyhovuje.

Paralelní boční nárazová struktura je zobrazena na Obr. 19 včetně částí sání, které chrání.



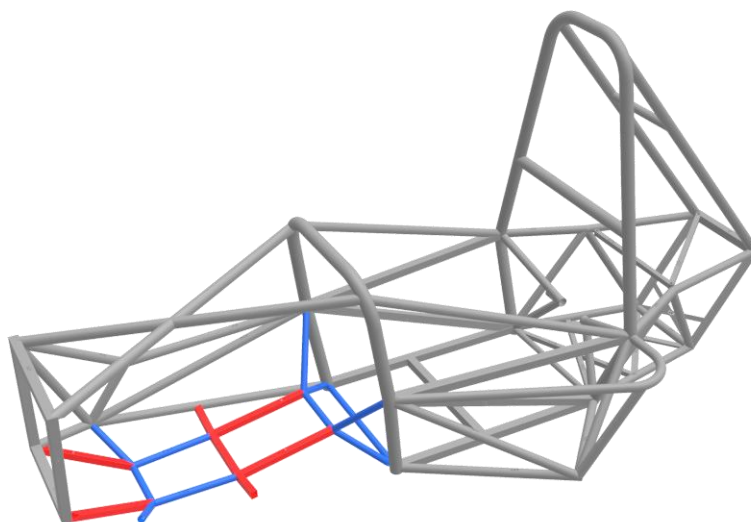
Obr. 19 Paralelní boční nárazová struktura

3.2 GEOMETRIE DOPLŇKOVÝCH STRUKTUR

Samotná primární struktura nesplňuje všechny konstrukční požadavky na rám kladené. Proto musí být doplněna ostatními strukturami.

3.2.1 PŘEDNÍ ČÁST RÁMU

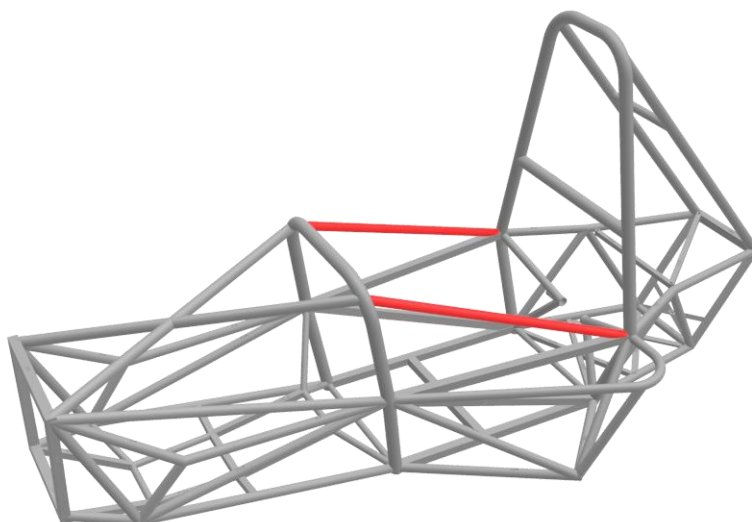
V přední části je třeba uchytit sestavu pedálů a zbývající části podvozku k rámu. Konkrétně spodní rameno, hřeben řízení a tlumicí jednotku. Na Obr. 20 je vidět doplňková struktura. Modře jsou označeny profily $\varnothing 19 \times 0,9$ mm. Červeně jsou označeny profily $19 \times 19 \times 0,9$ mm.



Obr. 20 Doplnková struktura v přední části rámu

3.2.2 STŘEDNÍ ČÁST RÁMU

Ve střední části je potřeba vytvořit výztuhy ke zvýšení torzní tuhosti rámu. Ty slouží také pro usnadnění výstupu a nástupu řidiče do kokpitu vozu. Na Obr. 21 jsou vidět přidání profily Ø 25,4 x 0,9 mm.



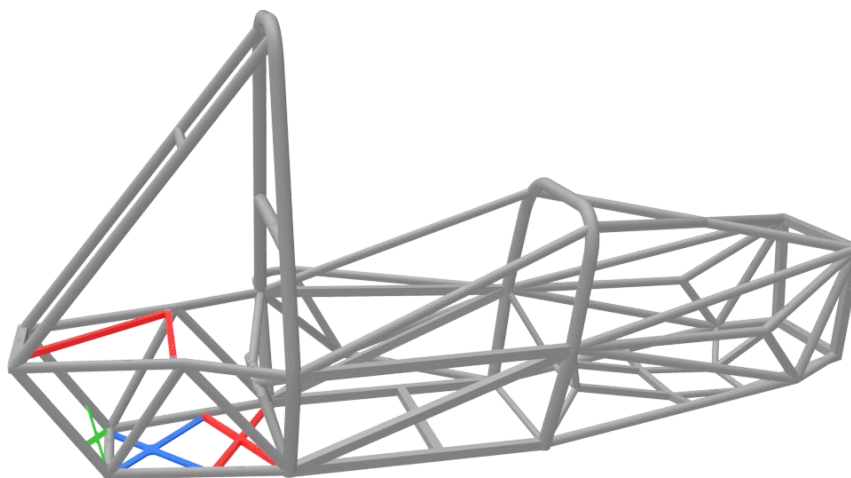
Obr. 21 Zesílení střední části rámu

3.2.3 ZADNÍ ČÁST RÁMU

V zadní spodní části rámu je třeba vytvořit triangulaci v horizontální rovině a zároveň podpořit místa, kde jsou připojeny tlumiče k rámu. Zároveň je třeba brát v potaz nízko položený motor.



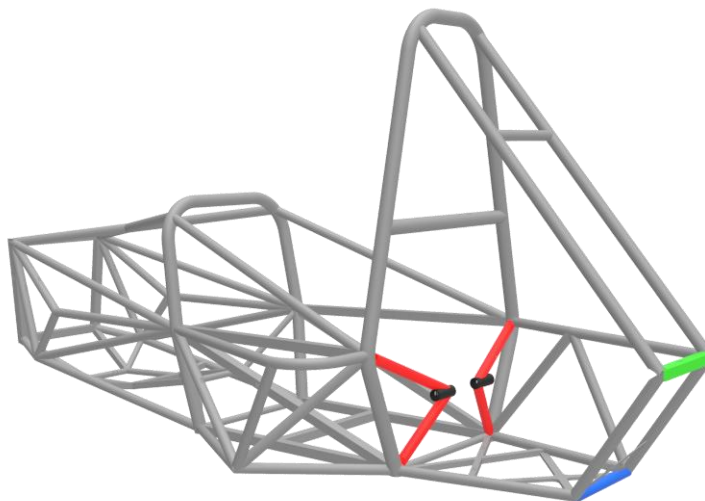
V zadní horní části rámu je potřeba rozepřít mezi sebou uzlové body zadní podpůrné struktury, aby nedocházelo k deformacím a zbytečnému ovlivnění jízdních vlastností vozu.



Obr. 22 Triangulace zadní části rámu

Na Obr. 22 je zeleně označen plech o průřezu 15 x 1,5 mm, modře profil 7 x 20 x 1,5 mm a červeně profil 15,9 x 15,9 x 0,9 mm.

K rámu je třeba připojit sestavu motoru s hnacím ústrojím. Celá tato sestava je s rámem spojena pomocí pružných silentbloků, takže je třeba vytvořit držáky silentbloků v přední části motorového prostoru a trubky pro přivaření těchto držáků v zadní části motorového prostoru.



Obr. 23 Trubky pro připojení motoru k rámu

Na Obr. 23 jsou černě označena pouzdra silentbloků, červeně profil Ø25,4 x 0,9 mm, modře profil Ø25,4 x 1,67 mm a zeleně 25,4 x 25,4 x 0,9 mm.

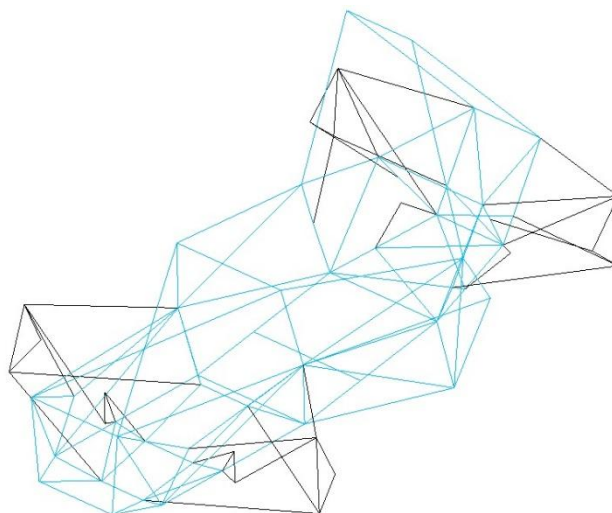
4 TORZNÍ TUHOST

Torzní tuhost rámu se u vozidel projevuje při průjezdu zatáčkou. Jedná se o odpor rámu proti zkroucení vlivem vnějších sil přenesených přes zavěšení do rámu.

4.1 PRUTOVÁ NÁHRADA

Pro simulaci torzní tuhosti je nutné, aby byl deformován pouze zkoumaný rám. Náhrady zavěšení musí být dokonale tuhé nebo tomuto stavu blízké.

Simulace se provádí nahrazením modelu rámu prutovým tělesem [3], kdy každý prut má přisouzený rozměr nahrazeného profilu a vlastnosti jeho materiálu. Při tvorbě prutové náhrady došlo k částečným zjednodušením modelu. Ohnuté trubky byly nahrazeny lomenými křivkami. Náhrady zavěšení byly zavedeny do blízkých uzlů. Prutová náhrada je zobrazena na Obr. 24.



Obr. 24 Prutová náhrada rámu

Na Obr. 24 je modře zobrazena prutová náhrada rámu a černě prutová náhrada zavěšení.

4.2 OKRAJOVÉ PODMÍNKY

Okrajové podmínky odebírají na třech kolech různé stupně volnosti posunu. Na posledním kole je aplikováno zatížení ve svislém směru. Zde se také zjišťuje vzniklá deformace. Všechny rotační stupně volnosti byly ponechány volné. Okrajové podmínky a zatížení jsou uvedeny v Tab. 11.

Tab. 11 Okrajové podmínky pro simulaci torzní tuhosti

Kolo	Okrajová podmínka ve směru X	Okrajová podmínka ve směru Y	Okrajová podmínka ve směru Z
levé zadní	X	X	X
pravé zadní	X	-	X
pravé přední	-	-	X
levé přední	-	-	1000 N



V Tab. 11 je použit souřadný systém, kde X míří v podélném směru vozu dopředu, Y v příčném směru vozu doleva a Z ve svislém směru nahoru. Kde je použit symbol X, tam bylo zabráněno posuvu v tomto směru.

4.3 VÝPOČET TORZNÍ TUHOSTI

Torzní tuhost lze spočítat na základě výstupu ze simulace, kdy je získána deformace. Torzní tuhost je definována rovnicí (9).

$$C = \frac{M}{\alpha} \quad (9)$$

Kde $C [Nm/^\circ]$ je torzní tuhost, $M [Nm]$ je krouticí moment a $\alpha [^\circ]$ je úhel natočení.

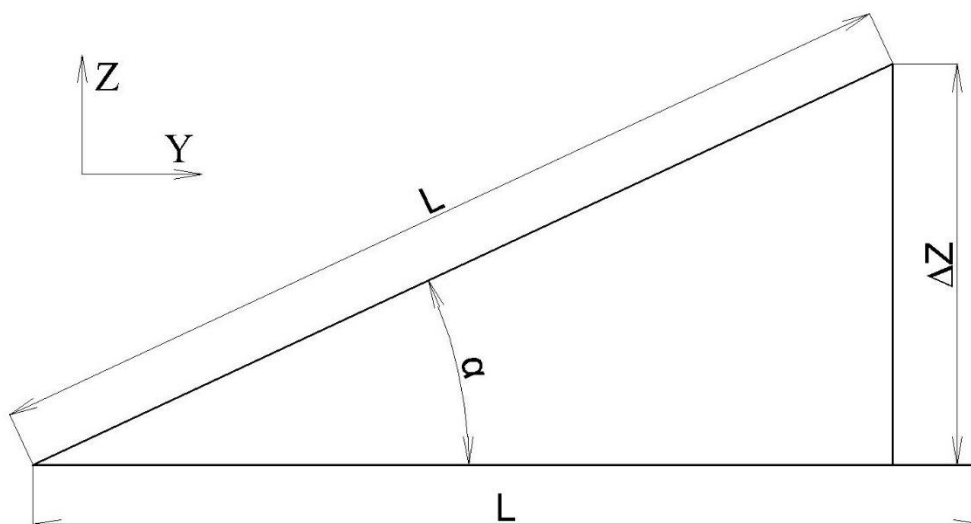
Výpočet momentu M je uveden v rovnici (10).

$$M = F * L \quad (10)$$

Kde $M [Nm]$ je krouticí moment, $F [N]$ je zatěžující síla a $L [mm]$ je rozchod přední nápravy. V případě vozu Dragon 5 má přední náprava rozchod $L = 1190 \text{ mm}$.

Vzhledem k malým rozměrům deformace vůči rozchodu kol může být výpočet úhlu natočení poměrně zjednodušen.

Úhel α zjistíme z deformace prutové náhrady a znalosti jejích rozměrů dle Obr. 25.



Obr. 25 Výpočet úhlu natočení z deformace rámu

$$\alpha = \sin^{-1} \frac{\Delta Z}{L} \quad (11)$$

Kde $\alpha [^\circ]$ je úhel natočení, $\Delta Z [mm]$ je deformace ve směru Z v místě působení zatěžující síly a $L [mm]$ je rozchod přední nápravy.



Výsledný vzorec pro výpočet torzní tuhosti C je po dosazení rovnic (10) a (11) do rovnice (9) uveden v rovnici (12).

$$C = \frac{F * L}{\sin^{-1} \frac{\Delta Z}{L}} \quad (12)$$

Důležitým ukazatelem vhodnosti doplňkové struktury je měrná torzní tuhost, což je torzní tuhost vztažená k hmotnosti rámu. Pokud se přidáním struktury zvýší měrná torzní tuhost rámu, tak je tato struktura efektivní. To znamená, že přidá vůči své vlastní hmotnosti velkou torzní tuhost. Zároveň je dobré mít na zřeteli, jestli je třeba ještě zvyšovat torzní tuhost rámu, protože s tím roste i jeho hmotnost.

$$c = \frac{C}{m} \quad (13)$$

Kde c [$Nm/^\circ kg$] je měrná torzní tuhost, C [$Nm/^\circ$] je torzní tuhost a m [kg] je hmotnost rámu.

4.4 VYHODNOCENÍ SIMULACE

Byla provedena simulace čtyř verzí rámu. Jednotlivé verze jsou popsány v Tab. 12.

Tab. 12 Verze rámu

Verze rámu	Seznam struktur obsažených v rámu
1	Primární struktura rámu + přední doplňková struktura + montážní trubky motoru
2	Verze rámu 1 + paralelní boční nárazová struktura
3	Verze rámu 2 + výztuhy střední části rámu
4	Verze rámu 3 + horizontální výztuhy zadní části rámu

V Tab. 13 jsou shrnuty všechny výsledky ze simulace torzní tuhosti. Tabulka obsahuje výpočty z rovnic (12) a (13).

Tab. 13 Výsledky simulace torzní tuhosti

Verze rámu	Hmotnost m [kg]	Deformace ΔZ [mm]	Torzní tuhost C [$Nm/^\circ$]	Měrná torzní tuhost c [$Nm/^\circ kg$]
1	22,728	25,8293	956,8	42,1
2	24,239	9,8172	2517,5	103,9
3	25,053	6,8711	3597,0	143,6
4	26,282	5,2872	4674,6	177,9

Nárůst jak torzní tuhosti, tak i měrné torzní tuhosti je jasně patrný. Doplňkové struktury tak plní z hlediska torzní tuhosti svůj účel. Torzní tuhost dosahuje hodnoty doporučené odbornou literaturou, což je $4000 Nm/^\circ$ pro malé formulové vozy [3].

5 MECHANICKÉ ZKOUŠKY

K ověření teoretických výpočtů a hodnot je třeba provést experimentální zkoušení.

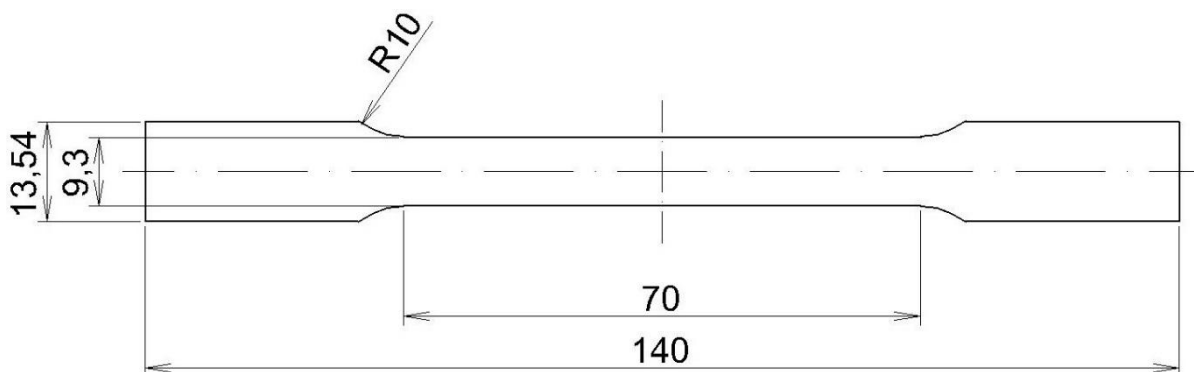
5.1 ZKOUŠENÍ MATERIÁLU

Je třeba provést destruktivní tahové zkoušky materiálu pro zjištění jeho skutečných vlastností a tím i ověření správnosti jeho volby.

5.1.1 PEVNOSTNÍ CHARAKTERISTIKY MATERIÁLU

Nejdůležitější je tahová zkouška, ze které se zjistí Youngův modul E , mez kluzu R_e a mez pevnosti R_m zvoleného materiálu. Tato zkouška byla provedena pro každý profil primární struktury zvlášť, neboť každý profil může být odlišně zpracovaný a to se může projevit na jeho pevnostních charakteristikách.

Zkouší se takzvaný I-vzorek, který je laserem vypálený z daného polotovaru. Na Obr. 26 je rozvin tohoto vzorku. Pro každý polotovar se tento vzorek liší v tloušťce stěny a poloměru křivosti. Tento vzorek je normalizovaný.



Obr. 26 I - vzorek

U vzorku se stanovuje počáteční průřez S_0 [mm²] a počáteční délka L_0 [mm]. Při zkoušení na trhačce se sleduje zatěžující síla F [N] a prodloužení ΔL [mm].

Z výsledků trhací zkoušky jsou stanoveny následující veličiny.

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (14)$$

Kde ε [-] je poměrné prodloužení vzorku, ΔL [mm] je skutečné prodloužení a L_0 [mm] je počáteční délka vzorku.

$$R_{p0,2} = \frac{F_{p0,2}}{S_0} \quad (15)$$

Kde $R_{p0,2}$ [MPa] je smluvní mez kluzu, $F_{p0,2}$ [N] je síla působící na vzorek při dosažení plastické deformace $\varepsilon=0,002$, S_0 [mm²] je počáteční průřez vzorku.

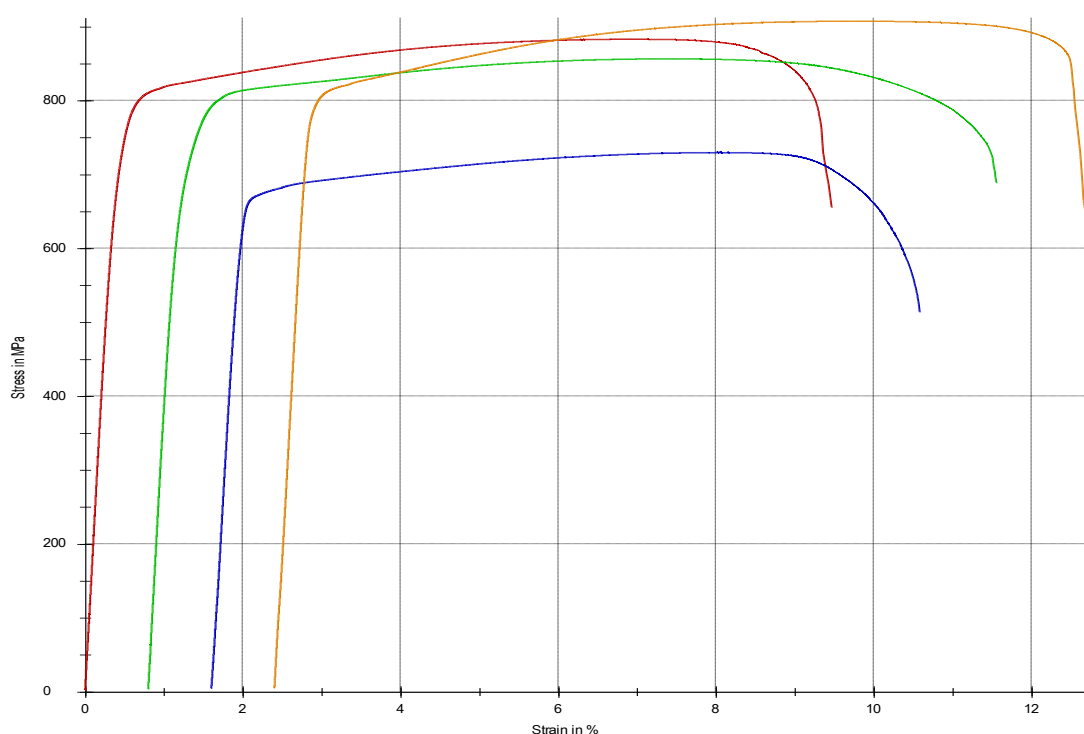


$$R_m = \frac{F_m}{S_0} \quad (16)$$

Kde R_m [MPa] je smluvní mez pevnosti materiálu, F_m [N] je maximální síla působící na vzorek a S_0 [mm²] je počáteční průřez vzorku.

$$E = \frac{R}{\varepsilon} \quad (17)$$

Kde E [GPa] je Youngův modul pružnosti, R [MPa] je maximální napětí v lineární části zátěžné křivky, ε [-] je maximální poměrné prodloužení před vznikem prvních plastických deformací.



Obr. 27 Průběh zatížení jednotlivých I-vzorků

Na Obr. 27 je na svislé ose vyneseno napětí R [MPa] a na vodorovné ose poměrné prodloužení ε [%]. Pevnostní charakteristiky jednotlivých vzorků jsou uvedeny v Tab. 14.

Tab. 14 Pevnostní charakteristiky materiálu

Vzorek polotovaru	S_0 [mm ²]	L_0 [mm]	E [GPa]	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]
Ø34,9 x 1,67	14,35	50,02	201	787	883
Ø28,6 x 1,67	14,34	50,02	197	744	857
Ø25,4 x 0,9	8,15	50,01	193	671	730
25,4 x 25,4 x 0,9	7,57	50,01	196	809	908



Z Tab. 14 plyne, že materiál splňuje pevnostní charakteristiky požadované v Tab. 8. Youngův modul v Tab. 14 je určen pouze orientačně, protože zkoušené vzorky neodpovídají vzorkům předepsaným v normě pro jeho určení.



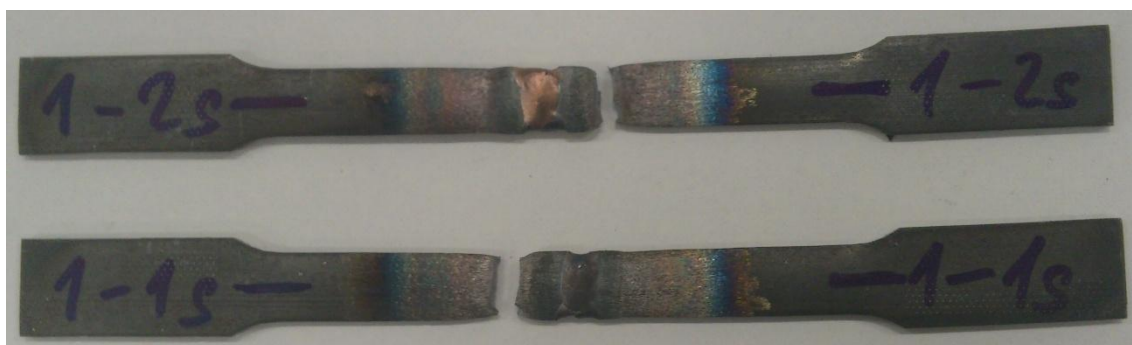
Obr. 28 I-vzorky po zkoušce tahem

Na Obr. 28 jsou shora dolů seřazené I-vzorky po zkoušce tahem ve stejném pořadí jako v Tab. 14.

5.1.2 OVĚŘENÍ SVARŮ

Pro ověření pevnosti materiálu po svaření byly vytvořeny rozpůlené vzorky stejných rozměrů jako I-vzorky. Tyto vzorky byly svařeny metodou TIG.

Při zkoušení tahem bylo sledováno, zda dojde k porušení vzorku v oblasti svaru.



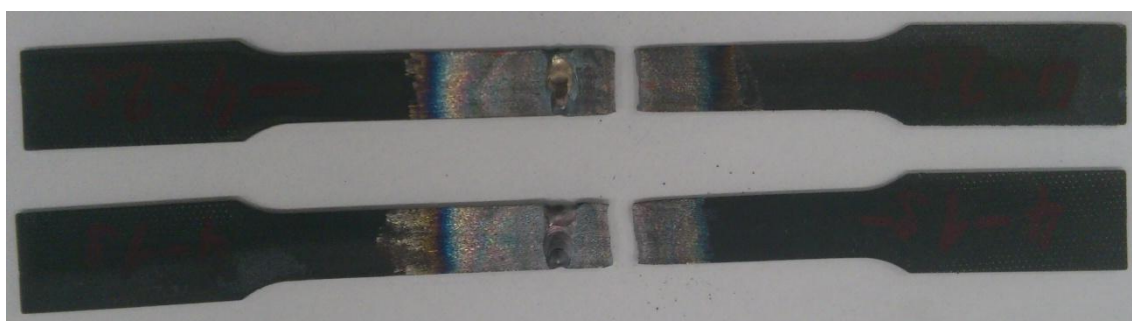
Obr. 29 Svařovaný I-vzorek Ø34,9 x 1,67 po zkoušce tahem



Obr. 30 Svařovaný I-vzorek $\varnothing 28,6 \times 1,67$ po zkoušce tahem



Obr. 31 Svařovaný I-vzorek $\varnothing 25,4 \times 0,9$ po zkoušce tahem



Obr. 32 Svařovaný I-vzorek $25,4 \times 25,4 \times 0,9$ po zkoušce tahem

Vzorky všech čtyř polotovarů vyhověly v této zkoušce. K porušení materiálu došlo mimo oblast svaru.

5.2 ZKOUŠENÍ H-VZORKŮ

Jak bylo uvedeno v kapitole 1.1.3, pro každou použitou kombinaci alternativních polotovarů musí být provedena zkouška H-vzorků. Tyto kombinace vyplývají z geometrie primární struktury rámu, tedy z kombinací alternativních polotovarů v jednotlivých styčných uzlech.

5.2.1 OZNAČENÍ A KOMBINACE H-VZORKŮ

Kombinace polotovarů v základních a alternativních vzorcích, označení vzorků a seřazení vzorků do porovnávaných skupin je uvedeno v Tab. 15. Alternativní vzorky jsou svařené z materiálu 15 130 dle ČSN. Základní vzorky jsou svařeny z materiálu 11523 dle ČSN.

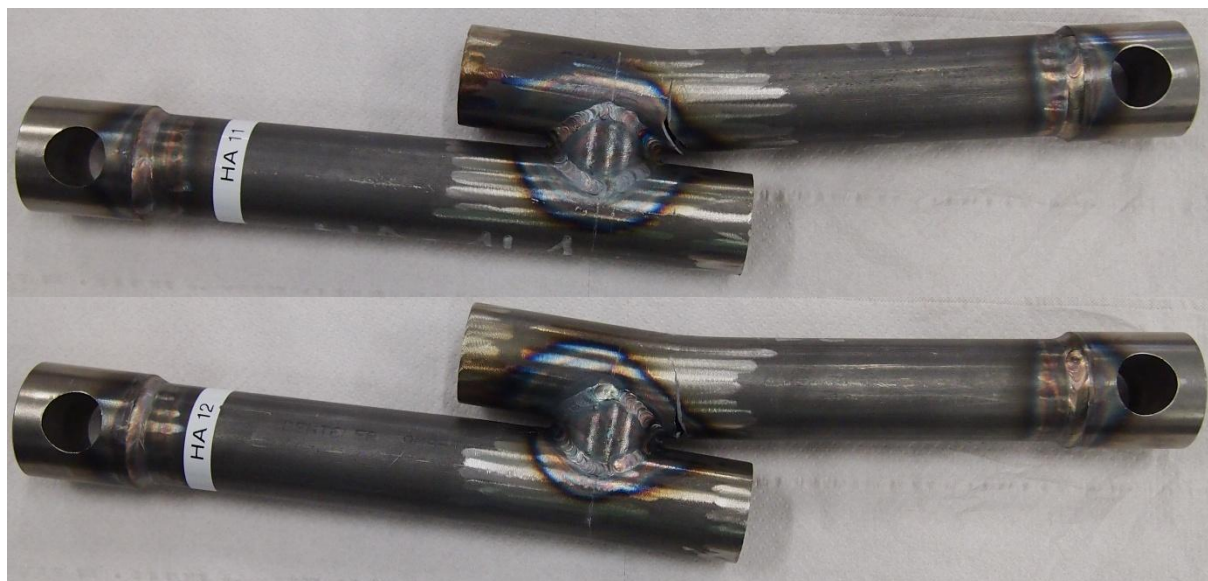


Tab. 15 Kombinace polotovarů jednotlivých vzorků a seřazení do porovnávaných skupin

Zn. skup.	Alternativní H-vzorky			Základní H-vzorky		
	Zn. Vzorku	Polotovar dlouhé části [mm]	Polotovar krátké části [mm]	Zn. Vzorku	Polotovar dlouhé části [mm]	Polotovar krátké části [mm]
J1	HA-11 HA-12	Ø 34,9 x 1,67	Ø 34,9 x 1,67	HB-11 HB-12	Ø 25 x 2,5	Ø 25 x 2,5
J2	HA-21 HA-22	Ø 34,9 x 1,67	25,4 x 25,4 x 0,9	HB-21 HB-22	Ø 25 x 2,5	25 x 25 x 1,5
J3	HA-31 HA-32	Ø 34,9 x 1,67	Ø 25,4 x 0,9	HB-31 HB-32	Ø 25 x 2,5	Ø 25 x 1,5
J4	HA-41 HA-42	Ø 34,9 x 1,67	Ø 28,6 x 1,67	HB-21 HB-22	Ø 25 x 2,5	25 x 25 x 1,5
J5	HA-51 HA-52	Ø 28,6 x 1,67	Ø 25,4 x 0,9	HB-51 HB-52	25 x 25 x 1,5	Ø 25 x 1,5
J6	HA-61 HA-62	Ø 25,4 x 0,9	Ø 25,4 x 0,9	HB-61 HB-62	Ø 25 x 1,5	Ø 25 x 1,5
J7	HA-71 HA-72	25,4 x 25,4 x 0,9	Ø 25,4 x 0,9	HB-51 HB-52	25 x 25 x 1,5	Ø 25 x 1,5
J8	HA-81 HA-82	25,4 x 25,4 x 0,9	25,4 x 25,4 x 0,9	HB-41 HB-42	25 x 25 x 1,5	25 x 25 x 1,5

5.2.2 VÝSLEDKY A JEJICH VYHODNOCENÍ

Kompletní výsledky jsou uvedeny v příloze. Zde je pro příklad uvedena fotodokumentace a grafy porovnávané skupiny J1.

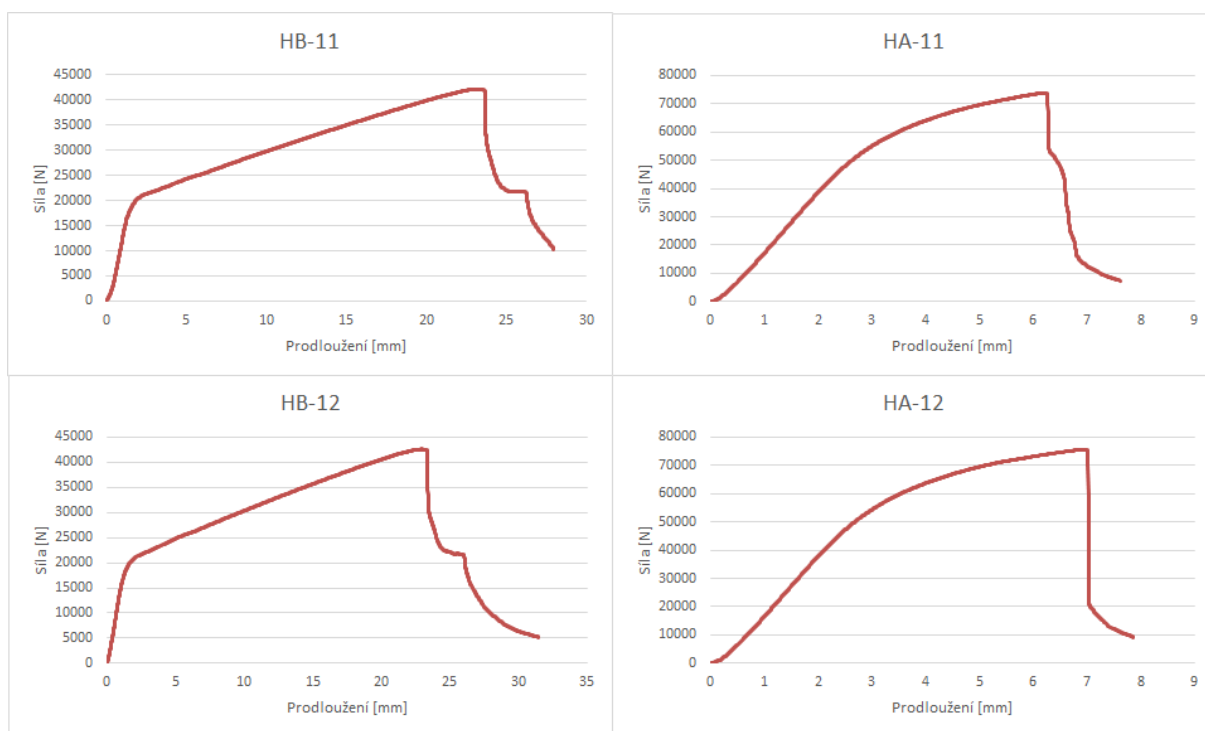


Obr. 33 Vzorky HA-11 (nahore) a HA-12 (dole)



Obr. 34 Vzorky HB-11 (nahore) a HB-12 (dole)

Na Obr. 33 a Obr. 34 jsou zobrazeny H-vzorky ze zkušební skupiny J1 po tahové zkoušce. Jsou zde patrné poruchy spojitosti materiálu.



Obr. 35 Průběh zatěžující síly v závislosti na prodloužení u jednotlivých H- vzorků ze skupiny J1



Porovnání, zda zkoušené vzorky vyhovují podmínce popsané v kapitole 1.1.3, stanovuje rovnice (18).

$$X = \frac{MIN (F_{mA})}{MAX (F_{mB})} * 100 \quad (18)$$

Kde $X [\%]$ je poměr mezi menší z maximálních sil obou alternativních vzorků a větší z maximálních sil obou základních vzorků, $F_{mA} [N]$ jsou maximální síly alternativních vzorků v dané porovnávané skupině, $F_{mB} [N]$ jsou maximální síly základních vzorků v dané porovnávané skupině.

Tab. 16 Výsledky tahových zkoušek jednotlivých H-vzorků

Zn. skup.	Alternativní H-vzorky		Základní H-vzorky		X [%]
	Zn. vzorku	Maximální síla vzorku $F_m [N]$	Zn. vzorku	Maximální síla vzorku $F_m [N]$	
J1	HA - 11	73922	HB - 11	42228	173,5
	HA - 12	75645	HB - 12	42607	
J2	HA - 21	66152	HB - 21	32763	172,5
	HA - 22	65657	HB - 22	38061	
J3	HA - 31	61819	HB - 31	28016	213,3
	HA - 32	61264	HB - 32	28727	
J4	HA - 41	73432	HB - 21	32763	179,7
	HA - 42	68402	HB - 22	38061	
J5	HA - 51	29201	HB - 51	27485	106,2
	HA - 52	29634	HB - 52	27284	
J6	HA - 61	25575	HB - 61	25687	96,4
	HA - 62	26144	HB - 62	26530	
J7	HA - 71	29420	HB - 51	27485	96,0
	HA - 72	26376	HB - 52	27284	
J8	HA - 81	33846	HB - 41	28062	109,4
	HA - 82	30697	HB - 42	27427	

V Tab. 16 jsou výsledné síly jednotlivých H-vzorků seřazeny do porovnávaných skupin. Každá skupina je vyhodnocena pomocí rovnice (18). Pokud je hodnota X větší než 95%, tak daná skupina vyhovuje všem požadavkům. Z toho vyplývá, že všechny kombinace alternativních materiálů vyhověly požadavkům.

ZÁVĚR

Bylo provedeno shrnutí požadavků kladených na rám vozidla Dragon 5 pravidly soutěže Formule Student, konstrukcí ostatních částí vozu a předpokládanými provozními podmínkami. Pravidla soutěže popisují jak nároky na použitý materiál a rozměry polotovarů, tak i na prostorové uspořádání jednotlivých částí rámu. Z konstrukce ostatních částí vozu vychází požadavky na tvar kokpitu, uchycení podvozku k rámu a zástavbový prostor motoru a hnacího ústrojí.

Dále jsou analyzovány požadavky na vlastnosti polotovarů z hlediska ohybové tuhosti jednotlivých celků primární struktury. Pro každou část rámu byly zvoleny rozměry polotovarů a provedena analýza, zda splňují stanovené požadavky. Volba materiálu byla uskutečněna na základě výpočtů mezí kluzu a pevnosti pro jednotlivé rozměry polotovarů. Byl zvolen materiál 15 130 dle ČSN, který přesahuje požadované vlastnosti všech rozměrů polotovarů.

K základní geometrii rámu byla přidána paralelní boční nárazová struktura kvůli ochraně částí sání vzduchu do motoru před nárazem. Přidány byly další tři struktury sloužící k uchycení motoru, podvozku a sestavy pedálů k rámu a ke zvýšení torzní tuhosti střední části rámu.

Torzní tuhost byla simulována metodou konečných prvků. Byla použita prutová náhrada modelu s přiřazenými průřezy jednotlivým prutům. Ze znalostí hmotnosti rámu, rozměrů vozu a výsledné deformace simulovaného modelu byla stanovena torzní tuhost a měrná torzní tuhost pro jednotlivé verze rámu.

Přidáním jednoduchých struktur byl prokázán jejich přínos k měrné torzní tuhosti rámu. Oproti rámu vozidla Dragon 4 bylo dosaženo zvýšení torzní tuhosti o 136 % a měrné torzní tuhosti o 166 %. Došlo zároveň k úspoře hmotnosti o 3,3 kg. Úspory hmotnosti bylo dosaženo použitím profilů z materiálu vyšší jakosti, které mají proti základnímu materiálu menší tloušťku stěny.

Tahovým zkouškami I-vzorků bylo ověřeno, že alternativní materiál splňuje požadavky dané pravidly na stanovenou mez kluzu a mez pevnosti. Zkoušky H-vzorků prokazují, že zkoumaná kombinace materiálu a polotovarů plně vyhovuje pravidlům soutěže a je ji možné použít pro stavbu rámu vozu dle pravidel soutěže Formule Student.

Použití alternativních profilů vedlo k úspoře hmotnosti a navýšení torzní tuhosti rámu, v rámci pravidel soutěže Formule Student. Jako nevýhodu použití alternativního materiálu je možné označit vyšší náklady na pořízení materiálu a nutnost testování vzorků k prokázání jejich pevnosti.

POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] 2015-16 Formula SAE Rules [online], 2015, poslední revize 11.5.2015. Dostupné z: < http://www.fsaeonline.com/content/2016_FSAE_Rules.pdf >
- [2] *Sandelving aviation supply* [online]. Eschbach Germany: Sandelving Aerospace [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: <<http://www.aircraftspruce.eu/metals---plastics/steel.html>>
- [3] ONDÁK, L. *Alternativní rám Formule Student vyhovující požadavkům mezinárodních pravidel*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 88 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Pavel Ramík
- [4] *PTC University* [online]. Needham, MA United States: PTC, c2016 [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: < <http://learningexchange.ptc.com/> >
- [5] *PTC support* [online]. Needham, MA United States: PTC, c2016 [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: < <https://support.ptc.com> >
- [6] 18.3 Chassis Stiffness. MILLIKEN, William F. a Douglas L. MILLIKEN. *Race car vehicle dynamics*. 5th printing. Warrendale, PA, U.S.A.: SAE International, c1995, s. 676. ISBN 1-56091-526-9.
- [7] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu I. 2.*, opr. a rozš. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, c2003. ISBN 80-7204-283-1.
- [8] JANÍČEK, P., E. ONDRÁČEK, J. VRBKA a J. BURŠA. *Mechanika těles: Pružnost a pevnost I. 3.*, přeprac. vyd. Brno: CERM, 2004, 287 s. ISBN 80-214-2592-X.
- [9] Převodní tabulka označení ocelí. *E-konstrukter: Portál pro strojí konstruktéry* [online]. Praha: INFINITY VISION, c2013 [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: < <http://e-konstrukter.cz/prakticka-informace/prevodni-tabulka-znacen-oceli> >
- [10] ADAMS, Herb. *Chassis engineering*. Los Angeles: HP Books, 1993. ISBN 1-55788-055-7.

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

a	[mm]	charakteristický rozměr polotovaru
c	[Nm/°kg]	měrná torzní tuhost
C	[Nm/°]	torzní tuhost
D	[mm]	vnější průměr polotovaru
E	[GPa]	Youngův modul pružnosti
E _a	[GPa]	Youngův modul pružnosti alternativního materiálu
E _z	[GPa]	Youngův modul pružnosti základního materiálu
F	[N]	zatěžující síla
F _m	[N]	maximální síla působící na vzorek
F _{mA}	[N]	maximální síla alternativního vzorku
F _{mB}	[N]	maximální síla základního vzorku
F _{p0,2}	[N]	síla působící na vzorek při dosažení plastické deformace $\varepsilon=0,002$
I	[mm ⁴]	kvadratický moment průřezu k nejslabší ose
I _z	[mm ⁴]	kvadratický moment průřezu k nejslabší ose základního polotovaru
I _a	[mm ⁴]	kvadratický moment průřezu k nejslabší ose alternativního polotovaru
K	[-]	procentuální splnění rovnice (1)
L	[mm]	rozchod přední nápravy
L ₀	[mm]	počáteční délka vzorku
M	[Nm]	krouticí moment
m	[kg]	hmotnost rámu
n _a	[-]	počet trubek z alternativního materiálu v dané části primární struktury
n _z	[-]	počet trubek ze základního materiálu v dané části primární struktury
R	[MPa]	maximální napětí v lineární části zátěžné křivky
R _e	[MPa]	mez kluzu
R _{ea}	[MPa]	mez kluzu alternativního materiálu
R _{ez}	[MPa]	mez kluzu základního materiálu
R _m	[MPa]	mez pevnosti
R _{ma}	[MPa]	mez pevnosti alternativního materiálu
R _{mz}	[MPa]	mez pevnosti základního materiálu
R _{p0,2}	[MPa]	smluvní mez kluzu
S ₀	[mm ²]	počáteční průřez vzorku
S _a	[mm ²]	průřez alternativního polotovaru

S_z	[mm ²]	průřez základního polotovaru
t	[mm]	tloušťka stěny polotovaru
X	[%]	poměr mezi maximálními silami alternativních a základních H-vzorků
α	[°]	úhel natočení
ΔL	[mm]	prodloužení vzorku
ΔZ	[mm]	deformace ve směru Z v místě působení zatěžující síly
ε	[-]	poměrné prodloužení vzorku



SEZNAM PŘÍLOH

Zkušební skupina H-vzorků J1	I
Zkušební skupina H-vzorků J2	III
Zkušební skupina H-vzorků J3	V
Zkušební skupina H-vzorků J4	VII
Zkušební skupina H-vzorků J5	IX
Zkušební skupina H-vzorků J6	XI
Zkušební skupina H-vzorků J7	XIII
Zkušební skupina H-vzorků J8	XV