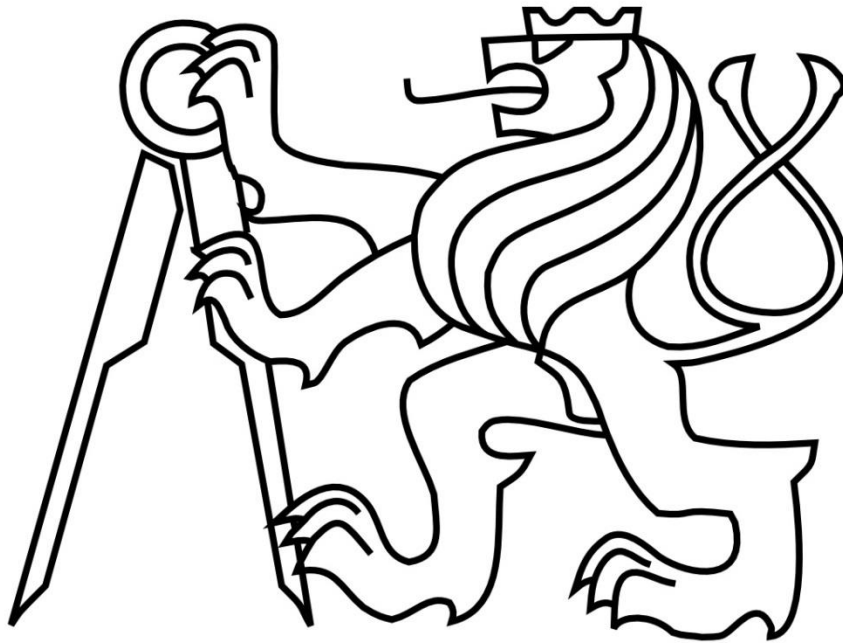


České vysoké učení technické v Praze

Fakulta strojní

Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel



Bakalářská práce

Návrh odlévané zadní těhlice

Desing of casted rear upright

Červen 2015

Student:

Martin Menšík

Vedoucí práce:

Ing. Nikita Astraverkhau

Studijní obor:

Teoretický základ strojního inženýrství



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student: **Martin MENŠÍK**

program: **Teoretický základ strojího inženýrství**

obor: **bez oboru**

název česky: **Návrh odlévané zadní těhlice**

název anglicky: **Design of Casted Rear Upright**

Zásady pro vypracování:

1. Navrhněte těhlici pro vůz Formula Student. Při návrhu počítejte s metodou výroby - odlévání
2. Proveďte pevnostní výpočet na navržené těhlici
3. Výsledný návrh porovnejte s již existujícími těhlicemi na vozech Formula Student.

Rozsah průvodní zprávy: 20 stran

Rozsah grafických prací: Výkres obrábění těhlice

Seznam doporučené literatury:

[1]

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Nikita Astraverkhau

Konzultant bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: 30. dubna 2015

Datum odevzdání bakalářské práce: 19. června 2015

Neodevzdá-li student bakalářskou nebo diplomovou práci v určeném termínu, tuto skutečnost předem písemně zdůvodnil a omluva byla děkanem uznána, stanoví děkan studentovi náhradní termín odevzdání bakalářské nebo diplomové práce. Pokud se však student řádně neomluvil nebo omluva nebyla děkanem uznána, může si student zapsat bakalářskou nebo diplomovou práci podruhé.

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

Zadání bakalářské práce převzal dne:

21.4.2015

Student


Doc. Ing. Oldřich VÍTEK, Ph.D.

Vedoucí ústavu


Prof. Ing. Michael VALÁŠEK, DrSc.

Děkan fakulty



V Praze dne 7. dubna 2015

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu, projekty, atd.) uvedené v závěru práce.

Nemám závažný důvod proti zpřístupňování této závěrečné práce v souladu se zákonem č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) v platném znění.

V Praze dne: 15. 6. 2015

Martin Menšík

Poděkování

V první řadě bych chtěl poděkovat ČVUT a především fakultě strojní za podporu týmu CTU Cartech. Pak bych chtěl poděkovat týmu CTU Cartech, že mi umožnili spolupodílet se na tomto projektu a za důvěru, kterou do mě vložili. Hlavně bych chtěl poděkovat šéfkonstruktérovi týmu CTU Cartech Bc. Jakubu Urbanovi a mému vedoucímu Ing. Nikitovi Astraverkhau za předání cenných rad, zkušeností a poskytnutí této příležitosti.

Anotace

Název práce:	Návrh odlévané zadní těhlice
Autor:	Martin Menšík
Vedoucí práce:	Ing. Nikita Astraverkhau
Akademický rok:	2014/2015
Ústav:	Ú12120 – Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel
Rozsah:	27 stran 5 tabulek 17 obrázků 1 příloha + DVD
Anotace:	Cílem této závěrečné práce je návrh zadní odlévané těhlice pro vůz kategorie Formula Student týmu CTU Cartech. Konkrétně pro vůz FS. 07 pro sezónu 2015. Obsahem je stručná rešerše přesného lití na vytavitelný model, předešlých těhlic, výpočet zatížení těhlice, její návrh a MKP analýza.
Klíčová slova:	Těhlice, Formula Student, metoda přesného lití, MKP

Annotation

Title:	Design of casted rear upright
Author:	Martin Menšík
Supervisor:	Ing. Nikita Astraverkhau
Academic year:	2014/2015
Department:	Ú12120 – Department of automobiles, internal combustion engines and railway vehicles
Size:	27 pages 5 tables 8 figures 1 attachment + DVD
Annotation:	The purpose of this work is the design of rear casted upright for Formula student vehicle of CTU Cartech team. Concretely for FS. 07, for season 2015. The work contains research of method of investment casting, previous uprights, computation of loads on upright, its design and FEM analysis.
Key words:	Upright, Formula Student, method of investment casting, FEM

Obsah

1	Úvod	9
2	Technologie „přesného lití“	9
2.1	Metoda lití na vytavitelný model	9
3	Konstrukce těhlic.....	10
3.1	Funkce	10
3.2	Obecné konstrukční řešení.....	10
3.3	Těhlice na osobních automobilech.....	12
3.4	Předešlé těhlice na vozech týmu CTU Cartech	12
4	Zástavbové podmínky	13
4.1	Koncepce FS.07.....	13
4.2	Nápravy	13
4.3	Ložiska	13
4.4	Brzdy.....	13
4.5	Telemetrie	13
5	Materiál.....	14
6	Silové účinky na těhlici	14
6.1	Předpoklady.....	14
6.2	Návrhové vstupní hodnoty	14
6.3	Výpočet.....	15
7	Návrh těhlice	16
8	MKP analýza	19
8.1	Základní princip	19
8.2	Zadefinování mé těhlice	19
8.3	Výsledky.....	20
9	Srovnání	23
9.1	Srovnání hmotnosti	23
9.2	Srovnání tuhosti	23
9.3	Shrnutí	24
10	Sintrovaná těhlice.....	24
10.1	Výsledky.....	25
11	Závěr	26
12	Použitá literatura.....	27
13	Přílohy.....	27

1 Úvod

Cílem této bakalářské práce bylo navrhnout zadní odlévanou těhlici na vůz Formula student týmu CTU Cartech. Konkrétně pro vůz již sedmé generace FS.07. Bylo potřeba udělat novou těhlici kvůli změnám geometrie zadních náprav, a proto nešlo použít těhlice z předešlého vozu. Mým cílem tedy bylo navrhnout těhlici dostatečně tuhou a pevnou, aby vydržela vypočtené zatížení a samozřejmě aby byla lehká, nejlépe lehčí, než byla její předchůdkyně tedy než zadní těhlice vozu FS.06.

2 Technologie „přesného lití“

Tyto technologie lze charakterizovat jako technologie, které umožňují odlévat odlitky s takovou přesností a kvalitou povrchu, že dokončovací operace nemusí být nutné nebo jen v minimální míře. Navíc tyto metody umožňují odlévat tvarově velice složité součásti.

Existuje několik metod technologie „přesného lití“. Patří zde metoda spalitelného modelu, kdy se plastový model zaformuje a při zalívání horkým kovem se vypařuje a odchází přes propustnou stěnu formy. Dále zde patří metoda skořepinového lití, kdy se vyrobí skořepinová forma z pryskyřice a po vytvrzení je připravena k lití. Pak je nutno zmínit klasické gravitační lití do kokil – kovových forem. Do kovových forem se lije i pod tlakem. Tato metoda zde taky patří. V neposlední řadě se zde řadí i odstředivé lití, kdy se materiál lije do rotující formy a odstředivou silou formu vyplňuje. A nakonec metoda lití na vytavitelný model, která mi byla vybrána a kterou se tedy budu zabývat podrobněji.

2.1 Metoda lití na vytavitelný model

Metoda lití na vytavitelný model je založena na principu, kdy se vytvoří voskový model. Pokud je potřeba odlít více kusů najednou, je možno tyto modely pospojovat do takzvaného stromečku. Následně se model nebo celý stromeček několikrát ponoří do keramické břechky a posype žáruvzdornou hmotou ve formě prášku. Proces se opakuje tolikrát, dokud nemá skořepinová forma dostatečnou tloušťku stěny. Po vytvrzení formy je potřeba vytavit voskový model a vypálit skořepiny, aby byly schopny odolávat vysokým teplotám. Do forem se odlévá, dokud jsou ještě horké po vypálení. Tím se sníží nebezpečí praskání a sníží se vnitřní pnutí.



Obr. 1 : Modely sestavené do stromečku

Zdroj: <http://www.caxmix.cz/>

3 Konstrukce těhlic

3.1 Funkce

Základní funkcí těhlice je přenášení sil od místa styku vozovky a pneumatiky přes ložiska, kde je uložen náboj kola, dále přes těhlici až do náprav vozidla. Využívají se u náprav s nezávislým zavěšením kol. Další funkcí je uchycení brzdíče. Takže přenáší i krouticí moment, vznikající při brzdění.

3.2 Obecné konstrukční řešení

Těhlice se na vozech Formula student řadí klasicky do čtyř kategorií podle technologie, jakou jsou vyráběny. Svařované, obráběné, odlévané a v poslední době i sintrované.

Svařované těhlice jsou často konstruovány jako masivní kroužek pro uložení ložisek a z něj vystupující žebra k přichytným bodům ramen, nicméně lze konstruovat a vyrobít i těhlice relativně složitých tvarů. Nevýhodou však je tepelný vliv na použitý materiál kvůli

vysokým teplotám svařování a tím způsobené vnitřní předpětí v těhlici. Navíc při výrobě je velice složité zaručit, že byla těhlice svařena správně a že díky špatnému sváru se nepraskne.

Obráběné jsou nejčastějším typem objevující se na vozech Formula student. Jsou konstruovány podobně jako svařované a tvoří v podstatě I-profil.

U odlévaných těhlic jsou dvě různé možnosti řešení. Prvním je klasické řešení podobné těm svařovaným a obráběným a druhým je takzvaná skořepinová konstrukce. Výhodou odlévaných těhlic je, že díky této technologii nejsou téměř nijak tvarově omezené a všechno závisí jen na fantazii konstruktéra.

Pak jsou zde sintrované těhlice. Sintrování je velice moderní technologie. Jedná se o spékání prášku kovu do požadovaného tvaru („3D tisk z kovu“). Tvarově jsou taky neomezené a navíc lze vyrábět tenčí stěny.



*Obr. 2: Odlévaná tehlice: TU Freiberg 1
Zdroj: Jakub Urban – Bakalářská práce*

3.3 Těhlice na osobních automobilech

Těhlice na osobních automobilech jsou často masivní ocelové odlitky složitých tvarů tvořeny kroužkem pro uložení ložiska, ze kterého vycházejí jednotlivé ramena k chycení náprav. Na některých vozech se vyskytují dokonce těhlice kované ty samozřejmě tak složitých tvarů nedosahují.



Obr. 3: Těhlice z vozu Škoda Fabia

Zdroj: www.amd-autodily.cz

3.4 Přešlé těhlice na vozech týmu CTU Cartech

Na FS.01 byly velice masivní obráběné těhlice bez středových stěn.

Na FS.02 proběhl první pokus o odlévané těhlice, které tvořily I-profil, Byly vyrobeny z hořčíku. Jejich výhodou byla nízká hmotnost oproti FS.01, ale výroba byla finančně a časově náročná.

Pak už byly na vozech FS.03 – 06 těhlice výhradně obráběné. FS.03 a 04 měly těhlice stejné. Oproti FS.01 a FS.02 došlo k zásadní změně, kdy bylo nahrazeno automobilové ložisko za dvě kuličková s kosoúhlým stykem. Došlo tak k výrazné úspoře hmotnosti.

FS.05 pak dostala nové těhlice vyrobené z hliníkové slitiny 7075 T651. Viz bakalářská práce Jakuba Urbana. Pro FS. 06 bylo nutno navrhnout a vyrobit nové těhlice kvůli zmenšení průměru disku, do kterých by se těhlice z FS.05 nevešly.

4 Zástavbové podmínky

4.1 Koncepce FS.07

Vůz s označením FS.07 pro sezónu 2015 půjde v šlépějích svých předchůdců. Tudíž stejně jako FS.05 a FS.06 bude část šasi z trubkového rámu, kde bude uložen motor s převodovkou a druhou část bude tvořit uhlíkový monokok. Motor bude tradičně z Yamahy R6 a bude pohánět právě zadní kola. Kola budou 10" velká, vlastní výroby z uhlíkových vláken. Bude to již druhá generace, která bude mít vyšší pevnost kvůli dosahovaným vyšším hodnotám bočního přetížení v zatáčkách. Vzhledem k velikosti kol není moc zástavbového prostoru pro těhlice. Předpokládaná hmotnost vozidla by se měla pohybovat okolo 200 kg s rozložením hmotnosti v poměru 45,5:54,5 ve prospěch zádní části vozu.

4.2 Nápravy

Nápravy navrhli kolegové. Jedná se o lichoběžníkové nápravy s nezávislým zavěšením kol a dvojitými A-rameny. Pro návrh těhlice je klíčová jejich kinematika a především body, kde bude těhlice uchycena a orientace ramen.

4.3 Ložiska

Byla zvolena dvojice ložisek s kosoúhlým stykem SKF S71913 ACD/HCP4A s vnějším průměrem 90 mm, vnitřním průměrem 65 mm a o šířce 13 mm. Stejně jako u předchozích těhlic se budou ložiska do těhlice lisovat. Po přepočtu dovolených tlaků od výrobce po nalisování se dospělo k závěru, že uložení ložisek bude $\varnothing 90R6$ a tlak, který bude působit na těhlici bude 14 N/mm^2 .

4.4 Brzdy

Brzdy budou stejně jako u předchůdce kotoučové. Zadní kotouče mají průměr 208 mm a přední 205 mm. Kvůli zvolenému malému průměru kol a zároveň snaze ušetřit hmotnost jsme se rozhodli opět pro brzdiče vlastního návrhu. Vepředu čtyřpístkové a vzadu dvoupístkové. Pro konstrukci těhlice je pro mě důležitá rozteč šroubů a poloměr, kterým se musí nacházet. Ta činí 64 mm.

4.5 Telemetrie

Pro správné naladění a pozorování chování auta při jízdě, je vybavena naše formule všemožnými čidly a snímači. Taky je vybavena snímači otáček pro každé kolo. Ten je zabudován v těhlici s vnějším závitem M5x0,5. Jedná se o Hallův snímač, který díky vyfrézovanému kroužku s otvory umístěnému mezi ložisky je schopen snímat otáčky kol.

5 Materiál

Materiál byl zvolen na základě předešlých zkušeností a jeho vysoké pevnosti a nízké hmotnosti. Jedná se o letecký dural 7075 T651. Je to materiál, který se běžně neslívá, ale na základě nových poznatků nám bylo řečeno na ústavu technologií, že tento materiál je slévateľný. Proto je požadováno provést po návrhu materiálové zkoušky, abychom věděli, jestli bude mít tento materiál i po odlití požadované vlastnosti a hlavně zkoušky slévateľnosti navrhnuté těhlice. Protože při lití na vytavitelný model se nelije pod tlakem, jsem omezen minimální tloušťkou stěny. Byly mi doporučeny minimálně dva milimetry.

Název:	Mez kluzu [N/mm ²]	Mez pevnosti [N/mm ²]	Youngův modul [kN/mm ²]	Hustota [kg/m ³]
EN AW 7075 T651	460	740	70	2820

Tabulka 1: Mechanické vlastnosti EN AW 7075 T651

Tento materiál byl použit již u předchozích těhlic a to konkrétně na vozech FS.05 a FS.06. U obráběných těhlic se osvědčil.

6 Silové účinky na těhlici

U předešlých těhlic byly uvažovány dva kritické stavy, kdy je těhlice zatěžovaná nejvíce. A to při prudkém brždění, kdy je těhlice namáhána na krut a při průjezdu zatáčkou na mezi adheze, kdy je namáhána na ohyb a to nejvíce ve směru osy Y. Pro každý z těchto stavů byl prováděn výpočet zvlášť. Nicméně mi bylo doporučeno Bc. Jakubem Urbanem, který navrhoval těhlice na FS.05 a FS.06, abych tyto dvě namáhání spojil do jednoho. To znamená, abych předpokládal, že bude vůz prudce brzdit v zatáčce na mezi adheze. Dle jeho zkušeností je toto namáhání nejkritičtější. Proto jsem se pro něj rozhodl.

6.1 Předpoklady

Předpokládám tedy, zatáčení na mezi adheze zároveň s prudkým bržděním. Dále předpokládám, že při zatáčení na mezi adheze může dojít až k úplnému odlehčení vnitřního kola. Proto neuvažuji sílu od vnitřního kola v rovnicích.

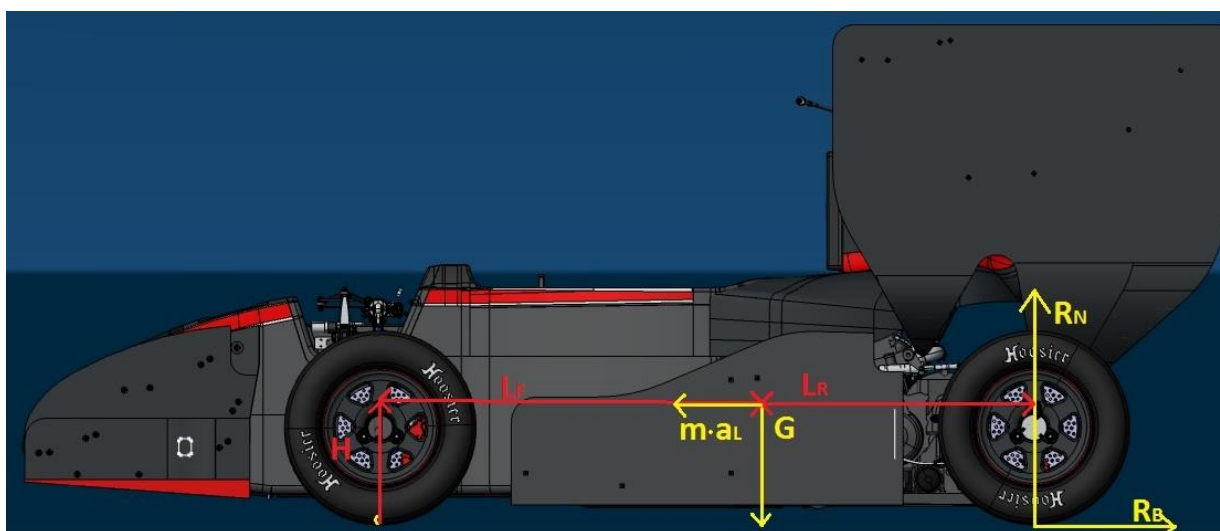
6.2 Návrhové vstupní hodnoty

Hmotnost vozu	$m_v = 200 \text{ kg}$
Hmotnost řidiče	$m_j = 70 \text{ kg}$
Výška těžiště nad silnicí	$H = 0,315 \text{ m}$
Rozchod zadní nápravy	$T_R = 1,2 \text{ m}$
Rozvor	$L = 1,56 \text{ m}$

Rozložení hmotnosti	F:R = 45,5:54,5
Podélné zrychlení při brždění	$a_L = 1,75g$
Příčné zrychlení při průjezdu zatáčkou	$a_{LAT} = 2,8g$
Součinitel tření v podélném směru	$\mu_L = 1,5$
Součinitel tření v příčném směru	$\mu_{LAT} = 1,8$
Gravitační zrychlení	$g = 9,81 \text{ m/s}^2$
Dynamický poloměr kola	$r = 0,223 \text{ m}$

6.3 Výpočet

- (1) $m = m_v + m_j = 200 + 70 = 270 \text{ kg}$
- (2) $L_F = 0,545 \cdot L = 0,455 \cdot 1,56 = 0,8502 \text{ m}$
- (3) $L_R = 0,454 \cdot L = 0,545 \cdot 1,56 = 0,7089 \text{ m}$



Obr. 4: Pohled z boku – zatížení při brždění

Nyní nejprve spočítám samotné zatížení zadní nápravy. Z momentové rovnice k bodu styku přední pneumatiky s vozovkou vychází:

$$(4) R_N \cdot L + m \cdot a_L \cdot H - G \cdot L_F = 0$$

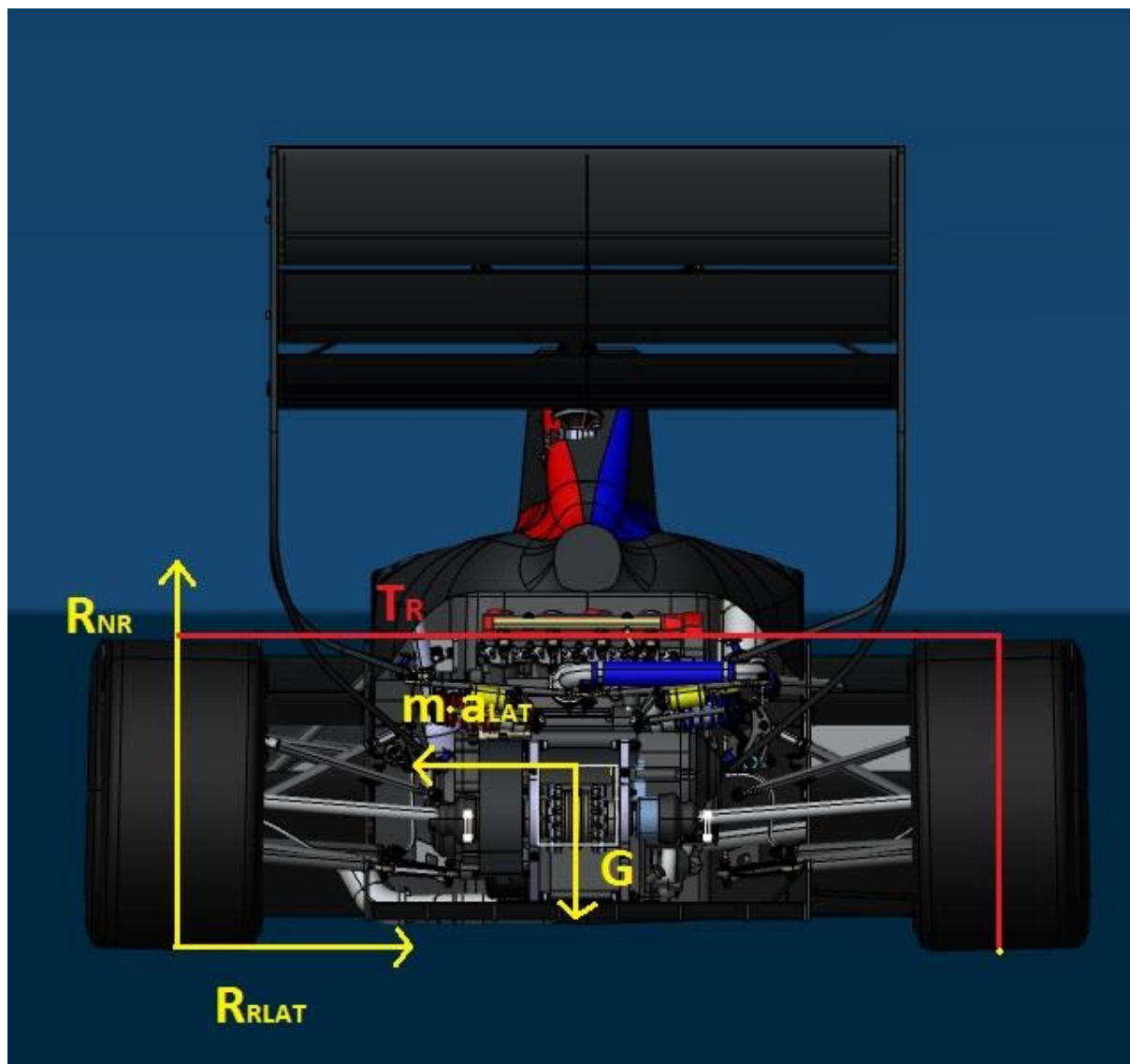
Odsud si vyjádřím zatížení zadní nápravy R_N a dosadím:

$$(5) R_N = \frac{-m \cdot a_L \cdot H + G \cdot L_F}{L} = \frac{-270 \cdot 1,75 \cdot 9,81 \cdot 0,315 + 270 \cdot 9,81 \cdot 0,8502}{1,56} = 507,6 \text{ N}$$

$$(6) R_B = R_N \cdot \mu_L = 507,6 \cdot 1,5 = 761,4 \text{ N}$$

$$(7) R_{Bkolo} = \frac{R_B}{2} = \frac{761,4}{2} = 380,7 \text{ N}$$

$$(8) M_B = R_B \cdot r = 380,7 \cdot 0,223 = 85 \text{ Nm}$$



Obr. 5: Pohled zezadu – zatížení při zatáčení

Z momentové rovnice k bodu dotyku vnitřního kola s vozovkou vyjde:

$$(9) \quad R_{NR} \cdot T_R - \frac{L_F}{L} \cdot m \cdot a_{LAT} \cdot H - \frac{L_F \cdot T_R}{2L} \cdot m \cdot g = 0$$

Po úpravě a vyjádření reakce ve směru Z působící na kolo při zatáčení:

$$(10) \quad R_{NR} = \frac{m \cdot g \cdot L_F \cdot (a_{LAT} \cdot H + \frac{T_R}{2})}{L \cdot T_R} = \frac{270 \cdot 9,81 \cdot 0,8502 \cdot (2,8 \cdot 0,315 + 0,6)}{1,56 \cdot 1,2} = 1\,783 \text{ N}$$

Reakce ve směru Y se potom rovná:

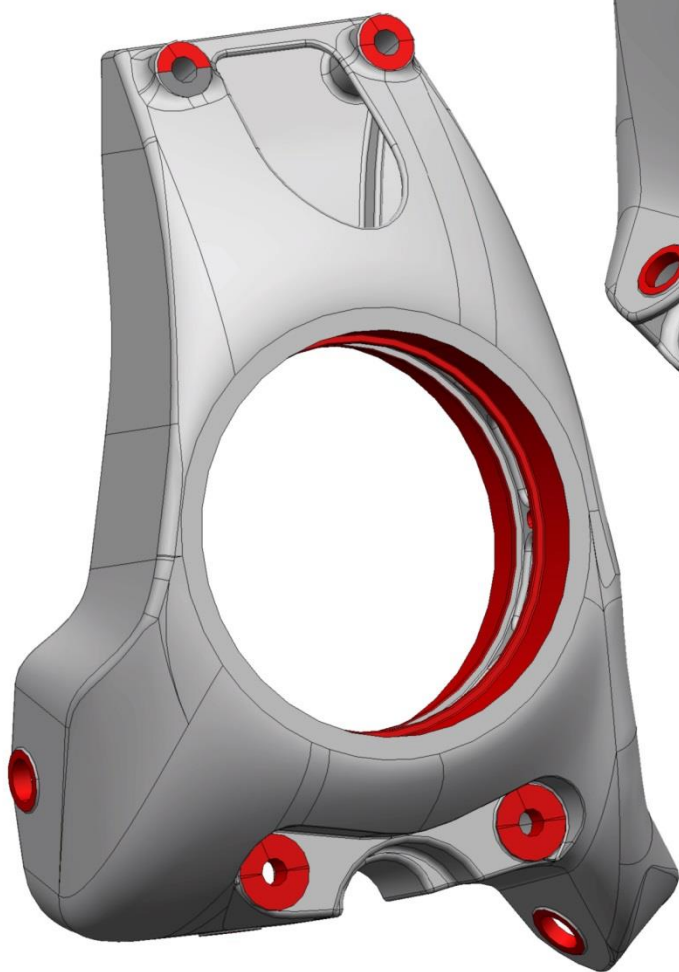
$$(11) \quad R_{RLAT} = \mu_{LAT} \cdot R_{NR} = 1,8 \cdot 1783 = 3\,209 \text{ N}$$

7 Návrh těhlice

Nyní již znám všechno, co potřebuji pro návrh a následnou analýzu. Zvolil jsem skořepinový typ konstrukce, od kterého očekávám nízkou hmotnost a relativně vysokou tuhost díky možnosti optimálně využít materiál.

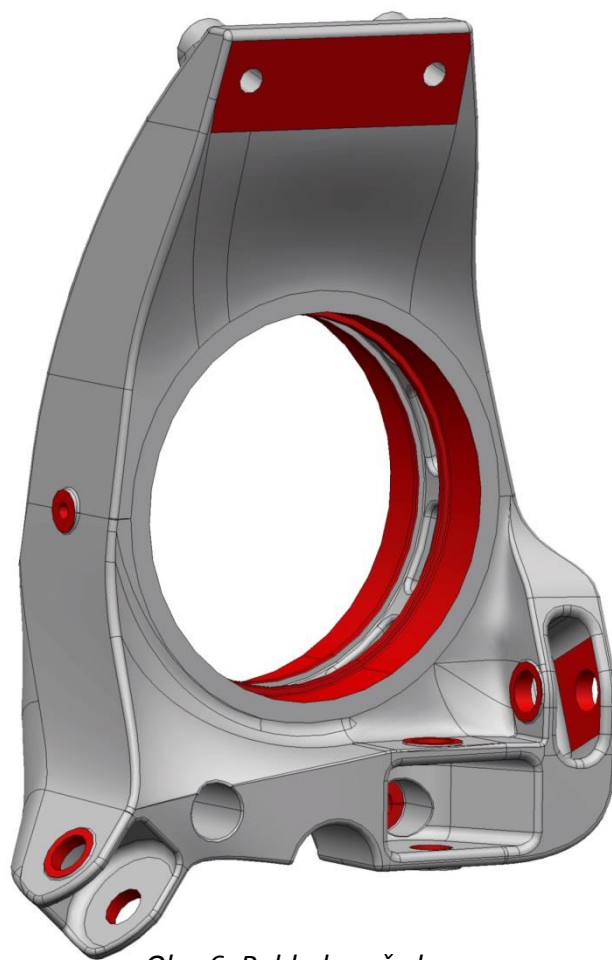
Těhlice je namáhaná hlavně na ohyb při zatáčení a pak na krut při brzdění. Veškeré zatížení je přenášeno pomocí výše zmíněných ložisek.

Protože mi pozice ložisek a jejich osa byla dána týmem, začal jsem právě tady. Pro uložení ložisek jsem vytvořil trubku s osazeními o vnitřním průměru 90 mm. Zde pak budou ložiska nalisovány. Uprostřed mezi ložisky byly pak vytvořeny otvory. Jednak pro snížení hmotnosti a



Obr. 7: Pohled zezadu

polohu přípojných bodů a orientaci ramen, na které bylo potřeba se dostat. Snahou bylo vytvořit nosník stále pevnosti – hlavně v ose Z a zároveň se dostat k přípojným bodům, co možná nejkratší cestou, abych ušetřil materiál a tím i snížil hmotnost.

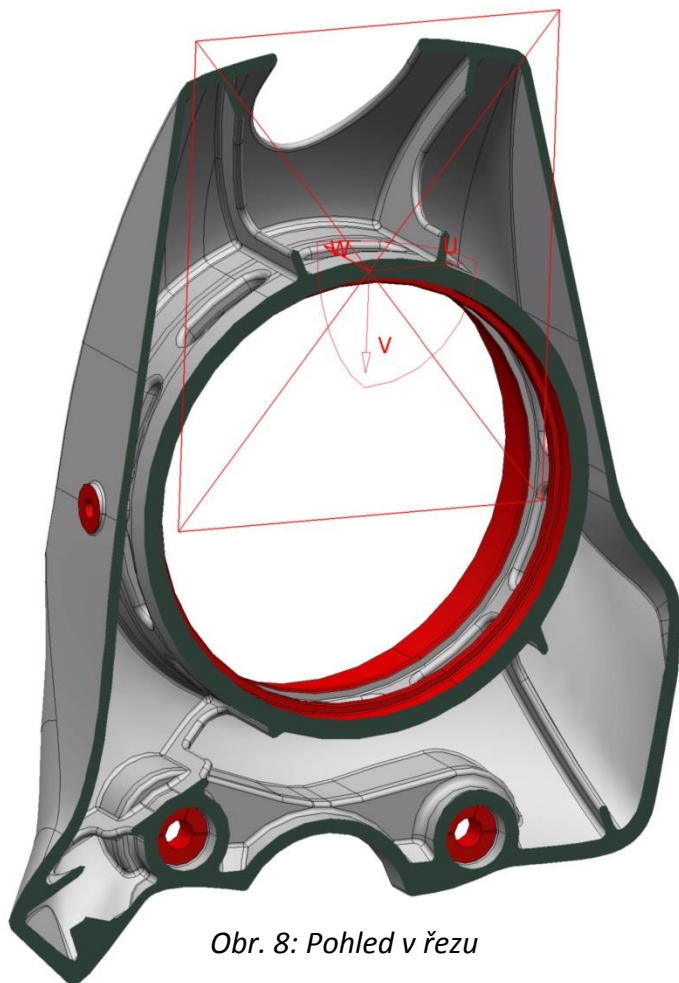


Obr. 6: Pohled zepředu

taky proto, aby lépe vtékala/vytékala keramická břečka.

Při konstrukci těhlice jsem byl samozřejmě docela přísně prostorově omezen. Zezadu jsem se nesměl dostat za rovinu ložiska, aby při jízdě brzdový kotouč nechytil mou těhlici. Pak jsem byl omezen samotným prostorem v kole. Tento prostor mi vytyčil válec s průměrem necelých 250 mm, do kterého jsem se musel vejít.

V neposlední řadě jsem samozřejmě dostal k dispozici



Obr. 8: Pohled v řezu

snaze snížit těžiště a taky kvůli směru reakční síly, který pak je přibližně ve směru osy X, kde je zatížení ložiska nejmenší.

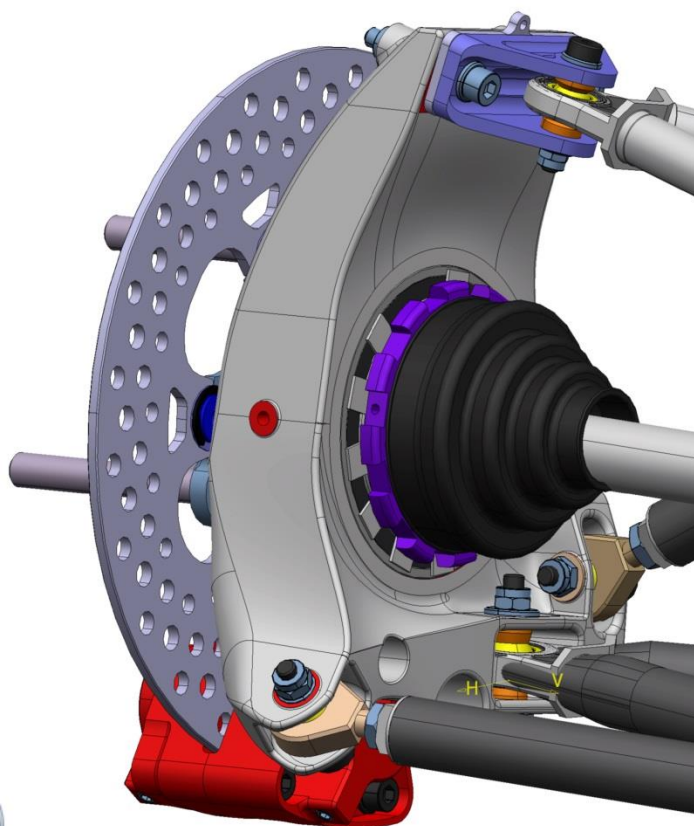
Uvnitř těhlice byly ještě udělány žebra pro zvýšení tuhosti celé těhlice. Musí být ovšem s otvory, aby mohla všude zatéct keramická břečka při tvorbě formy.

Dále bylo potřeba počítat s nepřesnostmi odlévání, a proto jsem vytvořil pro dosedací plochy šroubů nálitky, které se po odlití obrobí, tak aby nedocházelo k ohybovému namáhání šroubů. Tyto plochy jsou na obrázcích červené.

Aby vůbec bylo možno tuto skořepinovou konstrukci uskutečnit, bylo nutné, vytvořit zezadu nahoře otvor pro vtok a výtok keramické břečky kromě otvorů mezi ložisky, které jsou pro takovýto účel relativně malé, a navíc by byl zde poměrně špatný přístup s vtokovou soustavou. Navíc takto velký otvor ušetřil několik desítek gramů hmotnosti.

Z boku je pak ve směru X mezi ložiska vyvrtaná díra se závitem M5x0,5 pro již výše zmíněný snímač otáček kola

Výše zmíněný dvoupístkový brzdíč je přichycen na dvou šroubech ve spodní části těhlice. Toto místo bylo zvoleno kvůli



Obr. 9: Těhlice v sestavě

8 MKP analýza

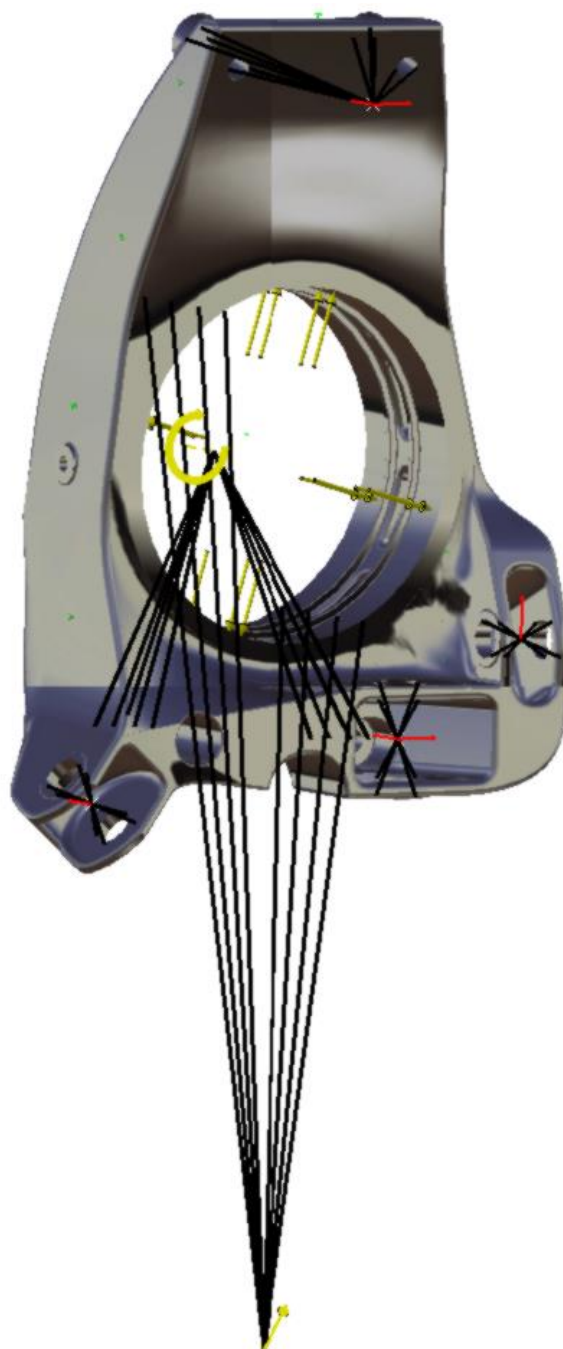
8.1 Základní princip

Zkratka MKP označuje slovní spojení „Metoda Konečných Prvků“ (v anglickém jazyce – Finite Element Method – FEM). Je to metoda výpočtu, kdy se analyzovaná součást rozdělí na konečný počet prvků s konečnými rozměry. Poté pomocí numerických metod a zadaných počátečních podmínek jsme schopni spočítat například průběh napětí nebo deformaci součásti. Tato metoda získala na významnosti s příchodem výkonné výpočetní techniky. *Obr. 10: Zadefinovaná těhlice v MKP*

Díky ní jsme schopni zanalyzovat jakkoli složitou součást v „konečném“ čase. I přes relativně vysoký výpočetní výkon moderních počítačů je MKP analýza časově náročná. Tato doba je závislá na počtu a typu použitých prvků (existuje jich několik), na které si ji rozdělíme. Větší počet elementů vede ke zpřesnění výsledků. Čas potřebný pro výpočet však nenarůstá lineárně s počtem prvků, ale spíše exponenciálně. Nicméně moderní softwary nám umožňují použít v různých místech součásti různou velikost prvků. To znamená, že v místech, kde předpokládáme velké namáhání, si můžeme síť elementů zjemnit a docílit přesných výsledků a v místech, která jsou namáhána méně a kde výsledek není pro nás z hlediska bezpečnosti a pevnosti dané součásti tak zajímavý, tam si můžeme velikost elementů lokálně naopak zvětšit. Toto nekonstantní síťování může velice zrychlit výpočet a přitom zatížit výsledek minimální chybou.

8.2 Zadefinování mé těhlice

MKP analýzu pro svou těhlici jsem prováděl v Catii V5R21. Výpočet jsem definoval jako statický, ale těhlice je namáhána dynamicky a proto byla veškerá



zatížení přenásobena dynamickými součiniteli. Podobný způsob výpočtu, jako jsem použil já, je již ověřen mými předchůdci.

Pro výpočet bylo nejprve nutno těhlici zadefinovat v prostoru, to znamená odebrat ji všech 6 stupňů volnosti, tak abych nasimuloval reálné uchycení a dovolené pohyby. Hornímu A-ramenu a dolnímu A-ramenu jsem zakázal pohyb ve směru os X a Y. Pushrodu jsem zakázal pohyb v ose Z a pátému prvku byl zakázán pohyb ve směru osy Y. Tyto omezení jsem zadával do přípojných bodů těhlice a náprav.

Dále jsem pomocí příkazu Rigid Virtual Part svázal přichytné body s příslušnými plochami těhlice. Většinou se jednalo o plochy otvorů pro šrouby. Výjimkami byly plochy pod ložisky. Ty jsem svázal s bodem dotyku pneumatiky s vozovkou a plochy pod brzdíči jsem svázal se středovým bodem těhlice. Nepoužil jsem otvory pro šrouby, které slouží k uchytcení brzdíče, protože předpokládám, že veškeré namáhání půjde právě přes tyto dosedací plošky. Byl jsem ujištěn, že předpětí ve šroubech je napočítáno tak, aby se brzdíč na těhlici ani nehnul a přenesl celé zatížení přes dosedací plochy.

Následovalo zadefinování zatížení. Na plochy od ložiska jsem zadal konstantní rozložení tlaku od nalisování ložisek. Dále krouticí moment vyvolaný brzdíčem okolo osy Y a nakonec reakční síly. Jejich působíště jsem zadal do bodu styku pneumatiky s vozovkou.

Hodnoty těchto zatížení shrnuje následující tabulka. Opačné znaménka se tam objevila z důvodu použití opačných směrů souřadného systému v Catii. Hodnoty pro MKP jsou vypočtené hodnoty přenásobené dynamickým součinitelem a zaokrouhleny směrem nahoru na celé stovky v zájmu bezpečnosti.

Zatížení	Směr působení	Vypočtená hodnota	Dynamický součinitel	Hodnota pro MKP
M_B	okolo osy Y	85 Nm	2	170 Nm
R_{BKOLO}	X	-487 N	2	-1 000 N
R_{RLAT}	Y	-3 209 N	2	-6 600 N
R_{NR}	Z	1 783 N	3	5 600 N
Tlak	-	-	-	14 MPa

Tabulka 2: Hodnoty použité do analýzy

Nakonec došlo na volbu velikosti elementů. Použil jsem 4 různé velikosti parabolického elementu. Ty byly 1,6 mm, 1,1 mm, 0,9 mm a 0,5 mm. Rozdělil jsem je do oblasti podle velikostí napětí z prvních nepřesných pokusů výpočtu.

8.3 Výsledky

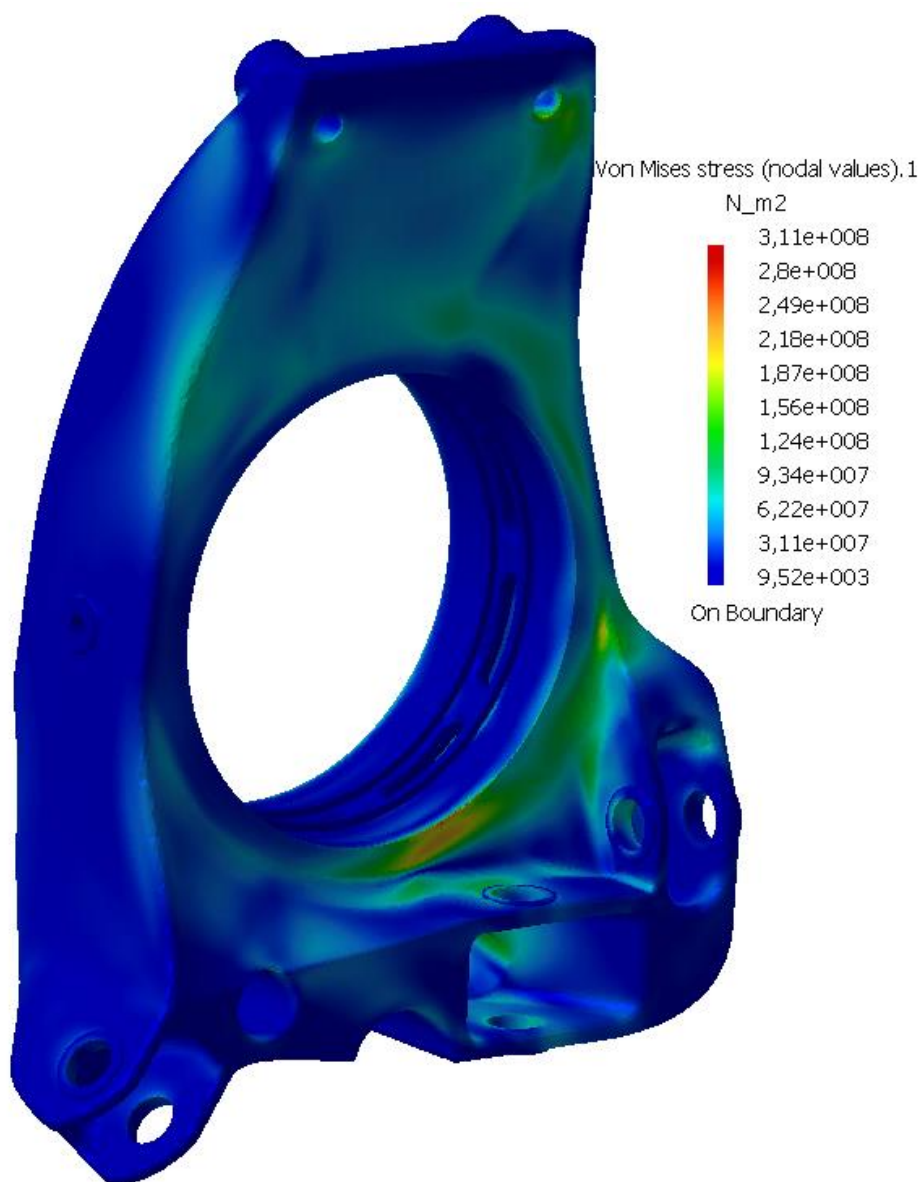
Jako nejvíce namáhaná místa se ukázalo jedno z horních žebér a místo pod šroubem k uchycení horního A-ramene. Zrovna zde se „váleček“, do kterého přijde tento šroub, spojuje s výše zmíněným žebrem. Za předpokladu potřeby snížit toto napětí by bylo možné v případě žebra zvětšit rádius, ale v případě místa u šroubu by zřejmě už bylo nutné upravit konstrukci razantněji.

Nejvyšší dosažené napětí je 311 MPa. Mez kluzu EN AW 7075 T651 je asi 460 MPa.

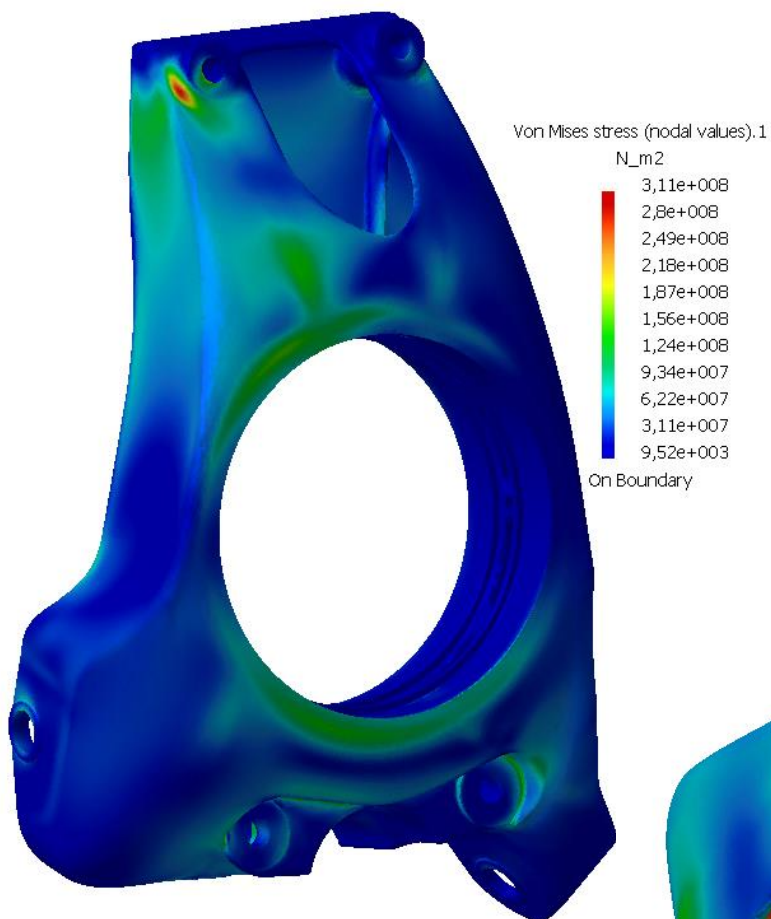
Z toho vyplývá, že by těhlice měla vydržet s bezpečností $k = 1,48$.

Nejvyšší deformace vzhledem k bodu styku vozovky s pneumatikou činí 0,44 mm.

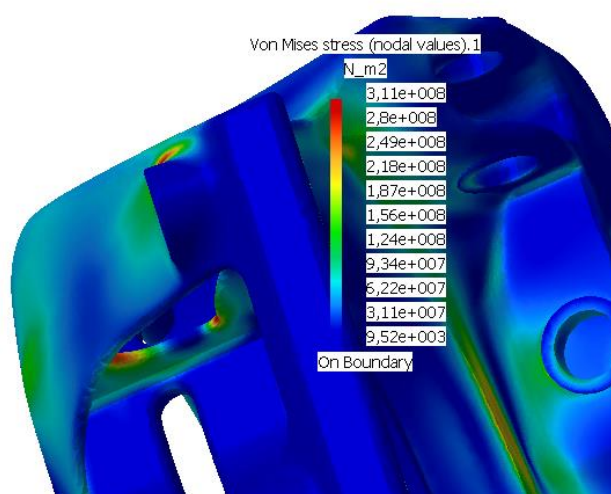
Dále je z výsledku patrné, že na několika místech je materiál využit málo nebo téměř vůbec a vyplývá z toho prostor pro další úpravy a odlehčení těhlice. Více otvorů nebo zmenšit tloušťku stěny, tam kde to ještě jde, případně přepracovat konstrukci.



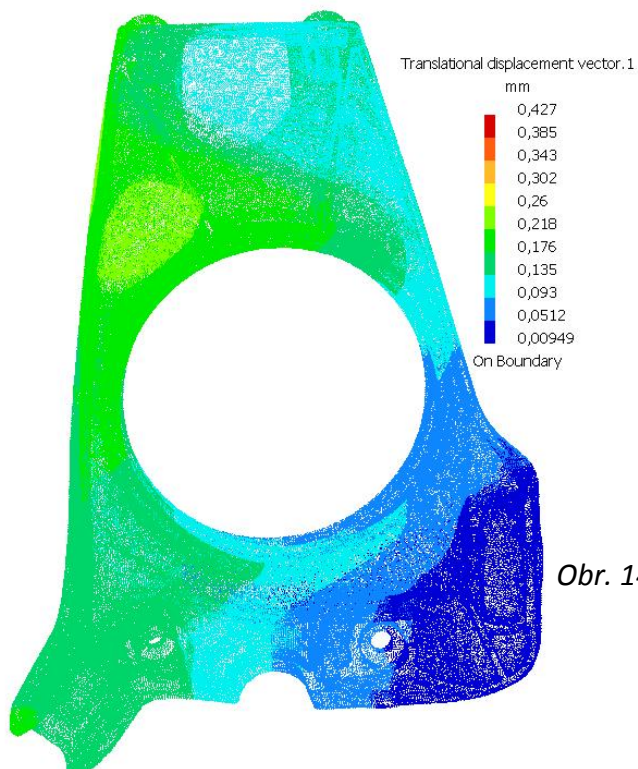
Obr. 11: Výsledek MKP – pohled zepředu



Obr. 12: Výsledek MKP – pohled zezadu



Obr. 13: Detail míst s nejvyšším napětím



Obr. 14: Deformace těhlice

9 Srovnání

9.1 Srovnání hmotnosti

Rád bych srovnal hmotnost s předchozími těhlicemi týmu CTU Cartech. Hmotnost je zde důležitá vlastnost, protože v případě těhlice a celé kolové soustavy se jedná o neodpruženou hmotu, kterou je třeba, co nejvíce zredukovat.

Těhlice:	Hmotnost:
FS.01	1 040 g
FS.02	750 g
FS.03	880 g
FS.04	880 g
FS.05	709 g
FS.06	548 g
FS.07	521 g

Tabulka 3: Hmotnosti

Jak je vidět z tabulky, tak hmotnost těhlic má spolu s vývojem auta spíše sestupnou charakteristiku. Nelze než doufat, že to takto půjde i nadále. Jak jsem již výše psal, moje těhlice má potenciál být ještě výrazně lehčí.

9.2 Srovnání tuhosti

Další významnou vlastností je tuhost. Proto bych i tu rád rovnal s předešlými těhlicemi a zhodnotil, zda jsem se svou konstrukcí posunul vpřed nebo vzad.

Stejně jako mí předchůdci jsem zatěžoval těhlici v místě bodu dotyku pneumatiky s vozovkou osamocenou silou 1000 N v každém směru osy zvlášť. Po odečtení deformace jsem tak zjistil tuhost těhlice.

Těhlice:	Osa zatížení	Deformace ve směru zatížení [mm]	Tuhost ve směru zatížení [N/mm]	Relativní tuhost [N/mm/kg]
FS.01	X	0.141	7 092	6819
FS.02		0.117	8 547	11 396
FS.03		0.065	15 385	17 483
FS.04		0.065	15 385	17 483
FS.05		0.079	12 658	17 955
FS.06		cca 0,05	20 000	36 496
FS.07		0.0618	16 181	31 058

Tabulka 4: Srovnání tuhostí – 1. část

Těhlice:	Osa zatížení	Deformace ve směru zatížení [mm]	Tuhost ve směru zatížení [N/mm]	Relativní tuhost [N/mm/kg]
FS.01	y	0.107	9 346	8 986
FS.02		0.126	7 937	10 582
FS.03		0.080	12 500	14 205
FS.04		0.080	12 500	14 205
FS.05		0.109	9 174	13 013
FS.06		cca 0,056	17 857	32 586
FS.07		0.0594	16 835	32 313
FS.01	z	0.010	100 000	96 154
FS.02		0.022	45 455	60 606
FS.03		0.016	62 500	71 023
FS.04		0.016	62 500	71 023
FS.05		0.014	71 429	101 317
FS.06		cca 0,014	71 429	130 344
FS.07		0.024	41 666	79 974

Tabulka 4: Srovnání tuhostí – 2. část

9.3 Shrnutí

Z tabulky je zřejmé, že loňská těhlice je trochu tužší ve všech směrech. Ve směru osy Z je výrazně tužší. Těhlice pro vůz FS.07 se dokonce ukázala jako nejméně tuhou za celou historii CTU Cartech. Nicméně relativní tuhost nemá v porovnání s ostatními těhlicemi nejhorší a s loňskou kromě osy Z, srovnatelnou. Čím vyšší relativní tuhost je, tím lepší je využití materiálu na těhlici.

10 Sintrovaná těhlice

Z časových důvodů se nakonec nemohla odlévaná těhlice vyrobit. Proto bylo nutné najít jiné řešení. Toto řešení představovalo současný návrh odlévané těhlice upravit na těhlici sintrovanou. Tvarově nebyl žádný problém, vysintrovat se dá téměř všechno, ale problém vznikl, když se zjistilo, že EN AW 7075 se zatím nesintruje a že je možno sintrovat z AlSi10Mg. Tento materiál má nižší hustotu, ale taky má podstatně nižší pevnost a mez kluzu. V návrhu odlévané těhlice bylo vypočteno nejvyšší napětí 311 MPa a bylo potřeba ho snížit alespoň na cca 220 MPa.

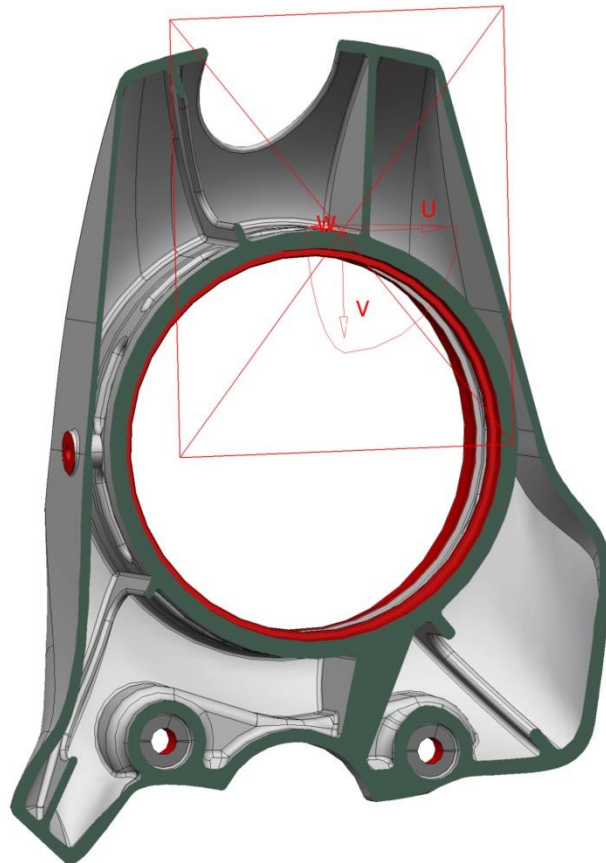
Název:	Mez kluzu [N/mm ²]	Mez pevnosti [N/mm ²]	Youngův modul [kN/mm ²]	Hustota [kg/m ³]
EN AW 7075 T651	460	740	70	2 820
AlSi10Mg	270	460	70	2 670

Tabulka 5: Srovnání materiálů

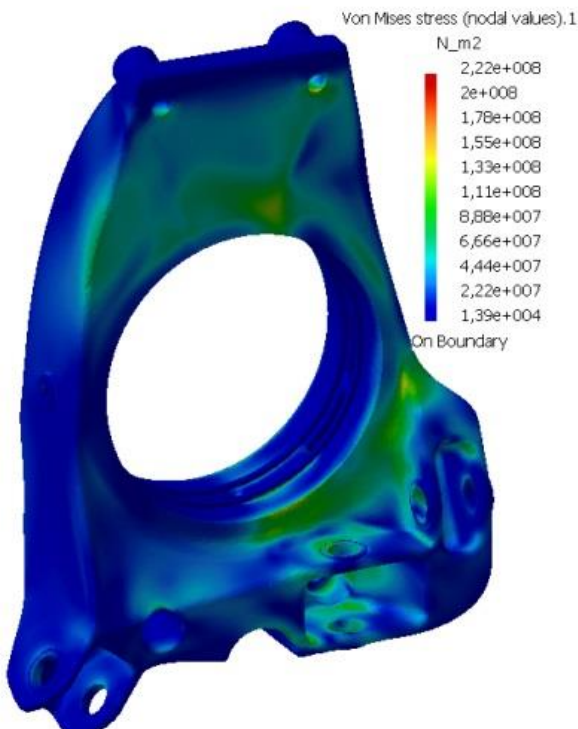
Po pár drobných úpravách – kompletní uzavření jednoho ze žebér a jeho rozšíření v místě napojení na výše zmiňovaný „váleček“ pro šroub, kde se předtím nacházelo maximální napětí. Dále u zmenšení děr u všech ostatních žebér díky zvětšení rádiusů a nakonec přibylo jedno velké žebro. Zevnějšek se nijak od odlévaného návrhu nezměnil.

10.1 Výsledky

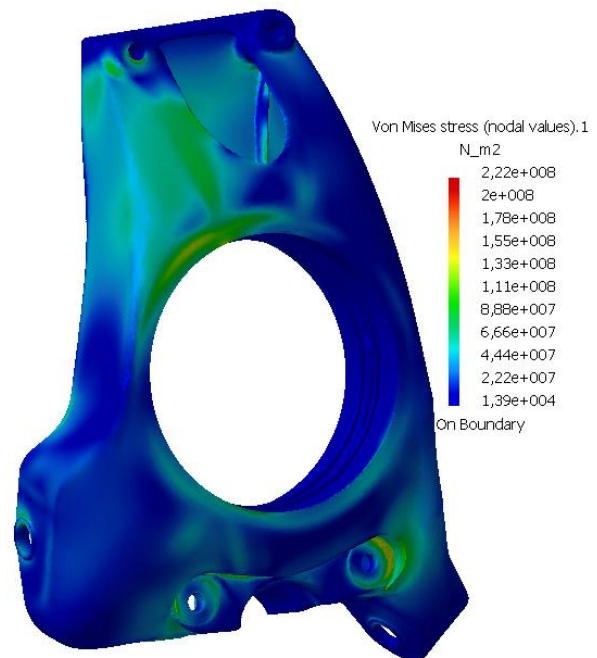
Stějně jako odlévanou těhlici, jsem i tu sintrovanou podrobil MKP analýze. Zdefinoval jsem ji úplně stejně. Maximální napětí se vyšplhalo na 222 MPa. I sintrovaná verze by měla vydržet s bezpečností $k_2=1,2$. Tato varianta je dokonce o 3 gramy lehčí, díky nižší hustotě materiálu, ale i zde v nižší míře přetrvává problém s ne úplně ideálním využitím materiálu a tudíž je zde možnost do budoucna ještě snížit hmotnost.



Obr. 15: Těhlice k sintrování v řezu



Obr. 16: Těhlice k sintrování – MKP zepředu



Obr. 17: Těhlice k sintrování – MKP zezadu

11 Závěr

Jinak při navrhování těhlice, jsem se naučil a dozvěděl a naučil spoustu nových věcí. Naučil jsem se modelovat v plochách. To bylo naprosto klíčové, pro tvorbu skořepinové konstrukce. Obecně jsem se seznámil s prostředím Catie a dozvěděl se alespoň ty nejzákladnější věci o metodě konečných prvků a jejím praktickém využití.

Nakonec se mi podařilo navrhnout těhlici, která je oproti té předešlé o něco lehčí. Je na ní samozřejmě ještě několik věcí k vylepšení. Zprvé zlepšit využití materiálu a tím docílit dalšího snížení hmotnosti. Podle MKP analýzy je tam několik takových míst. A zadruhé zvýšení tuhosti hlavně ve směru osy Z. Je potřeba se z těchto nedostatků poučit a při návrhu nějaké další těhlice se na tyto nedostatky více zaměřit.

Bohužel nebude odlévaná těhlice z časových důvodů vyrobena, ale upravená verze k sintrování jde do výroby právě v tyto okamžiky, kdy dokončuji tuto práci.

12 Použitá literatura

[1] BARTOŠ, Filip. *Technologie zhotovení odlitek "na hotovo"*. Brno, 2010. Dostupné také z: http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=31397. Bakalářská práce. VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Prof. Ing. Milan Horáček, CSc.

[2] URBAN, Jakub. *Návrh těhlice pro vůz Formule student*. Praha, 2013. Bakalářská práce. ČVUT, Fakulta strojní, Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel. Vedoucí práce Ing. Nikita Astraverkhau.

[3] KARNIŠ, Bc. Tomáš. *Celková dispozice a konstrukce podvozku vozu kategorie Formula Student CTU Cartech FS.03*. Praha, 2011. Diplomová práce. ČVUT, Fakulta strojní, Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel. Vedoucí práce Ing. Jan Baněček, Ph. D.

[4] HRUŠKA, Bc. Jindřich. *Zadní náprava pro vůz formule Student*. Praha, 2011. Diplomová práce. ČVUT, Fakulta strojní, Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel. Vedoucí práce Ing. Jan Baněček, Ph. D.

[5] MILLIKEN, William F. *Race car vehicle dynamics*. Warrendale: SAE International, 1995, xxviii, 890 s. ISBN 15-609-1526-9

[6] SKF. SKF [online]. 2015 [cit.2015-06-15]. Dostupné z: <http://www.skf.com/group/index.html?switch=y>

[7] AMD AUTODÍLY. *AMD Autodíly* [online]. 2015 [cit. 2015-06-15]. Dostupné z: <http://www.amd-autodily.cz/>

13 Přílohy

Příloha 1 – Výkres zadní těhlice, formát A1

Příloha 2 – DVD – Model zadní odlévané těhlice, MKP analýza a výkres