



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO
INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

KONSTRUKČNÍ ÚPRAVA NÁBOJE PŘEDNÍHO KOLA FORMULOVÉHO VOZU

FORMULA FRONT WHEEL CARRIER DESIGN MODIFICATION

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

Bc. MARTIN LNĚNIČKA

AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE

Ing. PAVEL RAMÍK

SUPERVISOR

BRNO 2011

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav automobilního a dopravního inženýrství

Akademický rok: 2010/11

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Martin Lněnička

který/která studuje v **magisterském studijním programu**

obor: **Automobilní a dopravní inženýrství (2301T038)**

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 diplomové práce:

Konstrukční úprava náboje předního kola formulového vozu

v anglickém jazyce:

Formula Front Wheel Carrier Design Modification

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Proveďte konstrukční úpravu náboje předního vozidla Formule Student s ohledem na požadavek jeho nízké hmotnosti. Začleňte navržený náboj kola do celkové konstrukce vozidla.

Cíle diplomové práce:

1. Proveďte dostupnou rešerši konstrukčního provedení nábojů kol soudobých vozidel se zaměřením na vozidla Formule Student.
2. Proveďte návrh konstrukční úpravy náboje předního kola v systému CAD v návaznosti na dané zavěšení kola a navrhnete materiál pro výrobu náboje. Navrhnete uspořádání sestavy kola.
3. Vytvořte výpočtový model náboje kola pro analýzu jeho napjatosti.
4. Proveďte výpočtovou simulaci napjatosti náboje kola v zadaných zátěžných stavech. V případě potřeby tvar upravte a postup opakujte.
5. Začleňte sestavu kola do celkové sestavy vozidla.
6. Zhodnoťte získané výsledky a vyslovte se k vhodnosti navrženého tvaru náboje a uspořádání sestavy kola.

Seznam odborné literatury:

- [1] Formula Student web page [online], 2010, poslední revize 3.10.2010. Dostupné z:
<<http://www.formulastudent.com/>>
- [2] Formula SAE web page [online], 2010, poslední revize 7.10.2010. Dostupné z:
<<http://students.sae.org/competitions/formulaseries>>
- [3] JANÍČEK, P., ONDRÁČEK, E., VRBKA, J. Pružnost a pevnost I, VUT Brno 1992
- [4] Pro/Engineer WildFire 4.0 Resource Center [online], Parametric Technology Corporation, 2010, poslední revize 7.10.2010. Dostupné z:
<http://www.ptc.com/community/resource_center/proengineer/index.htm>
- [5] Release 12.1 Documentation for ANSYS, ANSYS Inc., Canonsburg, USA 2010

Vedoucí diplomové práce: Ing. Pavel Ramík

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2010/11.

V Brně, dne 19.11.2010

prof. Ing. Václav Pištěk, DrSc.
Ředitel ústavu



prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan



ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá konstrukčním návrhem náboje předního kola vozu kategorie Formule Student v systému CAD. Obsahuje porovnání konstrukčního provedení nábojů, různé způsoby uložení a zavěšení kola formulových vozidel. Je zde uvedeno několik variant navržených těhlic. V první fázi je navrženo uspořádání sestavy kola Formule Student a dále je provedena výpočtová simulace napjatosti náboje předního kola a jeho konstrukčních úprav pomocí MKP.

KLÍČOVÁ SLOVA

Formule Student, uložení kola, zavěšení kola, přední těhlice, hřídel, náboj, model, součást, ložisko, síly na kolo

ABSTRACT

This thesis deals with the structural design of front wheel hub of Formula Student the car categories in the CAD system. It includes comparison to proposal design of the hubs, different concept of wheel-seat and wheel suspension of a formula cars and a motor-cars. There is described a few version of design front wheel carrier. The first step is proposed assembly wheel of Formula Student and the next step is realized analytic simulation a stress by FEM of the front wheel carrier and his construction modifications.

KEYWORDS

Formula Student, wheel assessment, wheel suspension, front wheel hub carrier, shaft, hub, model, component, bearing, wheel forces



BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

LNĚNIČKA, M. Konstrukční úprava náboje předního kola formulového vozu. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 86 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Pavel Ramík.



ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

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

V Brně dne 27. května 2011

.....

Martin LNĚNIČKA



PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji mému vedoucímu diplomové práce panu Ing. Pavlu Ramíkovi, mým přátelům a v neposlední řadě mým rodičům, kteří mě poskytli podporu a možnost studia.



OBSAH

Úvod	10
1 Uložení kola.....	11
2 Těhlice	14
2.1 Popis a funkce těhlice	14
2.2 Automobilová a závodní těhlice	14
2.2.1 Konstrukční provedení automobilové těhlice.....	16
2.2.2 Konstrukce závodních těhlic	17
2.3 Ukázky konstrukce formulových těhlic	18
2.3.1 Konstrukce těhlic Formule Student konkurenčních týmů.....	18
2.3.2 Konstrukce těhlic vozů Formule 1.....	22
3 Použité programové vybavení	24
3.1 Program Pro/ENGINEER	24
3.2 Program ANSYS.....	24
4 Konstrukční provedení těhlice Formule Student	26
4.1 Konstrukční návrh přední těhlice Formule Student	33
4.1.1 Varianty přední těhlice	35
4.1.2 Konečná varianta těhlice	41
4.2 Podložka pro nastavení odklonu kola	43
4.3 Horní segment těhlice	46
4.4 Hřídel náboje.....	47
4.4.1 Varianty hřídele náboje	47
5 Sestava přední těhlice	50
5.1 Postavení těhlice vůči ramenům nápravy	51
5.2 Začlenění sestavy kola do sestavy formulového vozu.....	54
6 Vytvoření výrobních výkresů z 3D modelů	55
6.1 Postup převodu z 3D modelu na 2D výkres.....	55
6.2 Tvorba pohledu	55
7 Síly působící na těhlici a používané jízdní stavy.....	56
7.1 Síly působící na těhlici.....	56
7.2 Jízdní stavy používané při výpočtové kontrole součástí.....	56
7.3 Síly v kloubech zavěšení přední těhlice.....	57
8 Analýza modelu těles pomocí MKP	58
8.1 Zadání okrajových podmínek a zátěžných sil	59
8.2 Analýza napjatosti a deformace horního segmentu těhlice	63
8.3 Analýza napjatosti a deformace přední těhlice	66



8.4	Konstrukční úprava - odlehčení těhlice	69
8.4.1	První konstrukční úprava.....	69
8.4.2	Druhá konstrukční úprava	73
8.4.3	Třetí konstrukční úprava.....	75
8.4.4	Vyhodnocení výsledků konstrukčních úprav	79
	Závěr.....	81
	Použité informační zdroje.....	83
	Seznam použitých zkratk a symbolů	85
	Seznam příloh.....	86



ÚVOD

V této diplomové práci se budu zabývat problematikou předního náboje kola vozu kategorie Formule Student, která slouží studentům k získávání zkušeností a připojení se na daném projektu v týmové práci. Tento projekt představuje návrh, vývoj a konečnou stavbu vozidla formulového typu podle konkrétních pravidel. S tímto vozidlem je možné se zúčastnit soutěžních závodů, což umožní porovnat jízdní vlastnosti s konkurenčními týmy a získat zkušenosti, případně řešit a vylepšovat nedostatky formulového vozidla.

Volba této diplomové práce mě připojila do týmu, který se podílí na projektu formulového vozu. V tomto projektu, kde vzájemná domluva mezi jednotlivými skupinami týmu je nejdůležitější, je hlavním cílem stavba vozidla kategorie Formule Student. Snaha o vytvoření co nejideálnějšího konstrukčního řešení náboje předního kola formulového vozu byla mým hlavním úkolem. Náboj kola, který lze pojmenovat též těhlice, v textu níže bude použit výhradně termín těhlice, je primární problematika této diplomové práce. Těhlice je hlavní součástí uložení kola, proto nemalou součástí mé práce je rešerše různých typů uložení kol na závodních vozidlech a jejich způsoby konstrukce. Dále zde budou popsány různé typy zavěšení kola přední nápravy a porovnání konstrukcí těhlic konkurenčních týmů formulových vozidel.

Parametry, které budou sloužit pro tvorbu těhlice se musí stanovit před vlastním konstrukčním řešením, které je provedeno ve statické poloze vozidla. Parametrům, které mi byly poskytnuty, se musí přizpůsobit tvorba těhlice a s ní souvisejících komponent. Mezi tyto vstupní hodnoty patří například připojovací body ramen, zális kola, nejvyšší požadovaný odklon kola, rozchod kol, atd. Při návrhu se musí věnovat pozornost umístění těhlice v kole, aby nedošlo k vzájemné kolizi kola a dalších jednotlivých prvků, mezi které patří brzdový třmen, brzdový kotouč a ramena nápravy. Z tohoto důvodu se bere zřetel na zvolení vhodných disků s příčným zálisem kola – ET a dostatečně velkým průměrem. Aby k havárii nedošlo, sestaví se jednotlivé prvky uložení kola do krajních pozic, kde se zjistí případná kolize mezi komponenty. S ohledem na tyto skutečnosti bude proveden konstrukční návrh přední těhlice vozu, u které se požaduje stanovení okamžitého odklonu kola. Dále jsou v diplomové práci uvedeny různé návrhy těhlic, ke kterým jsem postupným zpracováním a konzultacemi s ostatními skupinami týmu dospěl. Návrh konstrukčního řešení je zpracován modelováním těles v systému CAD, který se dnes běžně využívá k práci konstruktéra při tvorbě 3D modelů.

Na konci této diplomové práce budou navržené konstrukční řešení prvků náboje kola, 3D modely, podrobeny napětíové analýze, která spočívá v numerické metodě konečných prvků používána při řešení inženýrských problémů. Při této metodě se zdůrazňuje skutečnost, že základním kamenem je prvek konečných rozměrů, na rozdíl od pohledu klasické pružnosti, která vychází z představy rovnováhy na nekonečně malém elementu. Podrobená analýza těles ukáže, zda bude nutné provést úpravu tvaru.



1 ULOŽENÍ KOLA

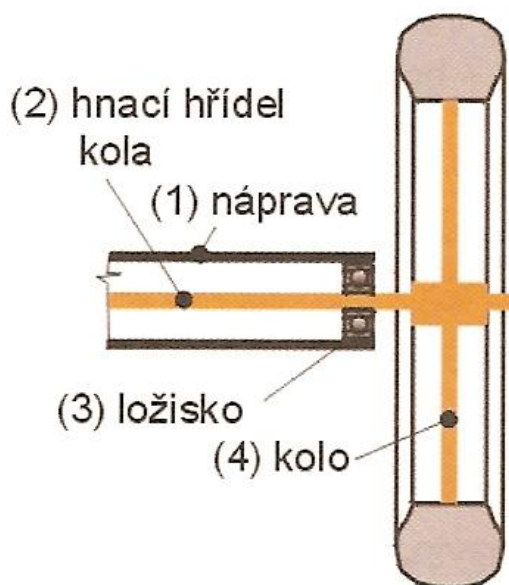
Pro uložení kol na nápravě je rozhodující, jedná-li se o kola hnací nebo hnaná. Rozdíl je v tom, že hnané kolo přenáší pouze tíhu vozidla a proto není nutné brát pozornost na přídatné zatížení hnacího hřídele. Zatímco hnací přenáší i točivý moment od rozvodové skříně. Pro uložení se používají valivá kuličková nebo kuželíková ložiska. Jako kuličková se mohou použít jednořadá nebo dvouřadá ložiska. Kuželíková je nutno montovat do dvojic tak, aby přenášela síly v obou směrech.

Způsoby uložení

Následně zde budou popsána uložení hnacích kol. U Formule Student je přední náprava hnaná a zadní náprava hnací. Na následujících schématech je použit obraz ložiska, který představuje pouze jeho symbolické označení a ne konkrétní druh ložiska.

➤ Uložení letmé

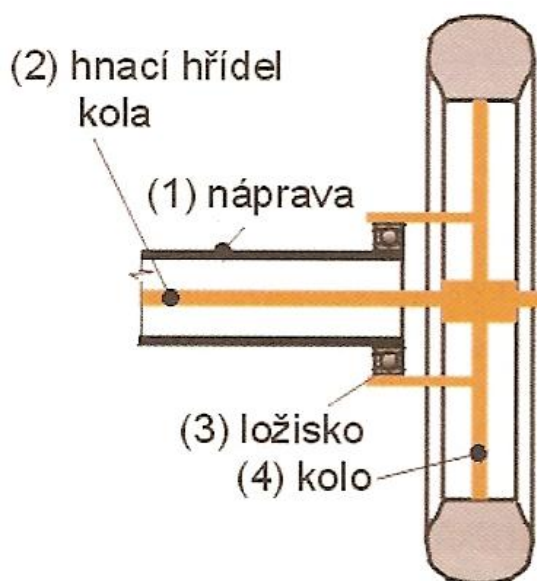
Zde je hnací hřídel (2) namáhán točivým i ohybovým momentem. „Ohybový moment vzniká zatížením kola tíhou vozidla.“ [1, str.72]



Obr. 1 Uložení letmé [1]

➤ Uložení pololetmé

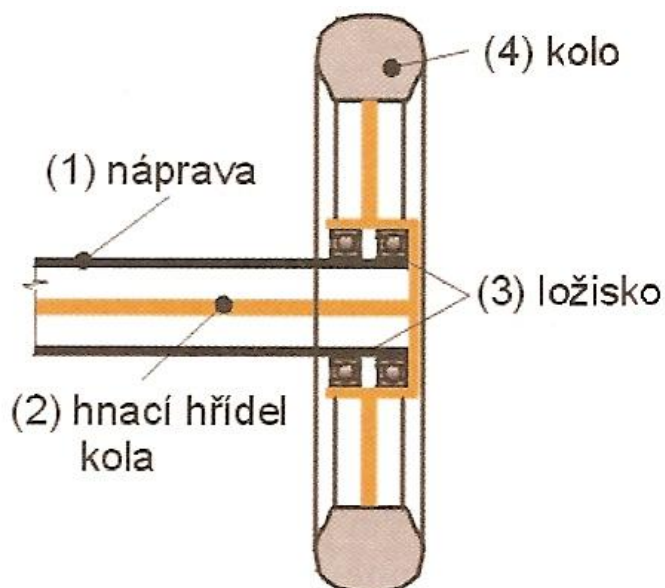
V tomto případě je část ohybového momentu přenášena přes nápravu (1) a hnací hřídel kola (2) je částečně odlehčen.



Obr. 2 Uložení pololetmé [1]

➤ **Uložení s odlehčeným hnacím hřídelem (na mostě)**

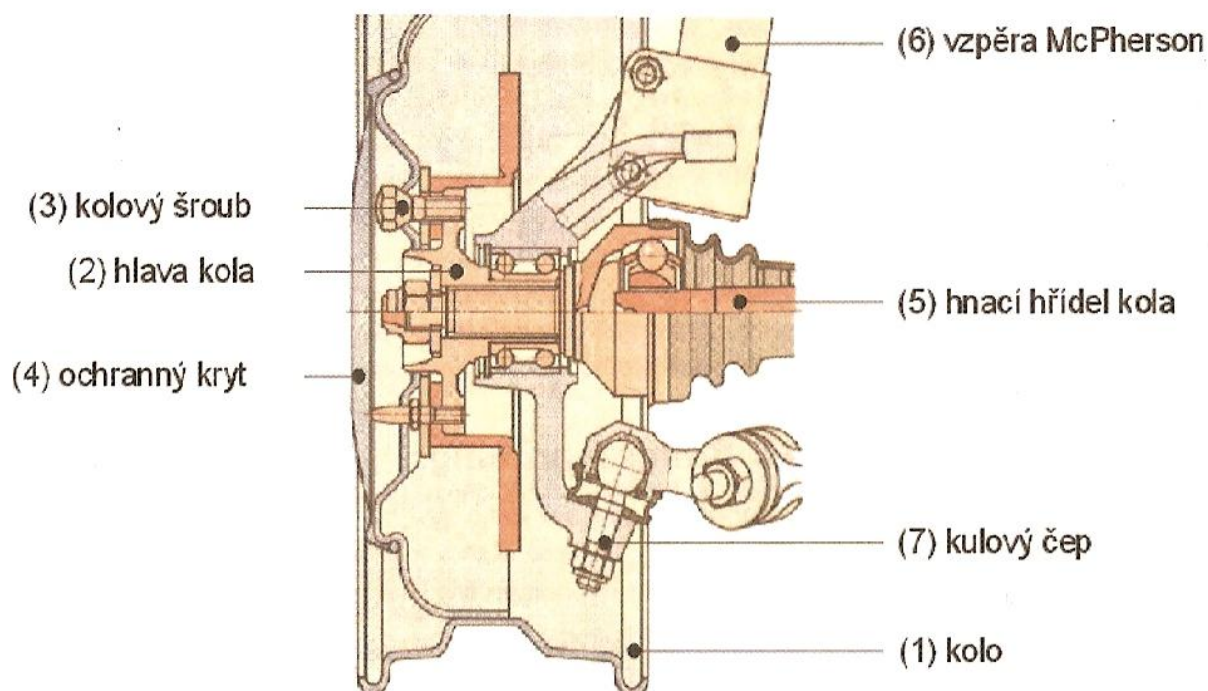
V tomto případě je uložení provedeno pomocí dvou ložisek (3) tak, že zatížení od tíhy vozidla přenáší konstrukce nápravy (1). Hnací hřídel kola je zde zatížen pouze točivým momentem. „Ve srovnání s oběma předchozími případy dochází nejen k úspoře hmotnosti hnacího hřídele, ale protože hřídel má menší průřez, je pružnější a záběr kol je měkčí.“ [1, str. 72]



Obr. 3 Uložení na mostě [1]



„Na obr. 4 je vyobrazeno konstrukční provedení uchycení kola na nápravě. Jedná se o hnací nápravu, která je zároveň řídicí, a proto je nutné aby obsahovala homokinetický kloub. Na konci hnacího hřídele kola (5) je pomocí matice uchycena hlava kola (2), která je uložena ve dvouřadém kuličkovém ložisku s kosoúhlým stykem (uložení letmé). Jak bude popsáno níže, u řešení uložení kola Formule Student je hlava kola totéž co hřídel náboje. K hlavě kola je upevněno kolo pomocí kolových šroubů (3). Střední část kola zakrývá ochranný kryt (4).“ [2]



Obr. 4 Konstrukční provedení uložení kola na nápravě [1]



2 TĚHLICE

2.1 POPIS A FUNKCE TĚHLICE

„U nápravy automobilu je důležitou součástí těhlice, která přenáší síly působící od kola pohybujiícího se po vozovce. K těhlici je připevněno několik prvků, které tvoří celek zavěšení kola. Mezi prvky patří: horní a dolní příčné rameno u lichoběžníkové nápravy, výkyvné rameno u nápravy McPherson, dále jsou to pružící a tlumící jednotky, hnací tyče, vozidlová kola, brzdové soustavy a především tyče řízení. Těhlice přenáší veškeré síly a momenty z vozovky na automobil a naopak. Ložiskový komplet je umístěn v jejím středu, ve kterém je uloženo kolo. Ložiska musí být schopny zachytit radiální a axiální zatížení. Hnací hřídel z převodovky je veden do náboje kola uloženém v těhlici, jedná-li se o hnací nápravu. Zde musí být součástí náboje homokinetický kloub, který umožňuje přenos kroutícího momentu i v případě vzájemného vyosení těhlice a hnací hřídele.

Dle použití jsou v náboji těhlice umístěna jednořadá nebo dvouřadá radiální ložiska. V ložiscích je také uložen hřídel náboje, na kterém je připevněn brzdový kotouč nebo brzdový buben. Na hřídel náboje je upevněno kolo pomocí čtyř nebo pěti šroubů či matic, které zajistí vystředění kola, spolu s nákrůžkem na náboji, na který se nasadí kolo.

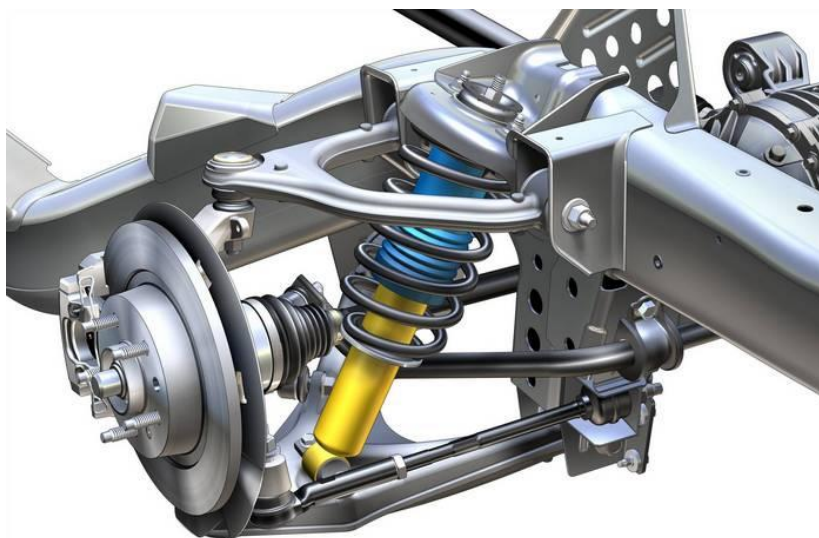
Těhlice patří k neodpruženým hmotám kola, a proto se klade pozornost na co nejmenší hmotnost. Tato podmínka má zásadní vliv na naladění podvozku a nerovnosti vozovky. Hmotnost úzce souvisí s volbou materiálu, který by měl být lehký, ale zároveň pevný. “[2]

2.2 AUTOMOBILOVÁ A ZÁVODNÍ TĚHLICE

Těhlice mají různá konstrukční provedení u automobilů a závodních vozů, protože se musí přizpůsobit odpovídajícím naladěním nápravy vozu. Automobilová těhlice se nejčastěji vyrábí jako odlitek z šedé litiny nebo oceli. Závodní těhlice se nejčastěji vyrábí ze slitin hliníku, které se obrábí na CNC strojích. Používají se dražší materiály, protože se klade důraz na hmotnost a aby bylo vozidlo co nejlehčí. „Na tvar a konstrukci těhlic má vliv typ zavěšení kol a použitá technologie výroby. V současnosti existuje více možností zavěšení kol. Vybral jsem nejvíce používané. Těmi jsou:

- a) pomocí lichoběžníkové nápravy
- b) typ McPherson
- c) náprava s víceprvkovým závěsem

Lichoběžníkové zavěšení nápravy je ukázáno na *obr. 5* jehož název pro tento druh nezávislého zavěšení vznikl tím, že koncové body ramen tvoří v průmětu do příčné svíslé roviny lichoběžník. Tento systém se nejvíce uplatňuje pro sportovnější vozy. K nápravnicí připojená ramena jsou nestejně délky, horní rameno je kratší, spodní delší. Touto úpravou se částečně odstraní nevýhoda těchto náprav – změna rozchodu, která má vliv na boční posun kol a zvýšené opotřebení pneumatik a zhoršené jízdní vlastnosti při jízdě. Lichoběžníková náprava poskytuje lepší jízdní vlastnosti, ale její výroba je dražší. “[2]



Obr. 5 Lichoběžníkové zavěšení nápravy [9]

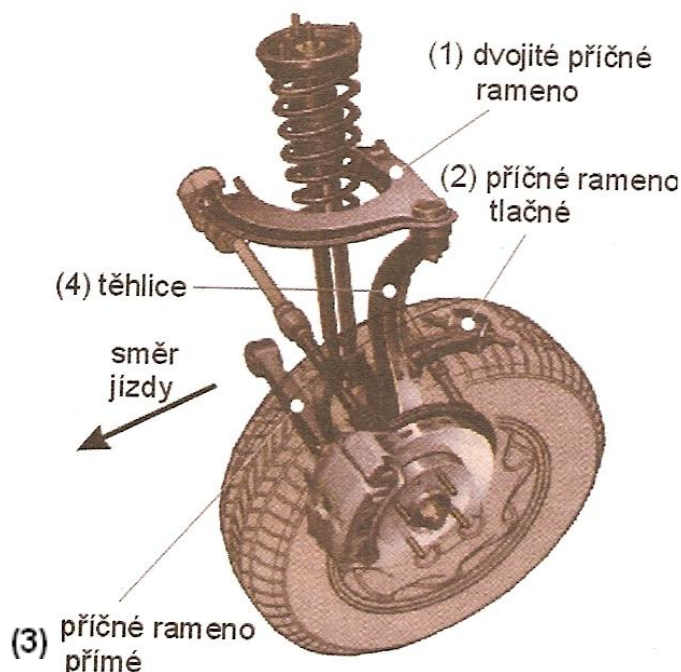
U zavěšení nápravy McPherson jsou kola ustavena příčným (většinou trojúhelníkovým) ramenem uchyceným pod osou kola, pružicí a tlumicí jednotkou a spojovací tyčí. Hlavní výhody této konstrukce spočívají v malé neodpružené hmotě, robustní konstrukci spodního ramene a kompaktní stavbě. Konstrukce, která dostala název podle svého vynálezce, byla po desetiletí zdokonalována a dnes představuje standardní koncepci pro většinu vozidel nižší a střední třídy. Tento typ uložení příznivě ovlivňuje stabilitu vozidla v zatáčkách, zlepšuje vedení kola a zachycení brzdných reakcí. Názorná ukázka tohoto zavěšení je na obr. 6.



Obr. 6 Zavěšení nápravy typu McPherson [10], [14]



Nápravy s víceprvkovým závěsem mají kolo zavěšeno na **více** (až pěti) **ramenech**. Kolo je nahoře zavěšeno pomocí horního dvojitého příčného ramene (1), dole prostřednictvím dvou samostatných příčných ramen, z nichž jedno je přímé (3) a druhé je zahnuto směrem dozadu (2). Zavěšení zajišťuje negativní poloměr rejdů, což je z hlediska směrové stability vozidla výhodné. Konstrukční provedení je na *obr. 7*.



*Obr. 7 Přední náprava automobilu Mitsubishi Galant 2.0 TD
(víceprvkový závěs) [1]*

2.2.1 KONSTRUKČNÍ PROVEDENÍ AUTOMOBILOVÉ TĚHLICE

Těhlice u osobních automobilů, které jsou odlity z šedé litiny a dosedací, funkční plochy jsou obrobeny na požadovaný rozměr je na *obr. 8*. V současné době je to nejpoužívanější způsob umožňující uchycení jednotky McPherson (tlumič s pružinou). Toto provedení uchycení je nejběžnější pro osobní automobily nižší a střední třídy. Náboj je zde řešen pomocí jednoho dvouřadého ložiska a jeho poloha je zajištěna pomocí vnitřních pojistných kroužků.



Obr. 8 Těhlice osobního automobilu [11]

2.2.2 KONSTRUKCE ZÁVODNÍCH TĚHLIC

Při konstrukci těhlic závodního automobilu musí být splněny požadavky, které vyplývají z extrémní jízdy, kdy je potřeba přivést chladící vzduch k brzdovým kotoučům. Dalším konstrukčním řešením je posunutí brzdového třmene co nejnižší do spodní části těhlice. To má za následek přesunutí podílu hmotnosti nápravy blíže k vozovce a tím snížení výšky těžiště. Tímto má vozidlo lepší ovladatelnost a přilnavost k vozovce při jízdě v zatáčkách. U závodních vozů se používá centrální uchycení disku k hřídeli náboje, kde je jedna matice ve středu kola. Toto řešení se používá z důvodu rychlé výměny kola, kde stačí odšroubovat pouze jednu matici.



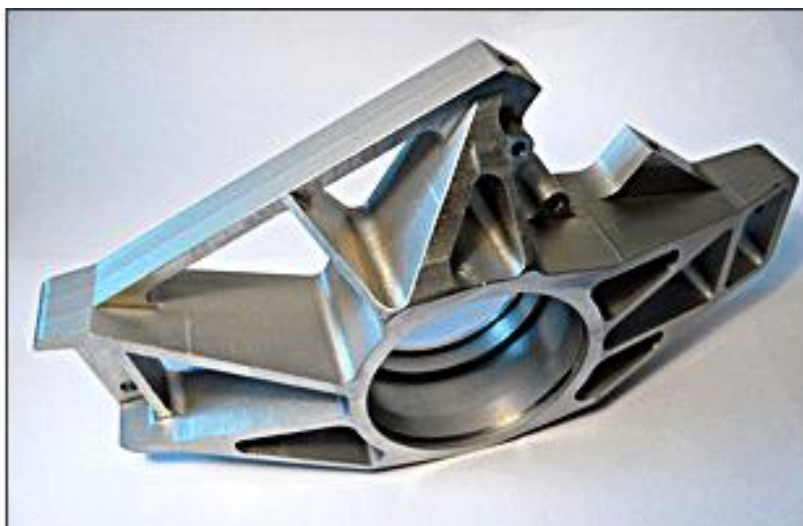
2.3 UKÁZKY KONSTRUKCE FORMULOVÝCH TĚHLIC

2.3.1 KONSTRUKCE TĚHLIC FORMULE STUDENT KONKURENČNÍCH TÝMŮ

Zde uvedu různé možnosti řešení těhlic jednotlivých týmů, protože je vhodné se inspirovat a sbírat zkušenosti k samotné tvorbě nejen těhlic, ale celé koncepce studentské Formule Student z Ústavu automobilního a dopravního inženýrství.

Těhlice konstruovaná z lehkých slitin

Těhlice závodních vozů jsou vyrobeny z velmi lehkých a pevných slitin hliníku. Tento použitý materiál má velkou výhodu v nízké hmotnosti. Ukázka takto vyrobené těhlice je na *obr. 9*.



Obr. 9 Těhlice konstruovaná z lehkých slitin [16]

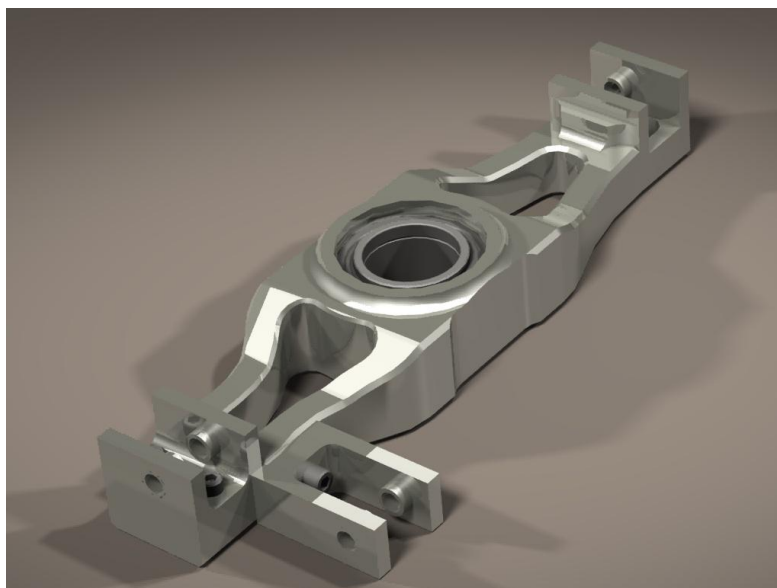
Na *obr. 10* a *11* je vyobrazeno provedení konstrukce přední těhlice Formule Student univerzity Colorado. Je patrné, že těhlice je vyrobena z lehkých slitin hliníku. Na *obr. 10* si můžeme všimnout uchycení horního a dolního ramene nápravy, které je součástí samotné těhlice. Úchyt pro tyč řízení je přišroubován k těhlici, což je nepraktické z hlediska výroby závitů přímo na těhlici, ale pro závodní disciplíny Formule Student vyhovující.

Na *obr. 11* můžeme vidět zavěšení přední nápravy, uložení kola v náboji a uchycení brzdového třmene. Držák brzdového třmene je tvořen dvěma konzolami umístěnými rovnoběžně vedle sebe, mezi kterými je prostor pro uchycení brzdového třmene.

Část brzdového kotouče obsahující třecí plochu je připevněna k hřídeli náboje šrouby nebo nýty. Toto provedení se uplatňuje pro sportovní a závodní účely. Třecí plocha brzdového kotouče je děrovaná, což má několik výhod. Mezi tyto výhody se řadí čištění třecí plochy od zbytkových částic brzdového obložení a následný odvod z této plochy, menší ohřev kotouče a



jeho rychlejší ochlazení po brzdění, nižší hmotnost kotouče a možná kontrola zjišťování opotřebení kotouče.

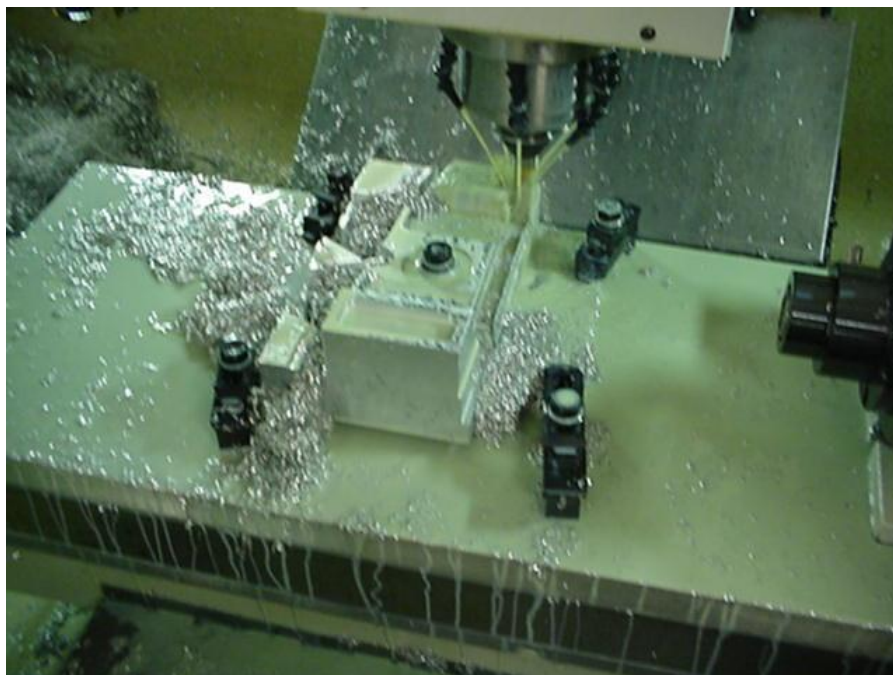


Obr. 10 Přední těhlice univerzity Colorado [6]



Obr. 11 Přední těhlice univerzity Colorado [6]

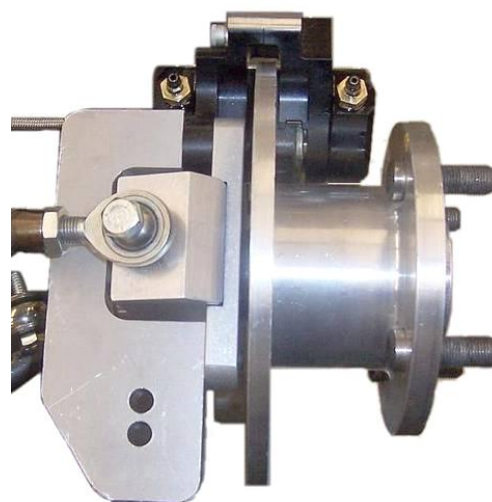
V konečné fázi, když je těhlice navržena a zkonstruována, se může přejít na operaci frézování, kdy se těhlice pomocí obráběcího stroje CNC vyrobí. Tuto činnost lze vidět na *obr. 12*. Tato metoda obrábění bude použita k výrobě pojednávané těhlice v této práci.



Obr. 12 Obráběná těhlice na CNC stroji [6]

Skládaná těhlice

Na *obr. 13* je zobrazeno neobvyklé řešení těhlice, kde jednotlivé komponenty jsou vzájemně složeny. Horní rameno nápravy je uchyceno v držáku, který je přišroubovaný k samotnému tělesu těhlice, která je upevněna v ložiscích hřídele náboje. Brzdový kotouč je přišroubován k hřídeli náboje. Uchycení kola je provedeno čtyřmi šrouby.



Obr. 13 Skládaná těhlice [17]



Svařovaná těhlice

Svařovaná těhlice, která je na výrobu velmi jednoduchá a levná záležitost má úchyt pro horní rameno připevněn pomocí svaru přímo k samotnému náboji těhlice. Toto řešení je na *obr.14*.



Obr. 14 Svařovaná těhlice [12]

Lité těhlice

Těhlice, které jsou duté skořepinové odlitky z elektronu, používá formule Renault na *obr. 15*. Jedná se o zadní hnací nápravu, která je uchycena ve 3 bodech. „Ramena jsou osazena stavitelnými čepy, které umožňují snadné seřizování geometrie a jemné ladění podvozku, aniž by byla nutná demontáž jednotlivých prvků nápravy. Je zde použit chlazený brzdový kotouč, který zásadně slouží ke snížení hmotnosti celého vozu a hlavně odvodu tepla při prudkém brzdění.

Konstrukce těhlice formule Renault je zajímavým alternativním řešením, kde je těhlice vyrobena pomocí odlitky. Tento postup je výhodný zejména při sériové výrobě, čímž se pokryjí hlavně náklady spojené s výrobou drahé formy.“[3]

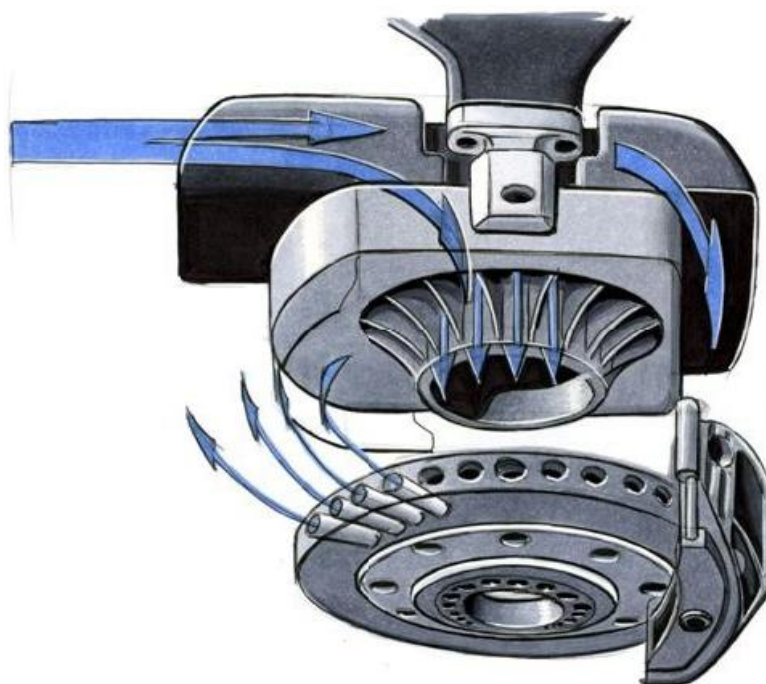


Obr. 15 Litá těhlice formule Renault [15]

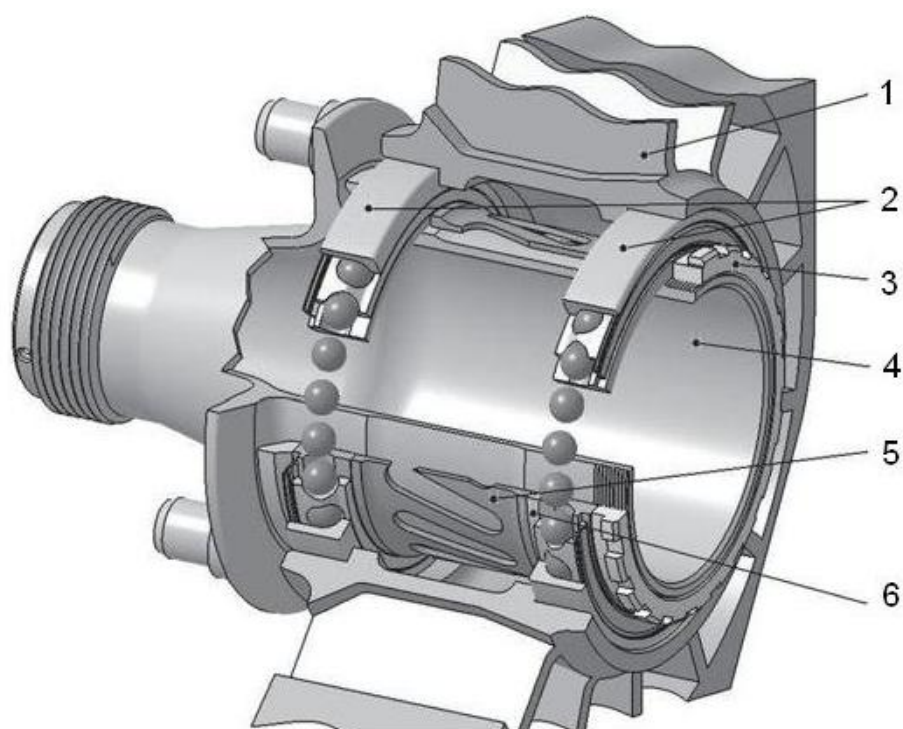
2.3.2 KONSTRUKCE TĚHLIC VOZŮ FORMULE 1

Těhlice předního kola

„Základním řešením konstrukce přední a zadní těhlice Formule 1 je řešení pro přívod vzduchu k brzdám. Ačkoliv jsou brzdy nejvýkonnějším zařízením celého vozu F1 a k jejich výrobě je využito velmi odolného uhlíkového kompozitu mají pochopitelně také svoje limity. Jejich největším nepřítelem jsou obrovské teploty, kterým musí čelit. Teplota brzdového kotouče se během závodu pohybuje mezi 400 až 800 °C a v určitých situacích může překročit i 1000 °C. Brzdové třmeny, které jsou buď kompozitové nebo z hliníkové slitiny pak vyžadují teplotu kolem 200 až 250 °C. Aby teplota brzdových komponentů nepřesáhla tyto teplotní hranice, které zaručují jejich nevadnoucí účinek, předpokládanou míru opotřebení a celkovou funkčnost musí být velmi účinně chlazeny. K ochlazování brzd se využívá náporový vzduch, který je přiváděn prostřednictvím lehkého kompozitového potrubí. Tento díl dosahující hmotnosti pouhých 100 g doléhá těsně k průtočné těhlici kola a k brzdovému třmenu. Jeho rozměry jsou dány řadou omezení a tak jednotlivé týmy nemohou prostřednictvím tvaru a tím i účinností získat žádnou výhodu.“[3]



Obr. 16 Přední těhlice Formule 1 [13]



Obr. 17 Uložení předního kola Formule 1 [19]

- Legenda:**
- | | |
|----------------------------|-----------------------------------|
| 1 – náboj kola (těhlice) | 4 – hřídel náboje kola |
| 2 – vnější kroužek ložiska | 5 – rozpěrný kroužek mezi ložisky |
| 3 – pojistná matice | 6 – vnitřní kroužek ložiska |



3 POUŽITÉ PROGRAMOVÉ VYBAVENÍ

V řešení problémů konstruování je neodmyslitelnou součástí využití počítačových programů. Konstrukční vlastní práce využívá hlavně programy Pro/ENGINEER pro objemové modelování a výpočtový program ANSYS – metoda konečných prvků. Jejich výhodou je vzájemná provázanost Pro/Engineer vs. Ansys. Z programu Pro/Engineer je možné převádět hotové modely do výpočtového programu ANSYS, který slouží k deformačně napěťové analýze a případných úprav převzatého modelu.

3.1 PROGRAM PRO/ENGINEER

Pro/ENGINEER integruje jednotlivé etapy vývoje výrobku a poskytuje velmi strmý a jednoduchý pracovní postup. „Přináší ucelenou řadu softwarových nástrojů pro souběžný vývoj od fáze návrhu průmyslového designu, přes koncepční návrh, detailní konstrukci, tvorbu výrobní dokumentace, analýzu a optimalizaci, NC obrábění a verifikaci.“[3] Tento program je kompatibilní s výpočtním programem pro posouzení deformačně napěťové analýzy metodou konečných prvků.

Pracovníkům využívající tento program, umožňuje plné soustředění se na provádění konstrukčních úloh, díky jeho velmi intuitivnímu prostředí s celou řadou automatizovaných rutinních procesů. To velmi zefektivňuje provádění konstrukčních a technologických změn. Největší výhodou systému Pro/ENGINEER je jeho úplná, přímá asociativita, která konstruktérům umožňuje provádět efektivně změny v kterékoliv fázi vývojového procesu. Veškeré změny provedené na dílu, sestavě, výkresu se automaticky promítají do všech dalších aplikací.

3.2 PROGRAM ANSYS

ANSYS je obecně program, který zahrnuje analýzu (statika, dynamika, pružnost pevnost, deformační stabilita), rázové děje, vedení tepla, proudění, elektromagnetické pole, elektrostatiku, ale také akustiku a lomovou mechaniku. Dále tento počítačový program umožňuje provádět nejen kontrolní výpočty, ale na základě kontrolních výpočtů následné optimalizace.

Metoda konečných prvků – MKP (Finite element method – FEM)

„MKP je numerická metoda pro řešení rozsáhlé třídy inženýrských problémů. Název metody zdůrazňuje skutečnost, že základním stavebním kamenem je prvek konečných rozměrů na rozdíl od infinitesimálního pohledu klasické pružnosti, která vychází z představy rovnováhy na nekonečně malém elementu.“[3]

Metoda vznikla přibližně v 50. letech minulého století, ale při řešení problémů pružnosti byly některé základní principy známy již dříve. Výpočetní technika, která se neustále vyvíjí, umožnila rozvoj metody určené nejdříve pro potřeby výpočtů konstrukcí v leteckém (Boeing), kosmickém (Apollo), jaderném a vojenském průmyslu (ponorky, rakety). Odtud se rozšířila do akademického prostředí a průmyslové praxe. MKP je založena na vytvoření sítě konečných prvků na modelu, tedy rozdělení řešené oblasti na konečný počet podoblastí - prvků. „Pro každý typ prvku je kromě dimenze a tvaru charakteristický počet a poloha jeho



uzlů. Uzly sítě jsou body v nichž hledáme neznámé parametry řešení (např. posuvy a natočení, z kterých dále počítáme napětí).“[3]

Kvalita výsledků a čas výpočtu je ovlivněna hustotou prvků sítě, čím větší počet prvků sítě, tím náročnější a přesnější výpočet. Na časové nároky má samozřejmě také vliv použitý hardware počítače. Výsledky se vztahují ke konkrétně zadanému případu, jen malá úprava, optimalizace apod. vyžaduje opakování celého procesu řešení.

Základní veličiny obecné pružnosti

V obecné prostorové statické úloze představují - celkem 15 neznámých funkcí proměnných x, y, z . Jedná se o:

- Tři posuvy: u, v, w
- Šest přetvoření: $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z, \gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}$
- Šest napětí: $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$

Tyto funkce jsou provázány systémem obecných rovnic pružnosti, které musí být splněny uvnitř řešené oblasti. Jsou to rovnice statické rovnováhy, rovnice geometrické a rovnice fyzikální. Předepsané okrajové podmínky pak musí být splněny na hranici řešené oblasti.



4 KONSTRUKČNÍ PROVEDENÍ TĚHLICE FORMULE STUDENT

Výše jsem ukázal různě řešené konstrukce těhlic jiných formulových týmů. V této kapitole se budu zabývat konstrukcí těhlice Formule Student, která by mohla být podobná v ideálním případě jako u vozů formule 1, tedy až na rozměrovou odlišnost. Dále zde uvedu návrh hlavních rozměrů, které jsou nezbytné pro sestavení kola k náboji a jejich následného smontování k nápravám vozu. S tím souvisí rozchod kol, zális disku – ET. Zális disku souvisí s poloměrem rejdu, čím bude poloměr rejdu větší, tím může být zális disku menší. Všechny výpočty se realizují ve statické poloze vozu.

Těhlice Formule Student vychází z podobných principů jako ostatní těhlice. Každý konstruktér si navrhuje těhlici individuálním nebo alternativním způsobem vyhovujícím podmínkám výroby a navržení. Při stavbě studentské formule jsme omezeni financemi a časem, proto je vhodné zkonstruovat takovou těhlici, která bude splňovat svoji funkci a bude ji možné vyrobit za přijatelnou cenu.

Konstrukce těhlic se musí přizpůsobit zavěšení kol, které je u studentské formule provedeno lichoběžníkovým závěsem na jednoduchých ramenech (trojúhelníková ramena). Kloubové spoje jsou řešeny pomocí kloubových hlavic (unibally). Velice důležitou součástí, kterou se musí konstruktér při řešení návrhu těhlic zabývat, je zvolení vhodných disků na vozidlo. Velikost samotné těhlice je ovlivněna prostorem v disku. Pro studentskou formuli se zvolily čtyři 13'' kola o šířce 7'', která mají nejmenší průměr 12,56''. Právě poslední hodnota je nejdůležitější, protože vymezuje prostor pro návrh těhlice předního kola. Při návrhu přední těhlice jsou důležité body, které slouží pro připojení horního a dolního ramene, řídicí tyče, brzdového třmenu a uložení ložisek kola. Tyto body spojením vytvoří těleso, které určuje tvar těhlice. Při návrhu je nutné věnovat pozornost rozměrovému uspořádání jednotlivých komponent v kole, aby nedošlo ke vzájemné kolizi např. kola s těhlicí nebo s jinými částmi např. brzdovým třmenem. U Formule Student je požadováno jednoduché a rychlé nastavení geometrie náprav odklonem kola (stanovení návrhu stavitelného prvku na těhlici). Toto nastavení je vyřešeno pomocí podložkového řešení.

Podložkové řešení má výhodu v rychlém a okamžitém nastavení odklonu kola podložkou, které zásadně neovlivní sbíhavost nápravy a tím není nutné seřizovat geometrii nápravy. Další výhodou tohoto řešení je možnost nastavení odklonu kola přímo na trati.

V první řadě konstrukce těhlice je vhodné si zvolit klouby pro uchycení ramen nápravy, tj. volba uniballů, ložiska pro uložení náboje, brzdový třmen s brzdovými destičkami a brzdový kotouč. Tyto součásti se budou nakupovat a proto je nutné je zvolit hned na samém začátku návrhu těhlice. Tyto části se pevně zvolí, uvažují se při tvorbě těhlic a při dalším řešení se nemění, s výjimkou ložisek. V této diplomové práci jsem vytvořil více variant těhlic u kterých se postupně měnily ložiska (viz. níže).

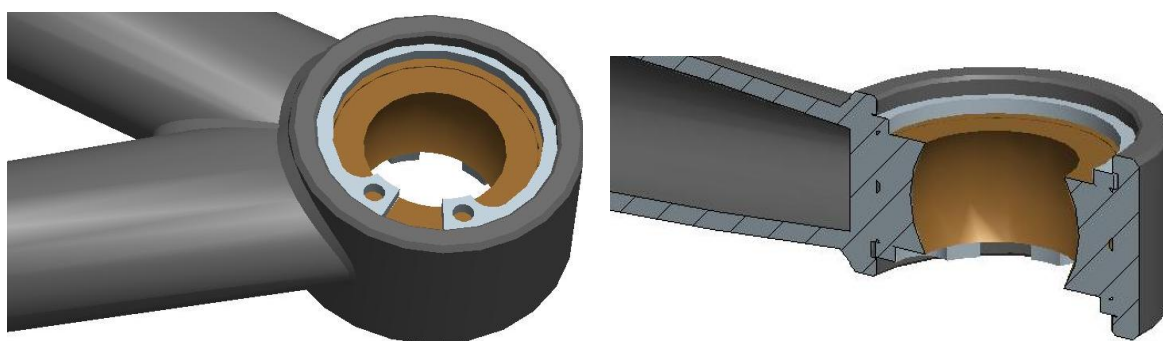
Kloubové hlavice – unibally

Na Formuli Student budou použity kloubové hlavice od firmy SKF. „Kloubové hlavice se skládají z hlavice tvaru oka s dříkem, v níž je uloženo standardní kloubové ložisko. Kloubové hlavice jsou opatřeny levým či pravým vnitřním nebo vnějším závitem podle ISO 965/1:1980.

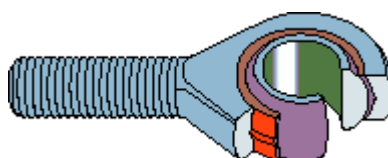


Kloubové hlavice SKF nevyžadující domazávání mají speciální kluzné vrstvy z moderních kluzných materiálů, které se vyznačují nízkým třením. Kloubové hlavice jsou určeny zvláště pro uložení, která musí dosahovat dlouhé provozní trvanlivosti bez domazávání.“ [7]

Po dohodě se skupinou týmu, která při návrhu využije unibally, se zvolil průměr oka 8 mm u všech použitých uniballů na nápravě. Pro uchycení horního a dolního ramene nápravy bude použita kloubová hlavice, která je přímo zabudovaná do ramene, viz *obr. 18*. Pro uchycení táhla řízení bude použita kloubová hlavice (uniball) s pravým závitem na *obr.19*.



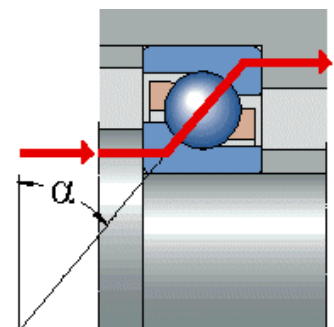
Obr. 18 Rameno nápravy s vloženou kloubovou hlavicí



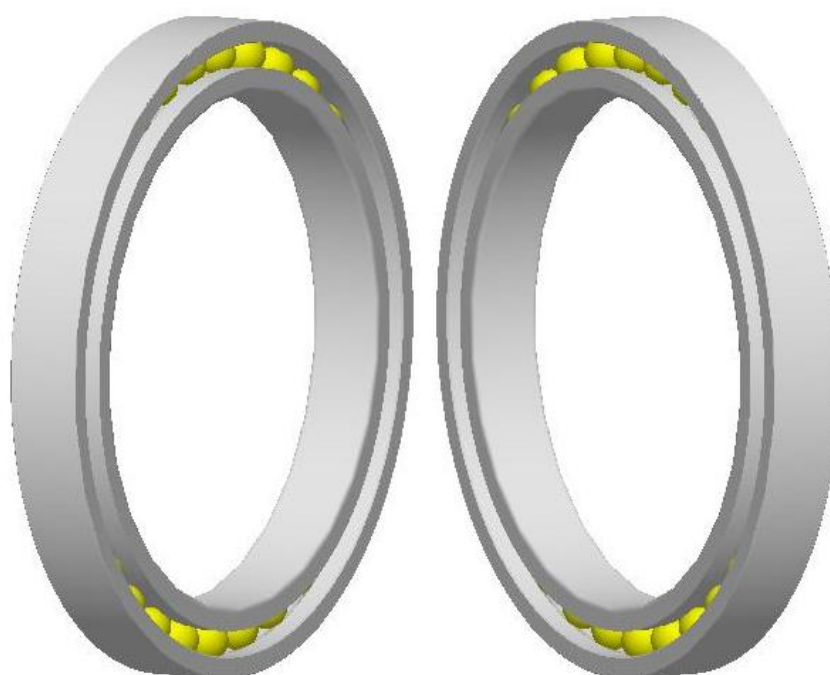
Obr. 19 Kloubová hlavice [7]

Ložiska přední těhlice

U Formule Student je náboj kola uložen ve dvou vysoce přesných kuličkových ložiskách s kosoúhlým stykem (jeden pár), která jsou zobrazena na *obr. 21*. Oběžné dráhy vnitřních a vnějších kroužků kuličkových ložisek s kosoúhlým stykem jsou vzájemně přesazeny ve směru osy ložiska. Ložiska jsou vyrobena firmou SKF, která mohou přenášet kombinované zatížení, tj. radiální i axiální sílu. „Axiální únosnost kuličkových ložisek s kosoúhlým stykem vzrůstá s rostoucím úhlem styku. Úhel styku α je definován jako úhel, který svírá spojnice stykových bodů kuličky a oběžných drah v radiální rovině, ve které je přenášeno zatížení z jedné oběžné dráhy na druhou, a kolmice na osu ložiska (*obr. 20*).“ [8]

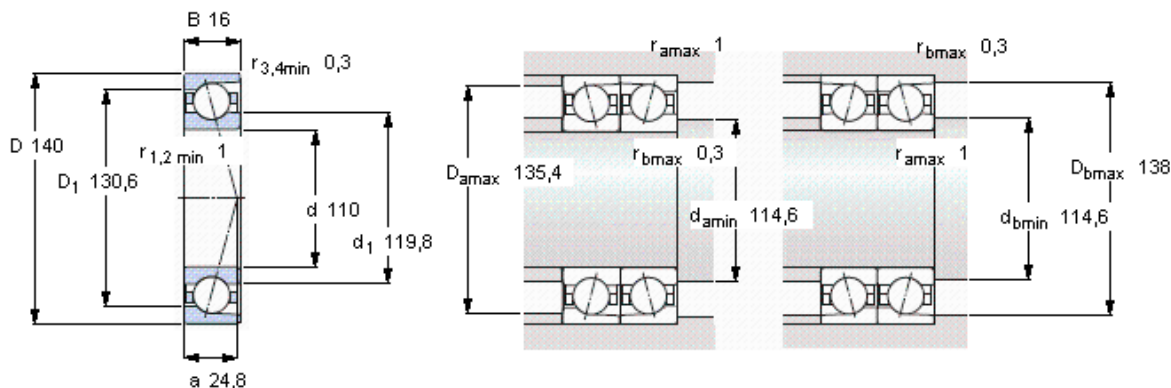


Obr. 20 Úhel styku [8]



Obr. 21 Model kuličkových ložisek s kosouhým stykem (jeden pár)

Uložení ložisek bude řešeno pomocí dvou navzájem sepnutých ložisek, které umožňují přesně nastavovat ložiskovou vůli a do jisté míry seřizováním vyrovnávat opotřebení. Změnu předpětí a zvýšení tuhosti lze zajistit změnou šířky rozpěrných kroužků mezi ložisky. Ložiska budou nalisována jak na hřídel náboje, tak zároveň do otvoru těhlíce. Na každé kolo jsou navržena dvě ložiska o stejném průměru vnitřního a vnějšího kroužku. Použití stejného ložiska má výhody v nižším počtu objednávaných položek a obráběcích operací hřídele náboje a s tím související kratší čas obrábění. O hřídeli náboje bude pojednáno později. Mezi nevýhody lze zařadit přesnější výrobu hřídele náboje (tolerance) z důvodu montáže. Na obr. 22 je vyobrazen rozměrový výkres navržených ložisek.



Obr. 22 Rozměrový výkres ložiska SKF 71822 CD/HCP4A [8]

Tab. 1 Parametry ložiska SKF 71822 CD/HCP4A

Hlavní rozměry [mm]			Základní únosnosti [kN]		Hmotnost [kg]	Označení
d	D	B	Dynamická – C ₁₀	Statická – C ₀		
110	140	16	31,9	40,5	0,453	71822 CD/HCP4A

Volba materiálu těhlic

Jak již bylo uvedeno, hlavními vlastnostmi těhlic je nízká hmotnost, vysoká pevnost, tak tomu je i u formulových provedení. Ke konstrukci těhlic jsou používány slitiny hliníku, které mají potřebné vlastnosti.

Materiál navržené přední těhlice se velmi dobře obrábí, leští a dá se svařovat. Poissonova konstanta činí 0,33. Navržená slitina hliníku je $AlZn5Mg3Cu$, EN AW 7022 - CERTAL, která má tyto základní fyzikální vlastnosti:

Tab. 2 Fyzikální vlastnosti materiálu těhlic

Pevnost v tahu:	Mez kluzu:	Modul pružnosti:	Hustota:	Tvrdość:	Tažnosť:
$R_m = 550 \text{ MPa}$	$R_{p0,2} = 495 \text{ MPa}$	$E = 72000 \text{ MPa}$	$\rho = 2760 \text{ kg/m}^3$	165 HB	8 %

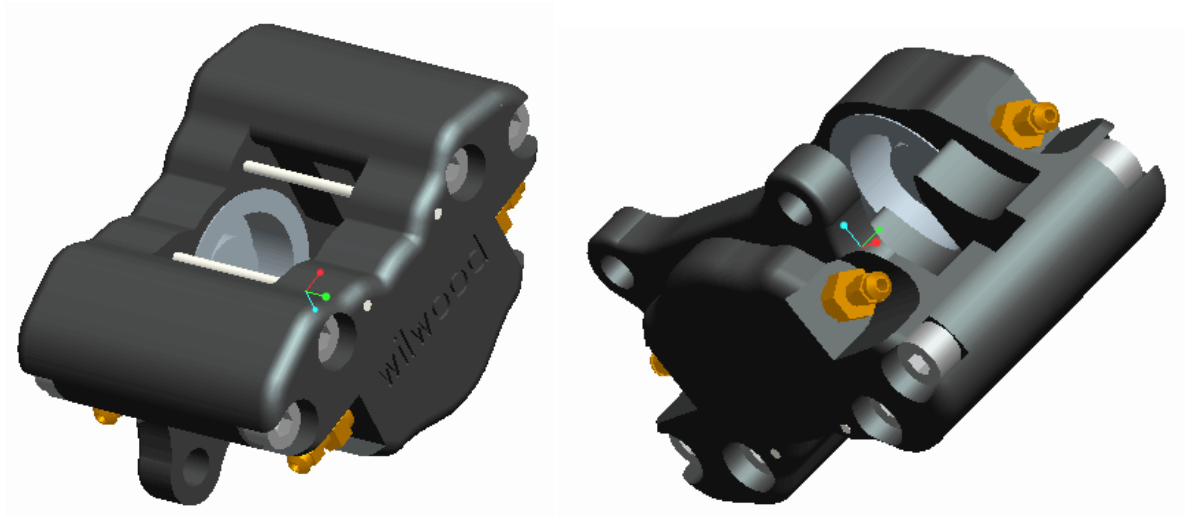
Brzdový třmen

Na přední a zadní nápravě Formule Student budou použity brzdové třmeny Dynapro Single od společnosti Wilwood.

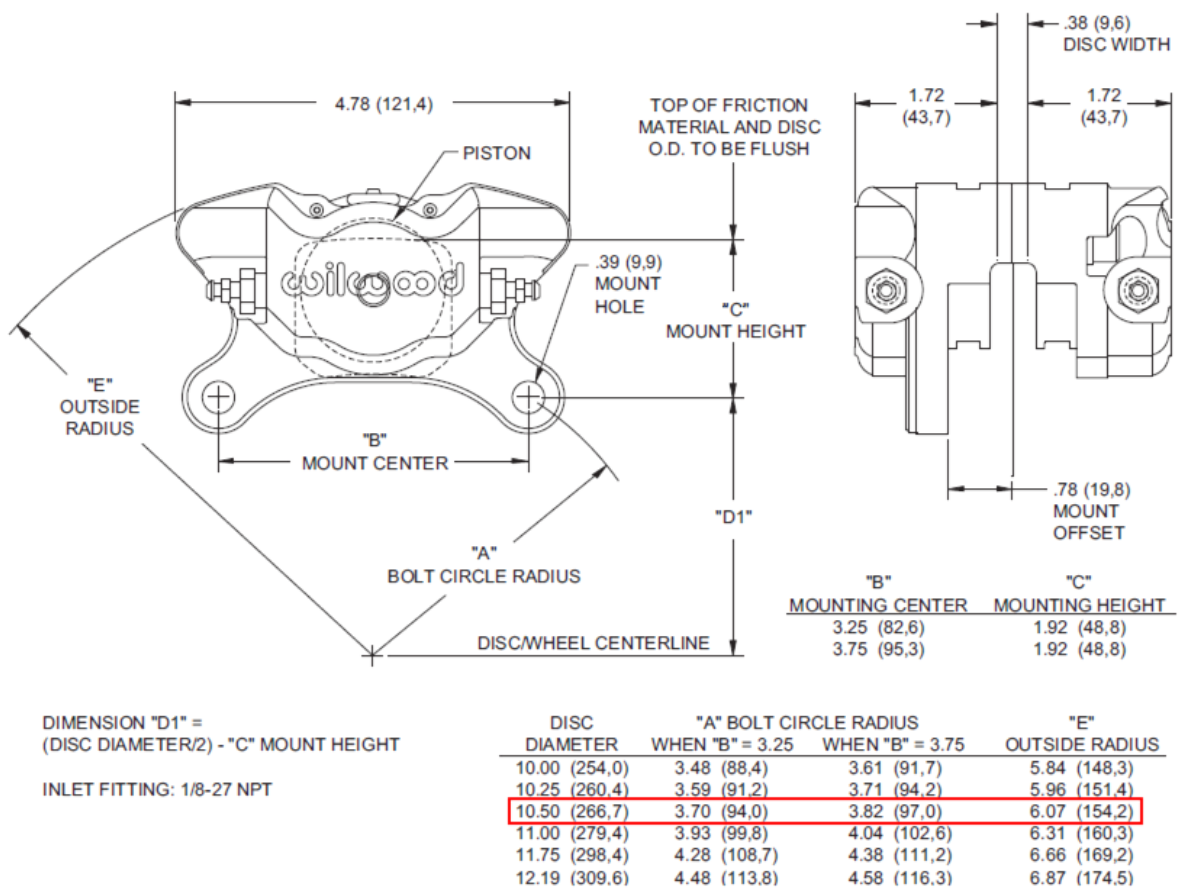
Výrobce: Wilwood
 Výrobní číslo: 120-9688
 Průměr pístku: 35.1 mm (1.38“)
 Pro tloušťku kotouče: 9.65 mm (0.38”)



3D model brzdového třmenu je na obr. 23.



Obr. 23 Model brzdového třmene



Obr.24 Zástavbové schéma brzdového třmenu Dynapro Single [20]

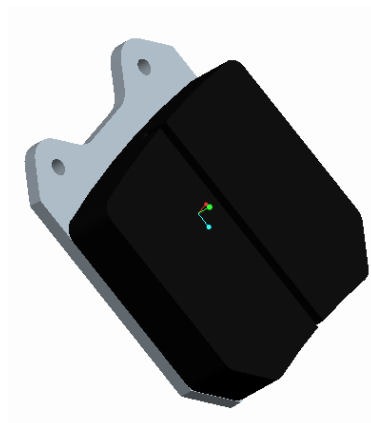
Při návrhu náboje kola bylo zapotřebí upevnit brzdový třmen podle konkrétních rozměrů, viz. přípojovací hodnoty v červeném rámečku na obr. 24.



Brzdové destičky

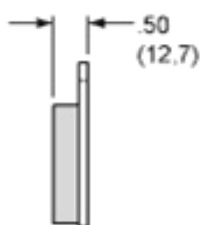
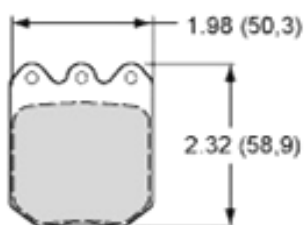
Rozměry brzdových destiček se při objednání nevybírají, protože jsou automaticky přiřazeny k brzdovému třmenu. Volí se jen materiál brzdových destiček podle použitého kotouče, viz *obr. 26*.

Výrobce: Wilwood
 Výrobní číslo: 150-9766K
 Typ: 6812



Obr. 25 Model brzdové destičky

DYNAPRO SINGLE CALIPER, TYPE 6812 PAD DIMENSIONS AND ORDERING INFORMATION:



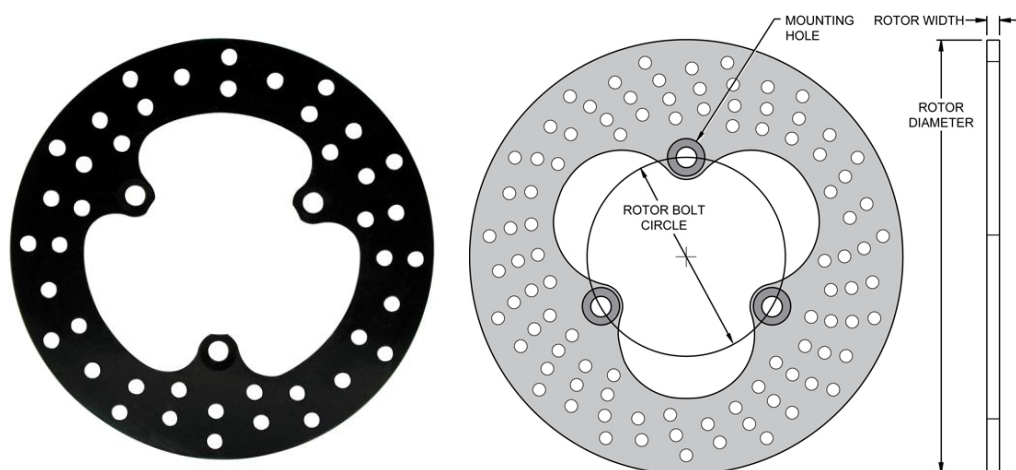
AXLE SET P/N	PAD TYPE / COMPOUND
15A - 10142K	6812 A PolyMatrix
15B - 9819K	6812 B PolyMatrix
15E - 9820K	6812 E PolyMatrix
15Q - 10144K	6812 Q PolyMatrix
150 - 9764K	6812 10 BP-10 Smart Pad
150 - 9765K	6812 20 BP-20 Smart Pad
150 - 9862K	6812 30 BP-30 Smart Pad
150 - 9756K	6812 CM For Titanium Rotor
150 - 9766K	6812 For Aluminum Rotor

Obr. 26 Rozměrové schéma, materiál a typ brzdové destičky [20]

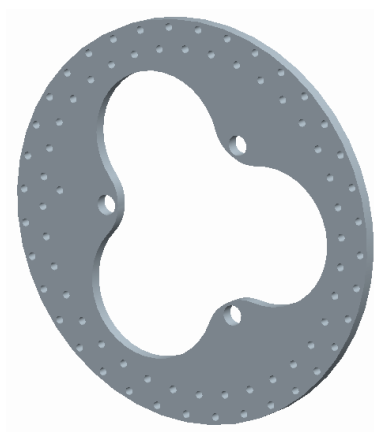
Brzdový kotouč

Bude použit brzdový kotouč s třemi úchytnými otvory vyrobený z hliníkové slitiny.

Výrobce: Wilwood
 Výrobní číslo: 160-3411
 Průměr 259.08 mm (10.2'')
 3x127 (5'') roztečná kružnice pro úchyty
 Průměr úchytných děr 13.1 mm
 Tloušťka disku 7.87 mm (0.31'')

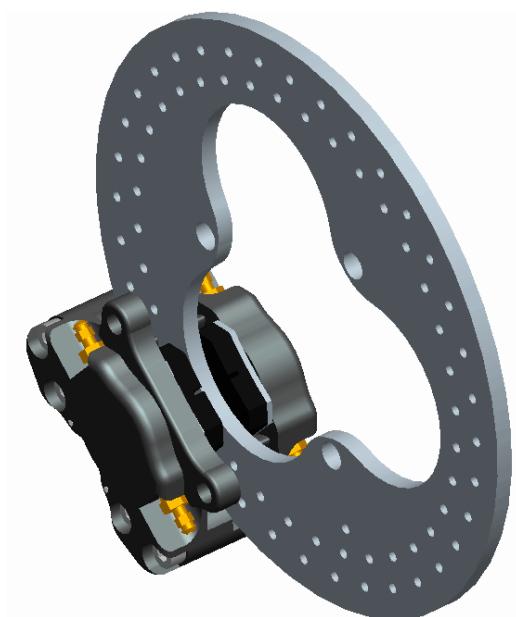


Obr. 27 Brzdový kotouč [20]



Obr. 28 3D model brzdového kotouče

Sestava posledních třech zmíněných prvků uložení kola je na obr. 29.



Obr. 29 Sestava brzdového třmenu, destiček a kotouče



4.1 KONSTRUKČNÍ NÁVRH PŘEDNÍ TĚHLICE FORMULE STUDENT

Přední těhlice vychází ze šesti hlavních bodů, kterým se musí přizpůsobit tvar samotné těhlice. Čtyři nejdůležitější body tvoří uchycení horního, dolního ramene nápravy, táhla řízení a střed dosedací plochy kola. Všechny tyto body mi poskytl pracovník zabývající se přední nápravou Formule Student. Pro konstrukci mi byly poskytnuty souřadnice v „ose x, y, z “. Dále jsem obdržel hodnoty zářezu kola, nejvyššího požadovaného odklonu kola, rozchodu kol. Další body slouží k uchycení brzdového třmene. Těleso těhlice předního kola bude umístěno v prostoru kola o průměru 13'' a šířce 7''. Disk o průměru 13'' má nejmenší průměr 12,56'', který určuje s šířkou disku skutečný prostor v kole. Do tohoto prostoru se musí namodelovat celá přední těhlice, tak aby nedošlo ke kolizi. Dalším důležitým faktorem ovlivňující jízdní vlastnosti resp. aerodynamiku vozu je, aby těleso těhlice nevyčnívalo z kola.

Hlavní body přední těhlice:

FWC – počátek souřadného systému přední pravé těhlice, **C** – bod uchycení spodního ramene nápravy, **G** – bod uchycení táhla řízení, **F** – bod uchycení horního ramene nápravy.

Z *tab. 3* vyplývají souřadnice hlavních bodů, které mi byly poskytnuty. Hodnoty souřadnic úchytných bodů mají počátek souřadného systému v ose kola v místě dosedací plochy kola na hřídel náboje. Souřadný systém je pravotočivý, kde „osa x “ směřuje ve směru jízdy, „osa y “ je rotací kola směřující doleva a „osa z “ směřuje od vozovky nahoru. Vzdálenosti ve směru „osy x, y, z “, tj. bodů C, G a F k dosedací ploše kola, jsou souřadnice pro konstrukci přední těhlice.

Souřadnice hlavních bodů přední těhlice při odklonu kola 0°:

Tab. 3 Souřadnice hlavních bodů přední těhlice při odklonu kola 0°

Název bodu	Body	Souřadnice		
		x [mm]	y [mm]	z [mm]
Počátek souřadného systému	FWC	0	0	0
Dolní rameno	C	10	76,1	-125,8
Řízení	G	-119,28	108,99	-42,77
Horní rameno	F	-30	113,14	123,5

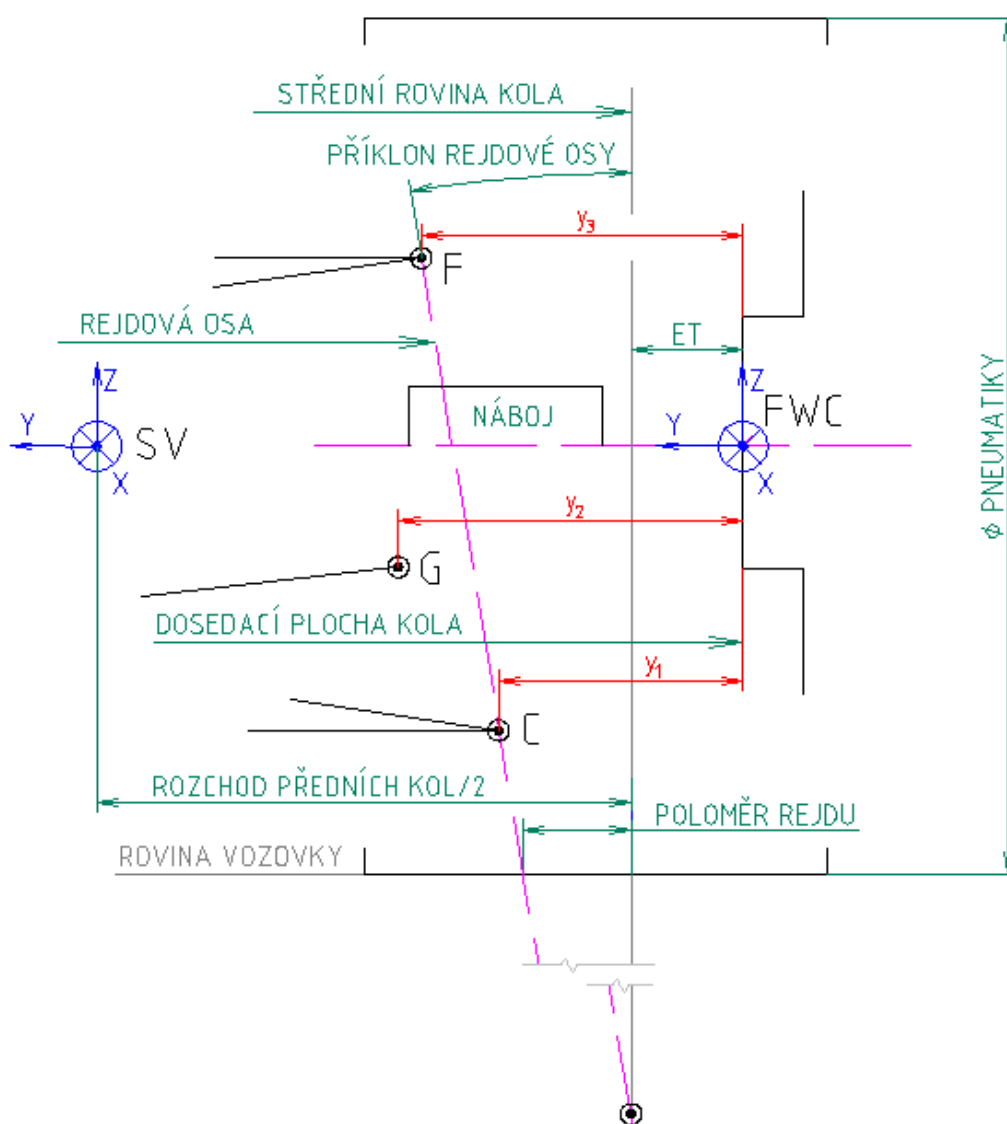
Na *obr. 30* jsou zobrazeny souřadnice hlavních bodů, kde spojnice bodů F a C tvoří rejdovou osu. Vzdálenost průmětu osy rejdu do vozovky se střední rovinou kola tvoří poloměr rejdu. Parametry y_1, y_2, y_3 zobrazují vzdálenost připojovacích bodů od dosedací plochy kola (souřadnice „osy y “).



Parametry předního kola při odklonu kola 0°:

Tab. 4 Parametry předního kola při odklonu kola 0°

ET	45	mm
Poloměr rejdu	12,1	mm
Rozchod předních kol	1249,78	mm
Úhel příklonu	8,44	°
Odklon kola	0	°



Obr. 30 Geometrie hlavních souřadnic přední těhlice

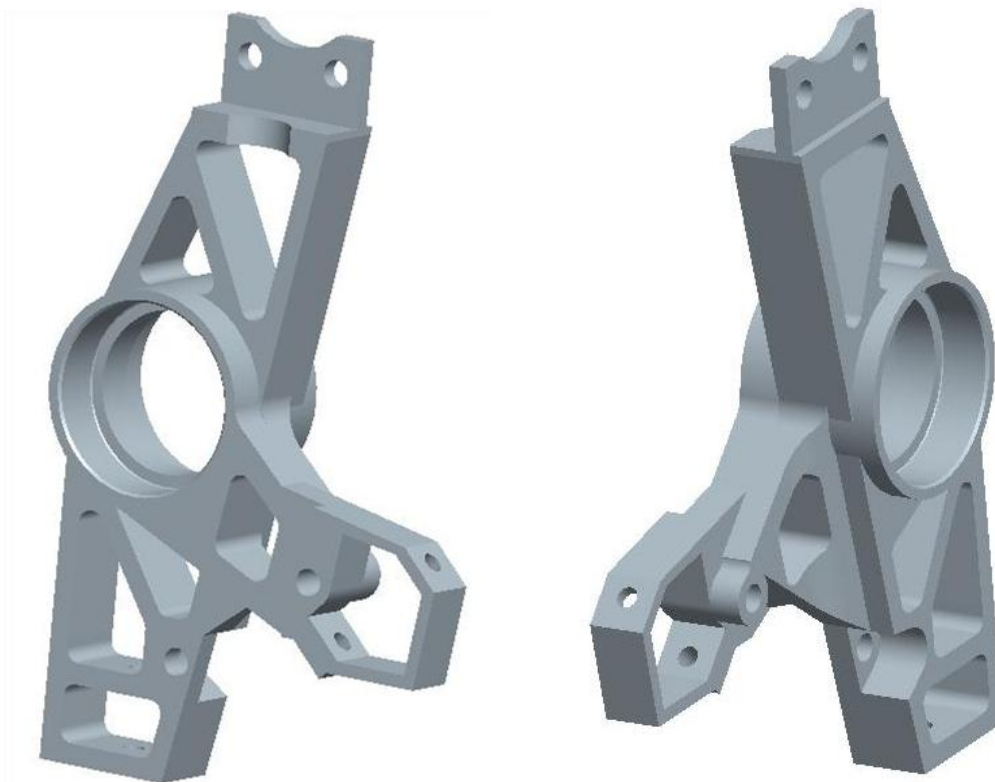


4.1.1 VARIANTY PŘEDNÍ TĚHLICE

Zde budou uvedeny konstrukční varianty přední těhlice Formule Student. Díky těmto návrhům jsem došel ke konečné variantě přední těhlice, která je zobrazena na *obr. 42*.

První varianta

Při modelování první verze jsem se nechal inspirovat těhlicí v diplomové práci [3], u které jsou použita stejná ložiska o průměru vnějšího kroužku 72 mm. První navrženou variantu je možné vidět na *obr. 31*. Hmotnost činí cca 1 kg. U této verze je brzdový třmen umístěn směrem k zadní nápravě vozu a oproti konečné variantě přední těhlice je brzdový třmen upevněn blíže k vozovce, *obr. 32*. Výhodou u takto umístěného brzdového třmenu je poloha těžiště blíže k vozovce, což přispívá k menšímu naklání vozu při jízdě zatáčkou. Další výhodou u tohoto uspořádání je odlehčování ložisek při brzdění, což prodlužuje životnost ložisek.

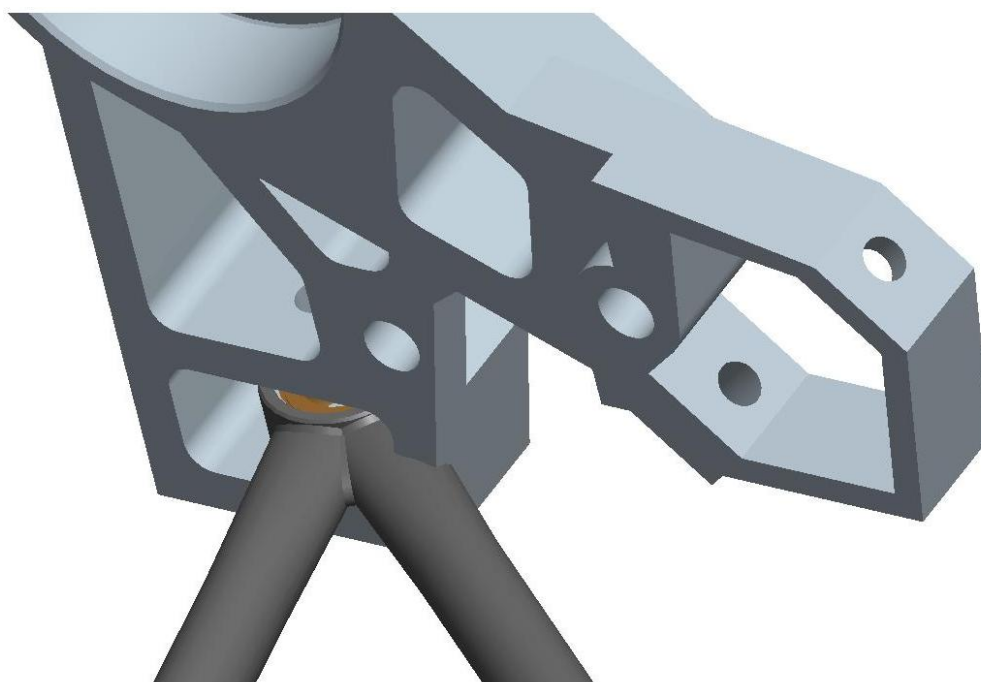


Obr. 31 Přední těhlice – první varianta

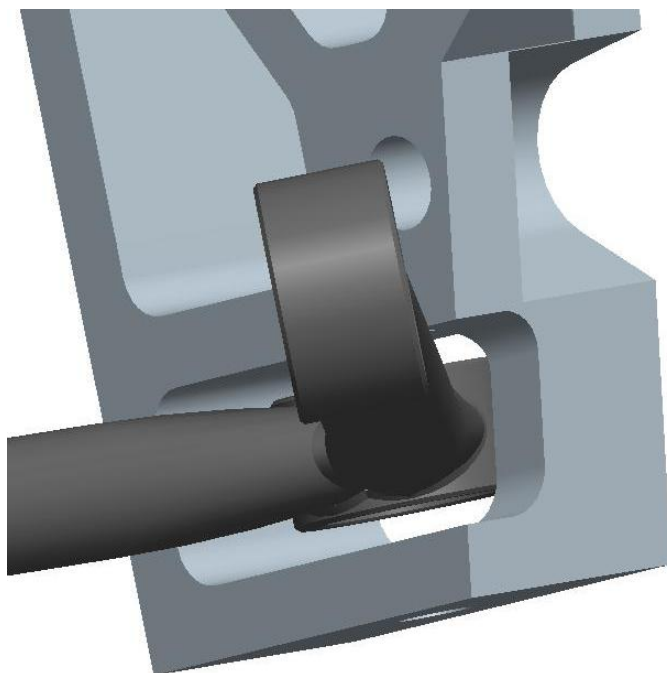


Obr. 32 Přední těhlice s brzdovým třmenem – první varianta

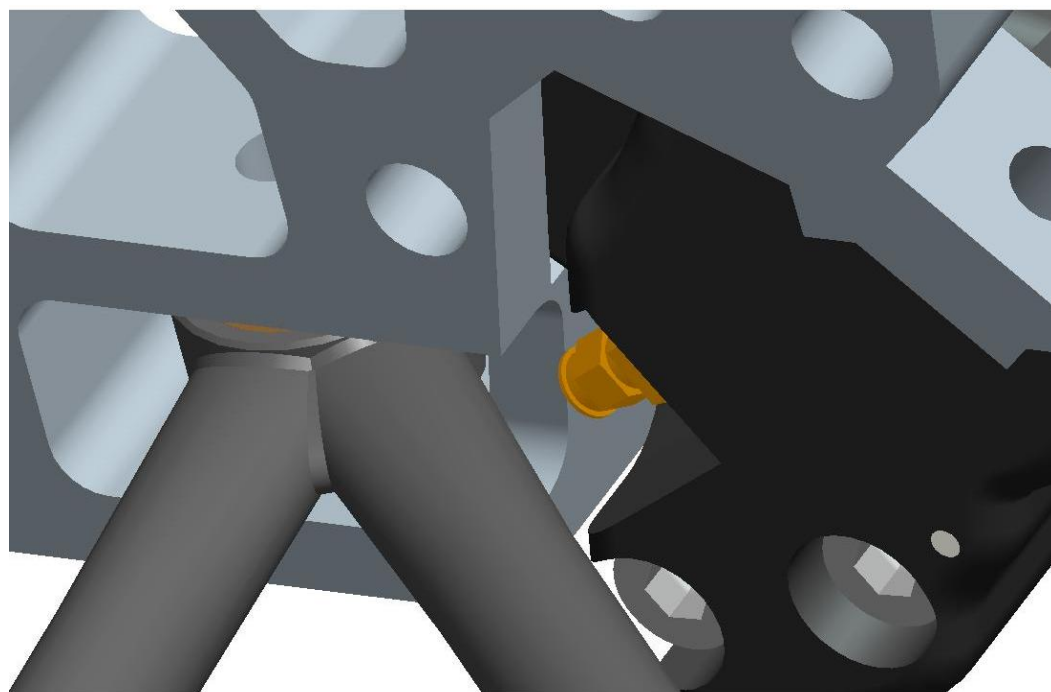
Při modelování se vyskytl problém při natočení kola do pravého rejdu. Při natočení kola dochází ke kolizi dolního ramene nápravy s těhlicí, viz *obr. 33*. Tento problém byl odstraněn výřezem v dolní části těhlice. Tato úprava tvaru je zobrazena na *obr. 34*.



Obr. 33 Kolize dolního ramene nápravy s těhlicí při natočení kola



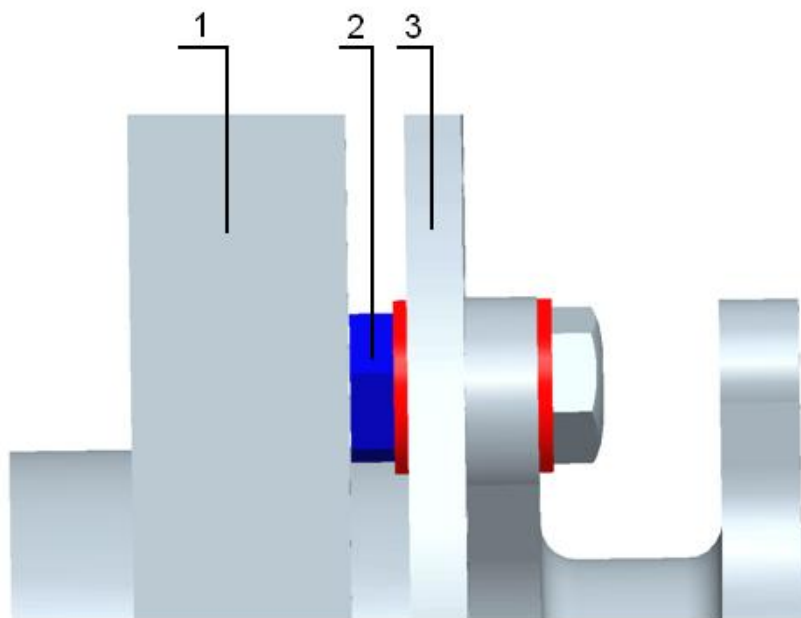
Obr. 34 Úprava těhlice



Obr. 35 Prostorové uspořádání



U první varianty není dostatek prostoru v dolní části náboje kola, viz *obr. 35*. Do prostoru dolního ramene a brzdového třmenu je nutné ještě umístit brzdové potrubí nebo hadičku pro přívod brzdové kapaliny. Dále u první varianty dochází ke kolizi mezi tělesem těhlice a maticí nebo hlavou šroubu od šroubového spojení brzdového kotouče s hřídelí náboje, viz *obr. 36*. Proto jsem vytvořil druhou variantu přední těhlice.



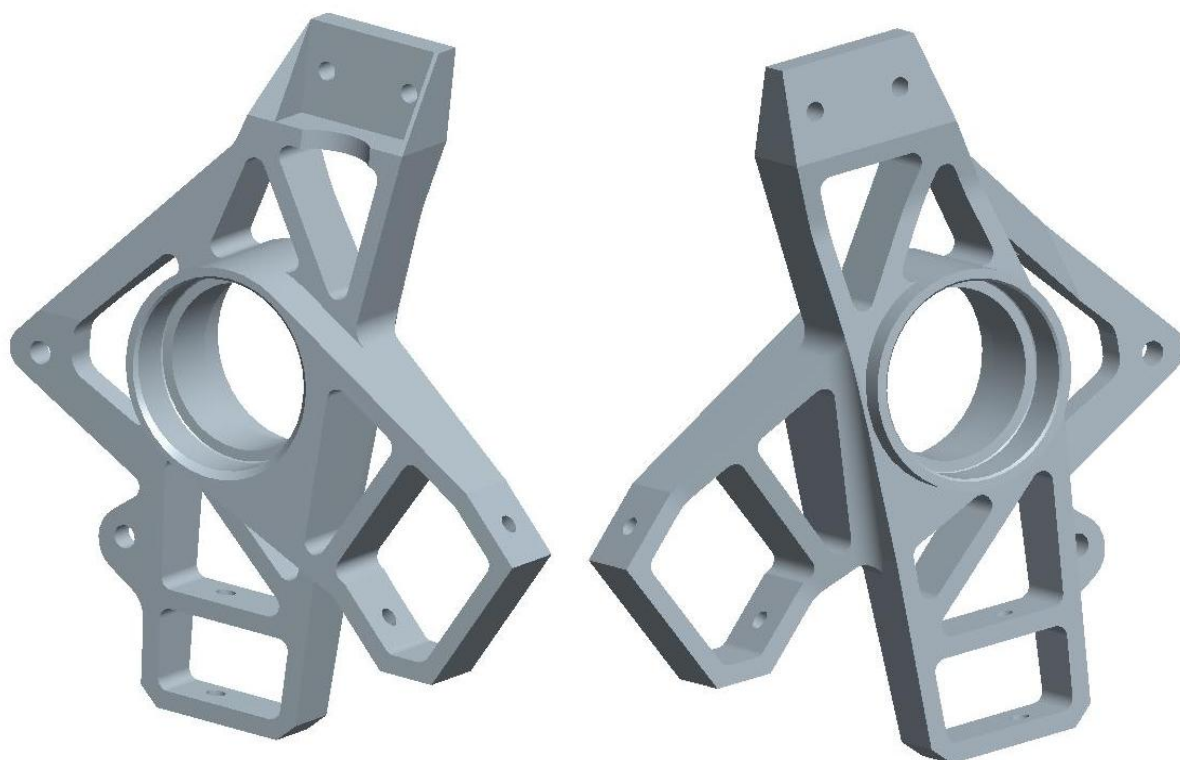
Obr. 36 Kolize matice s tělesem těhlice

Legenda:

- 1 – těleso těhlice
- 2 – matice
- 3 – brzdový kotouč

Druhá varianta

Druhá varianta přední těhlice se od první varianty liší v upevnění brzdového třmenu, který je zde umístěn směrem k přední části vozu, viz *obr. 37 a 38*. Takto umístit brzdový třmen je nevhodné z důvodu výše položeného těžiště sestavy brzdového třmenu a těhlice. Další nevýhodou je vyšší hmotnost náboje kola, která je zvýšena o držák brzdového třmene. V druhé variantě přední těhlice Formule Student je změněna horní část, která slouží k uchycení horního segmentu pomocí něhož bude připevněno horní rameno nápravy. Horní část náboje kola (těhlice) je vyztužena, čímž se sníží ohybové namáhání a napětí materiálu. Jsou zde použita podobná radiální ložiska s kosoúhlým stykem jako u první varianty, jen mají průměr vnějších kroužků 80 mm. Hmotnost druhé varianty těhlice je cca 1,52 kg.



Obr. 37 Přední těhlice – druhá varianta

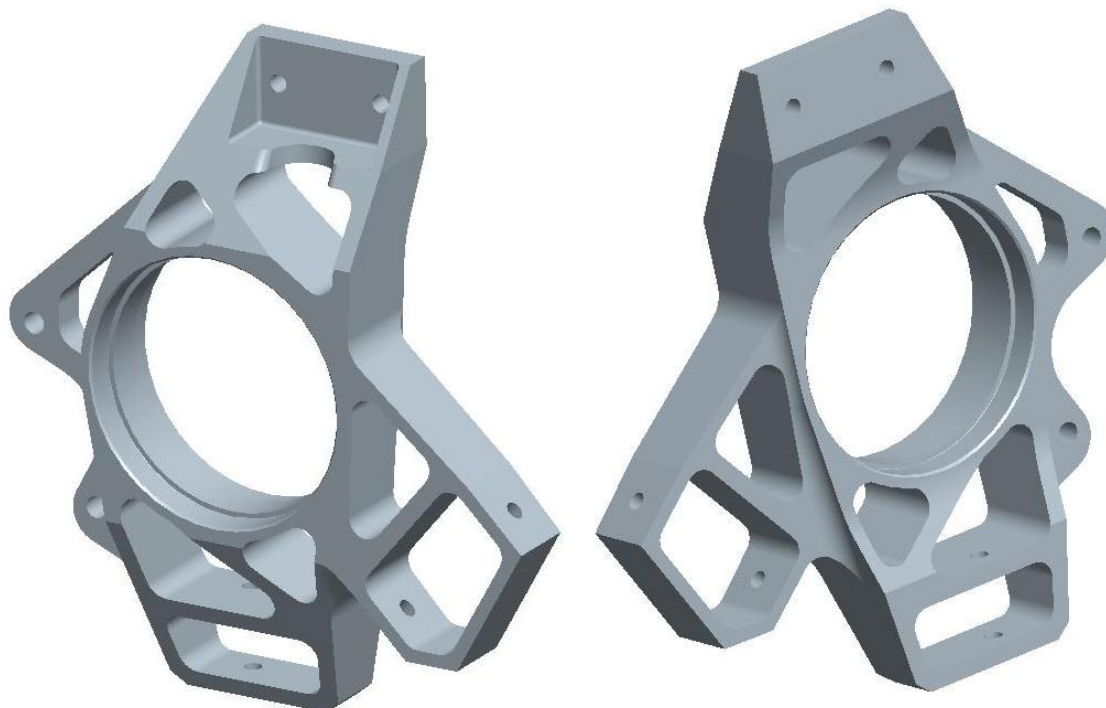


Obr. 38 Přední těhlice s brzdovým třmenem – druhá varianta

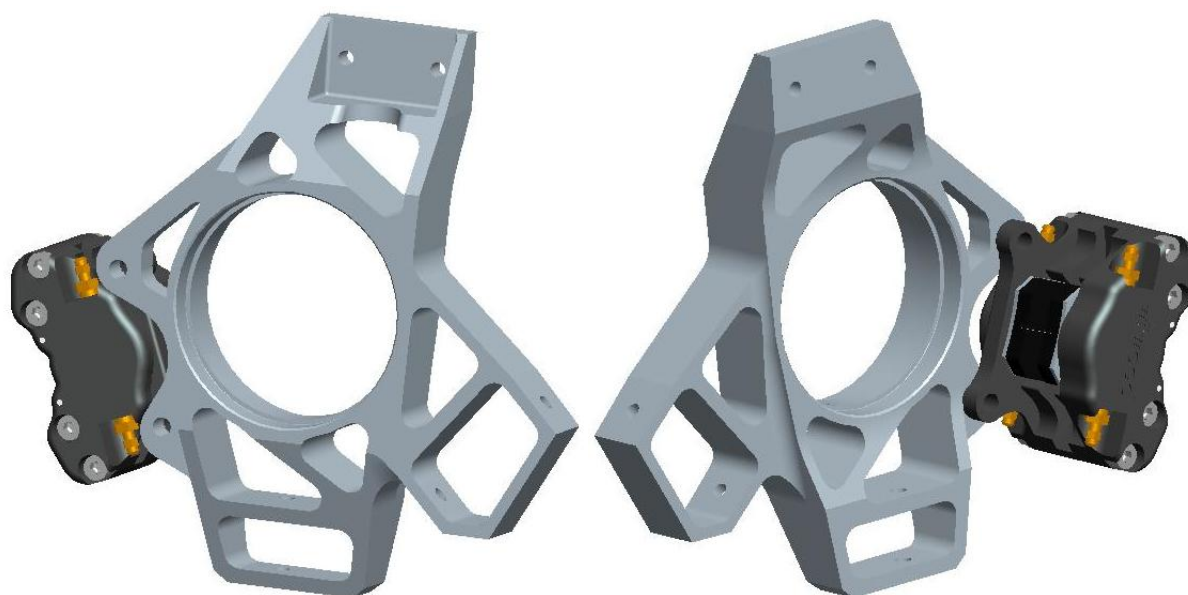


Třetí varianta

Změna třetí varianty, jako předešlých, se odvíjí od volby ložisek. Zde byly vybrány vysoce přesná ložiska SKF, která se liší od předešlých ložisek v první a druhé variantě svým průřezem. Průřez ložiska lze vyjádřit poměrem průměru vnitřního a vnějšího kroužku ložiska. Jsou vybrána vysoce přesná kuličková ložiska s kosoúhlým stykem o průměru vnějšího kroužku 120 mm. 3D model třetí varianty přední těhlice, vážící 1,59 kg, je na *obr. 39 a 40*.



Obr. 39 Přední těhlice – třetí varianta



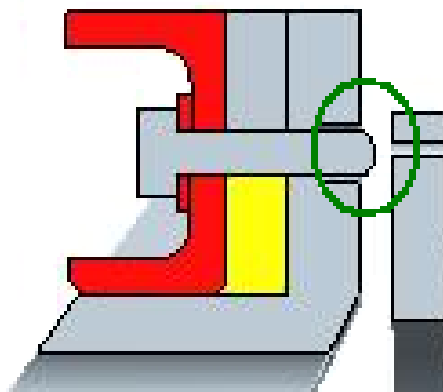
Obr. 40 Přední těhlice s brzdovým třmenem – třetí varianta



4.1.2 KONEČNÁ VARIANTA TĚHLICE

Konečná varianta se od třetí varianty liší výběrem větších ložisek. Větší průměr ložisek jsem zvolil, abych splnil požadavky týmu Formule Student. Jsou použita ložiska o průměru vnějšího kroužku 140 mm, viz. *obr. 22* a *tab. 1*. Zvětšením ložisek se docílí lepšího vedení kola, menšího odporu valivých elementů a kratší vzdálenosti (ramen) od stěny vnějších kroužků ložisek k úchytným bodům. Tímto vznikne menší ohybový moment. Zmenšil se i držák (konzola) brzdového třmene. Dále u konečné varianty přední těhlice jsou změny ve zkosení držáku pro řízení. Stejně jako u třetí varianty přední těhlice má konečná varianta z bočního pohledu tvar „C“. Tento tvar je nutný, protože matice nebo hlava šroubu od šroubového spojení brzdového kotouče s hřídelí náboje nezasahuje do tělesa těhlice oproti první variantě, viz *obr. 36*. Řešením by bylo posunutí brzdového kotouče a třmenu blíže k dosedací ploše disku kola, ale při zachování zálisu kola (ET) by došlo ke kolizi brzdového třmenu s diskem kola.

Těhlice tvoří celek, který přenáší veškeré síly a momenty. Umožňuje spojení s dalšími částmi zavěšení kola. V horní části je uchycen segment dvěma šrouby M8, na kterém je připojeno horní rameno (bod F). Spojení není řešeno šroub – matice, ale pomocí šroubu našroubovaného do pouzdra. Spojení šroub – matice nelze použít z důvodu malého prostoru mezi horní částí těhlice a brzdového kotouče, *obr. 41*.

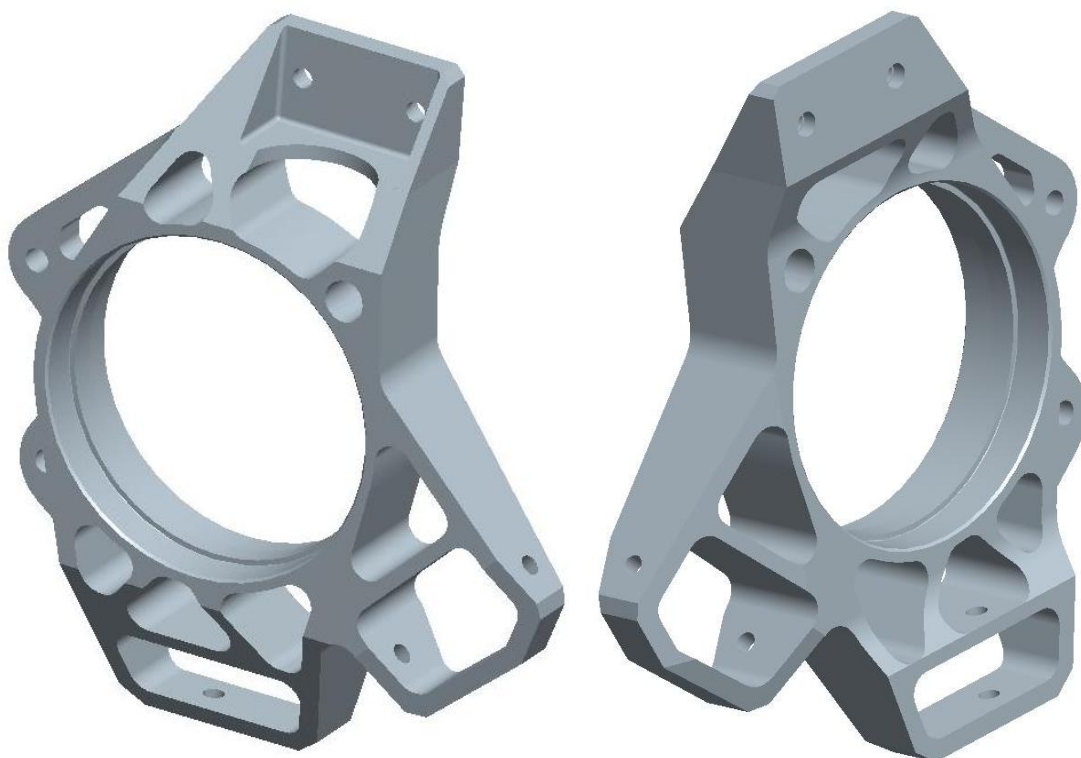


Obr. 41 Prostor mezi těhlicí a brzdovým kotoučem

Ve střední části jsou uložena ložiska a hřídel náboje. Mezi střední a spodní částí těhlice je uchyceno táhlo řízení (bod G). Ve spodní části je uchyceno spodní rameno (bod C) pomocí šroubu. Závit není v materiálu těhlice, protože zajištění uchycení nápravy je řešeno pomocí šroub – matice.

S tělesem těhlice je spojena konzola pro uchycení brzdového třmene, která je tvořena dvěma částmi, kde horní část konzole má odlehčovací otvor a dolní část tvoří pevný celek. Podle výsledků deformačně napětíové analýzy v programu ANSYS bude toto odlehčení upraveno nebo zachováno. Těhlice bude vyrobena pomocí obrábění CNC technologií.

3D model konečné varianty přední těhlice, vážící 1,48 kg, je na *obr. 42* a *43*.



Obr. 42 Konstrukční model hlavního tělesa přední těhlice

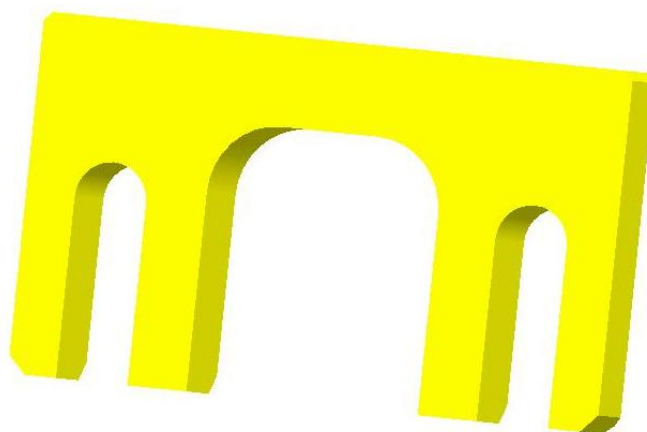


Obr. 43 Přední těhlice s brzdovým třmenem – konečná varianta



4.2 PODLOŽKA PRO NASTAVENÍ ODKLONU KOLA

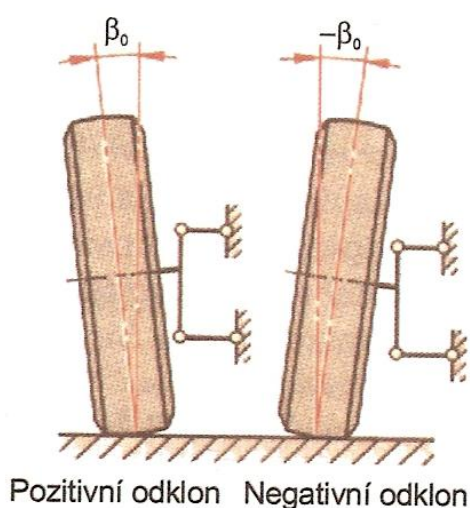
Její hlavním úkolem je plynule nastavovat odklon kola, čehož lze dosáhnout pomocí změny její tloušťky. Princip spočívá ve vložení podložky mezi horní segment a těleso těhlíce. Při změně okamžitého odklonu kola se změni rozchod kol i poloměr rejdu. Podložka je navržena pro snadné vyjímání mírným povolením šroubů. Tyto šrouby M8 upevňují horní segment k tělesu těhlíce. Tato podložka je navržena pro záporný (negativní) odklon kola do max. úhlu odklonu kola 4° . 3D model podložky je na *obr. 44*.



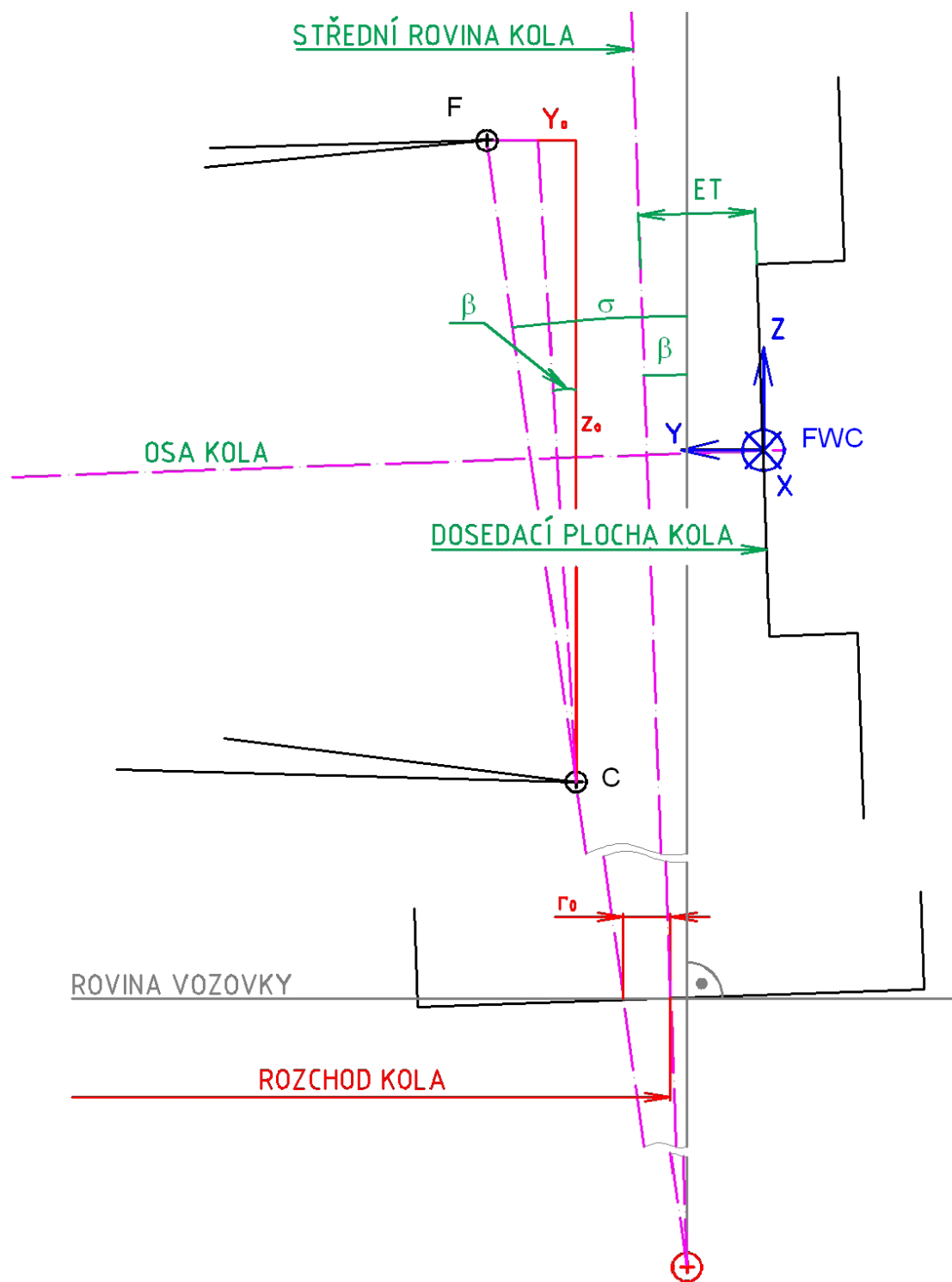
Obr. 44 Model podložky pro 2° odklon předního kola

Odklon kola

Je odklonění kola od svislé osy, může být pozitivní nebo negativní (příklon). Působí ve směru vymezení axiální vůle v ložiscích uložení kola. Vyvolává sílu, která tlačí kolo do uložení. Snižuje tak namáhání ložisek a šroubů upevnění kola. Pozitivní odklon zlepšuje jízdní vlastnosti, především směrovou stabilitu vozidla. Negativní odklon zlepšuje boční vedení při jízdě zatáčkou, ale zvyšuje opotřebení vnitřní plochy běhounu pneumatiky.



Obr. 45 Odklon kola [1]



Obr. 46 Geometrie odklonu předního kola



Z obr. 46 lze jednoduchým goniometrickým výpočtem stanovit hodnotu Y_0 . Tato hodnota v našem případě znamená o jakou vzdálenost se musí těhlice posunout (natočit), aby měla daný odklon kola. Na přední těhlici bude možnost nastavovat okamžitý záporný odklon kola do 4° . Souřadnice Y_0 bude odpovídat posunutí vzdálenosti:

$$\tan \beta_0 = \frac{Y_0}{Z_0} \Rightarrow Y_0 = \tan \beta_0 \cdot Z_0 = \tan 4^\circ \cdot 249,3 = 17,43 \text{ mm} \quad (1)$$

Tato vypočítaná hodnota odpovídá vzdálenosti mezi horním segmentem a dosedací plochou v horní části přední těhlice. Pro stanovení záporného odklonu předního kola $\beta_1 = 2^\circ$, bude výpočet vypadat následovně:

$$\tan \beta_1 = \frac{Y_1}{Z_0} \Rightarrow Y_1 = \tan \beta_1 \cdot Z_0 = \tan 2^\circ \cdot 249,3 = 8,7 \text{ mm} \quad (2)$$

β - úhel odklonu kola

σ - příklon rejdové osy

Z_0 - vzdálenost mezi bodem F a C ve směru osy Z, která činí 249,3 mm, viz. tab. 3.

Nyní lze stanovit podložku odpovídající danému odklonu kola. Pro záporný odklon kola 4° nebude potřeba žádné podložky, horní segment dosedne na dosedací plochu přední těhlice. Pro 2° záporný odklon kola bude potřeba vložení podložky tloušťky 8,73 mm dle vzorce (3), tato hodnota vyplývá z vypočítané délky o posunutí Y_1 dle vzorce č. 3.

$$t_{\text{ODKLONU PŘEDNÍHO KOLA}} = Y_0 - Y_1 = 17,43 - 8,7 = 8,73 \text{ mm} \quad (3)$$

Pro změnu odklonu kola po 1° se použije podložka tloušťky 4,36 mm, která má hmotnost 0,01 kg.

Souřadnice hlavních bodů přední těhlice při záporném odklonu kola 2° :

Tab. 5 Souřadnice hlavních bodů přední těhlice při odklonu kola 2°

Název bodu	Body	Souřadnice		
		x [mm]	y [mm]	z [mm]
Počátek souřadného systému	FWC	0	0	0
Dolní rameno	C	10	76,1	-125,8
Řízení	G	-108,81	104	-61,09
Horní rameno	F	-30	102,27	123,5

Parametry předního kola při záporném odklonu kola 2° :

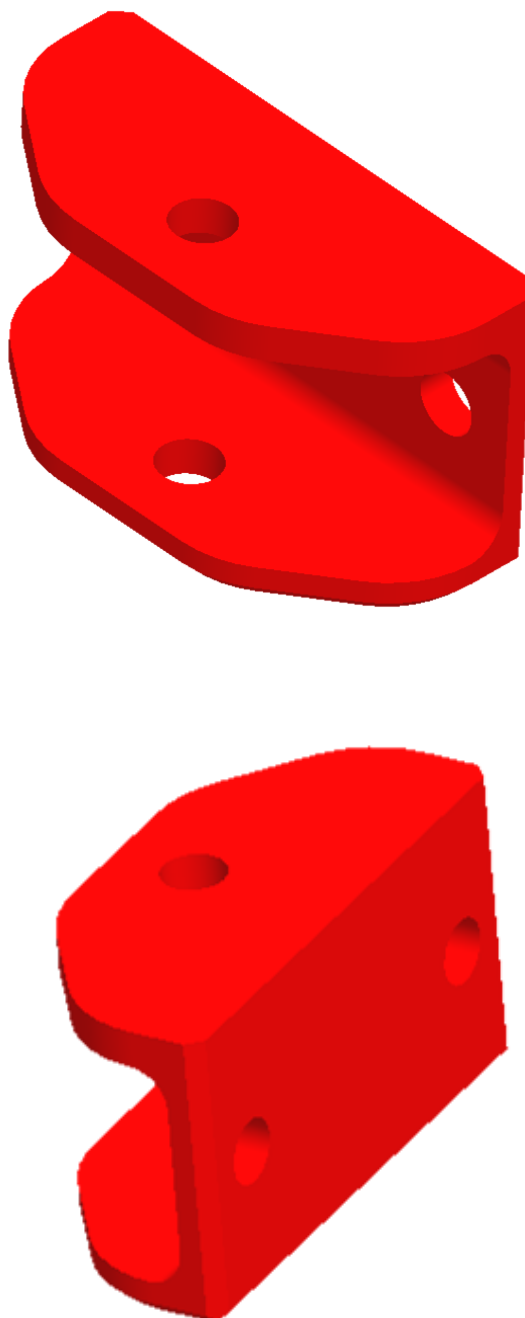
Tab. 6 Parametry předního kola při odklonu kola 2°

ET	45	mm
Poloměr rejdů	17,78	mm
Rozchod předních kol	1260,42	mm
Úhel příklonu	7,98	°
Odklon kola	2	°



4.3 HORNÍ SEGMENT TĚHLICE

Tento segment umožňuje uchycení horního ramene nápravy. Z předchozích výpočtů vyplývá, že se horní segment přední těhlice musí konstrukčně zpracovat na odpovídající hodnoty, dle vzorce č. 1, nebo se musí upravit horní část přední těhlice, na kterou je nasazen a pomocí šroubového spojení upevněn. Mezi horním segmentem, který váží 0,08 kg a těhlicí je podložka pro nastavení odklonu kola (**kap. 4.2**). Jeho zobrazení 3D modelu je na *obr. 47*.



Obr. 47 Horní segment přední těhlice



4.4 HŘÍDEL NÁBOJE

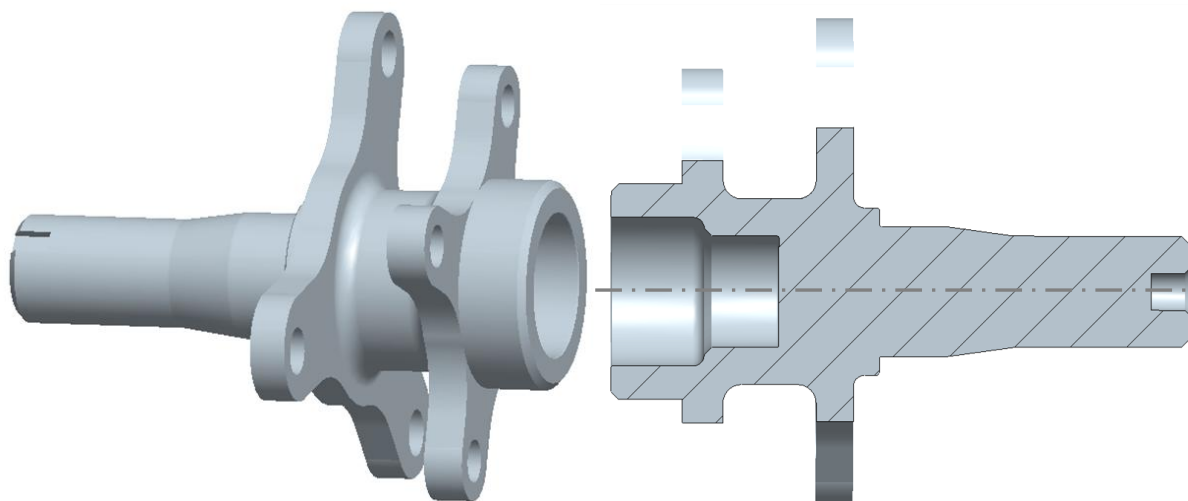
Tato součást slouží k přichycení kola pomocí šroubů, které zajistí spolu s nákrůžkem na náboji vystředění kola. Dále je k hřídeli náboje přišroubován nebo jiným způsobem uchycen brzdový kotouč. V tomto případě je montáž brzdového kotouče realizována šroubovým spojením. Hřídel náboje je umístěn v ložiscích a jejich poloha je zajištěna pomocí korunové matice se zářezy a pojistné podložky, které se našroubují na závit, který je zhotoven na konci hřídele. Korunová matice a pojistná podložka se navrhnu a budou vyráběny. Pro jednoduchost a kompaktnost bude uložení přední a zadní těhlice stejné a z hlediska výroby uložení ložisek a montáže i výhodnější. Na 3D modelech, *obr. 48 až 50*, není vyobrazen metrický závit a drážka vnějšího metrického závitu.

4.4.1 VARIANTY HŘÍDELE NÁBOJE

Zde budou uvedeny konstrukční varianty hřídele náboje. U každé varianty je konzola (držák) brzdového kotouče, která je tvořena třemi úchyty (rameny) a držák kola, který je tvořen čtyřmi úchyty, kromě konečné varianty hřídele náboje. Postupným zpracováním byla navržena konečná verze hřídele náboje.

První varianta

U této varianty jsou navržena dvě ložiska o rozdílném průměru vnitřního kroužku. Průměr vnitřních kroužků ložisek je 30 mm a 35 mm. První varianta hřídele náboje má hmotnost 0,6 kg.

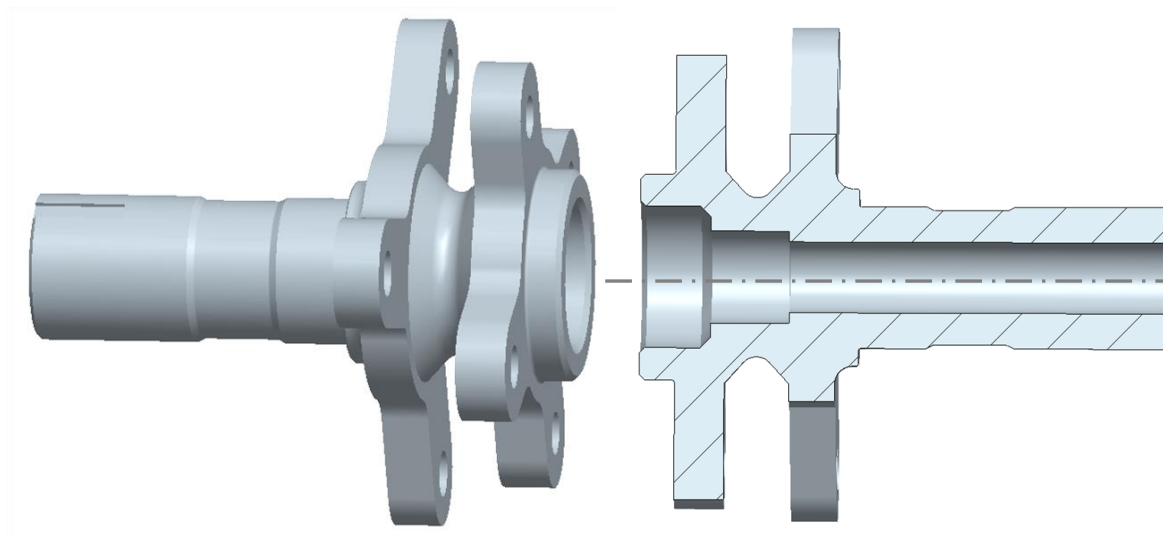


Obr. 48 Hřídel náboje – první varianta



Druhá varianta

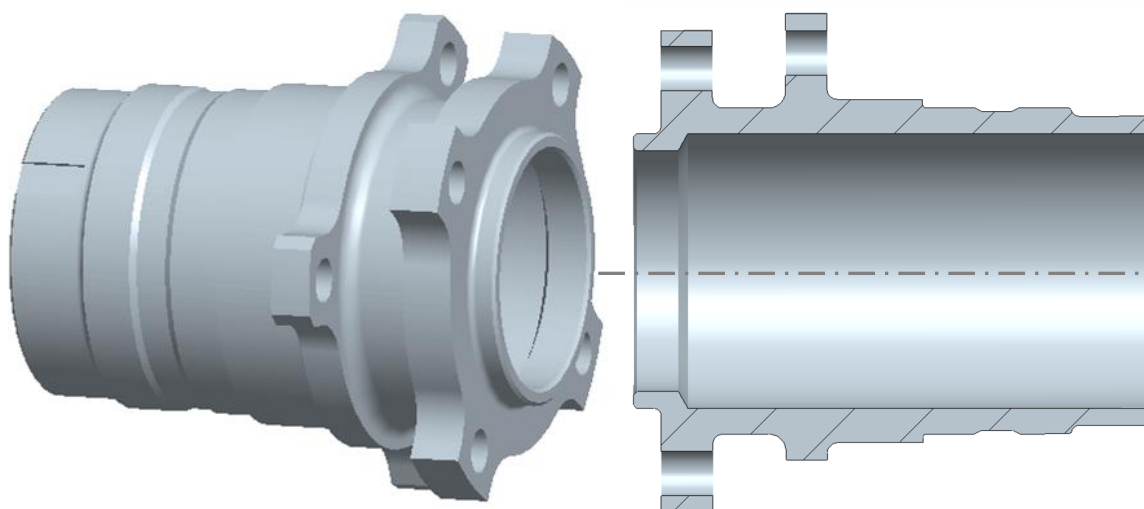
V druhé variantě jsou použita dvě ložiska se stejným průměrem vnitřního kroužku. Při porovnání s první variantou hřídele náboje je vidět, že je zde otvor skrz celé těleso. Hmotnost u této varianty je 0,8 kg. Mezi konzolou brzdového kotouče a konzolou (držákem) kola je zaoblení oproti první variantě, čímž se zvýší hmotnost, ale sníží se namáhání na krut. 3D model je na *obr. 49*.



Obr. 49 Hřídel náboje – druhá varianta

Třetí varianta

U třetí varianty jsou použity dvě ložiska o průměru vnitřního kroužku 95 mm. U konzoly brzdového kotouče se zmenšila vzdálenost ramen. Hmotnost činí 1,12 kg. Zde nákrůžek na disk kola je mnohem větší než u předešlých variant.

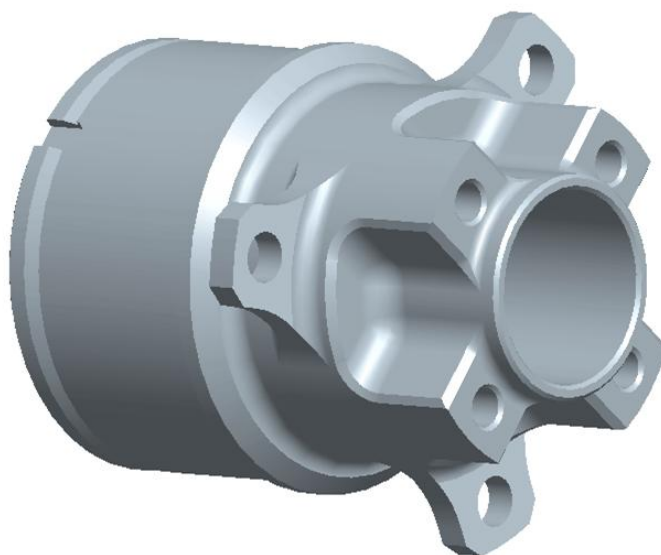


Obr. 50 Hřídel náboje – třetí varianta

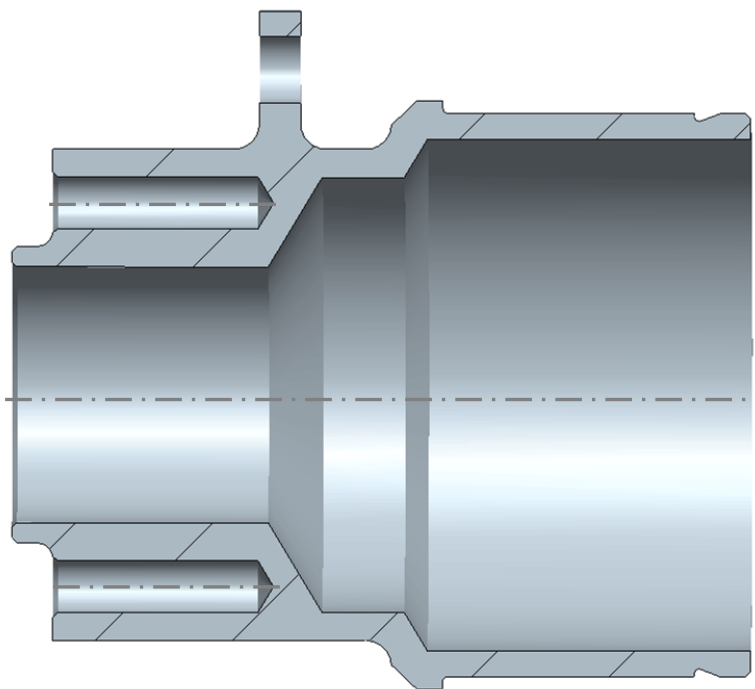


Konečná varianta

U konečné varianty jsou použita dvě ložiska o průměru vnitřního kroužku 110 mm, viz. *obr. 22 a tab. 1*. Hmotnost hřídele náboje je cca 0,97 kg, což je o trochu méně než u třetí varianty. Na 3D modelech, *obr. 51 a 52*, nejsou vyhotoveny závity pro šrouby, které upevňují disk kola. V porovnání se třetí variantou hřídele náboje není u konečné verze odebrán materiál mezi ložisky. Ucelená plocha z důvodu výroby a broušení ploch pod ložisky je výhodnější.



Obr. 51 Hřídel náboje přední těhlice

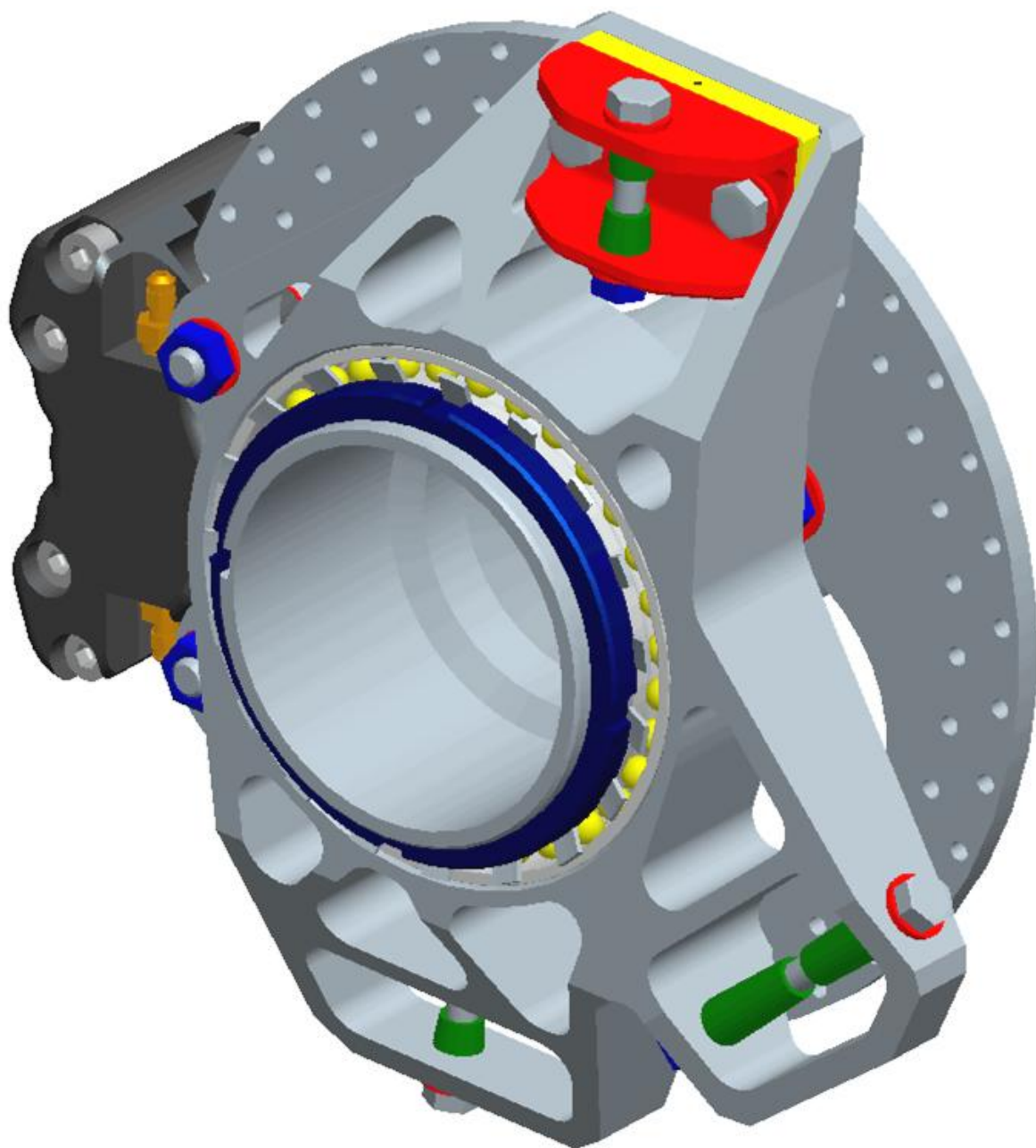


Obr. 52 Řez hřídele náboje přední těhlice



5 SESTAVA PŘEDNÍ TĚHLICE

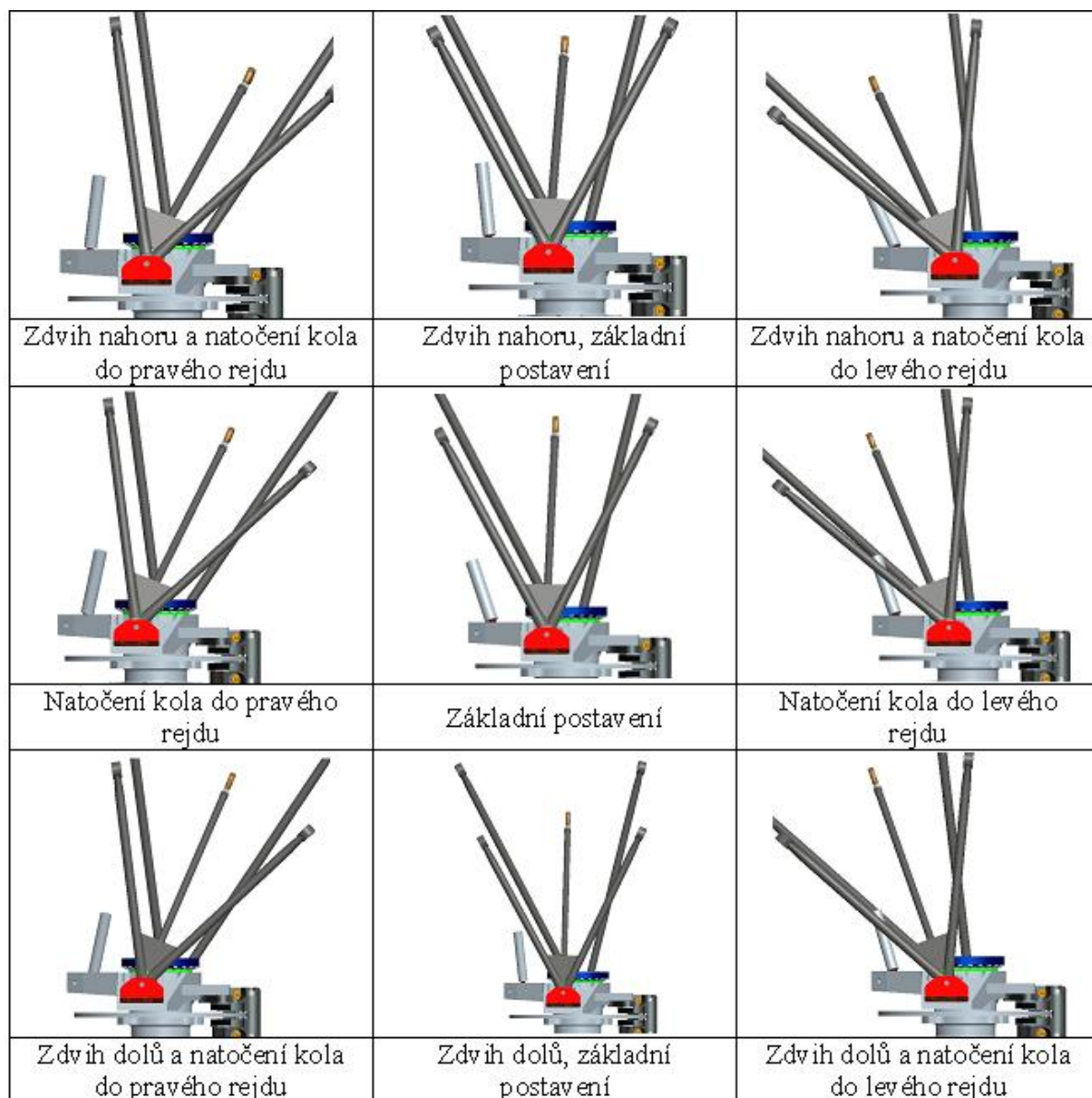
Sestava přední těhlice s hlavními prvky, které jsou podstatné při konstrukci samotné těhlice je na *obr. 53*. Na *obr. 54* je ukázáno rozložené prostorové uspořádání přední těhlice, která lépe vystihuje prvky sestavy.



Obr. 53 Sestava přední těhlice s hlavními prvky

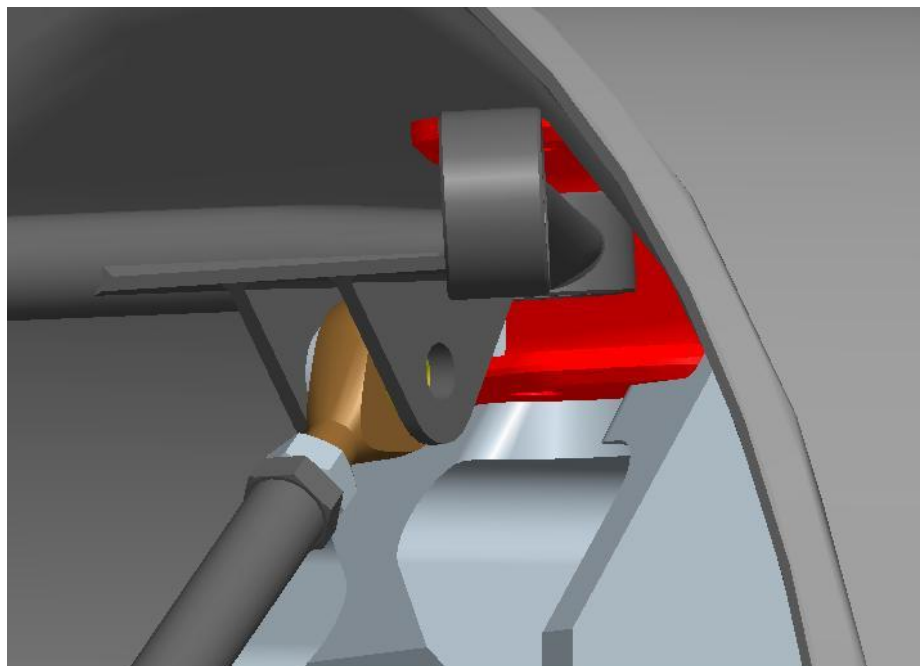


V programu Pro/ENGINEER byly všechny možné pozice sestaveny a následně se vizuálně zkontrolovala a případně odstranila kolize mezi jednotlivými komponenty.

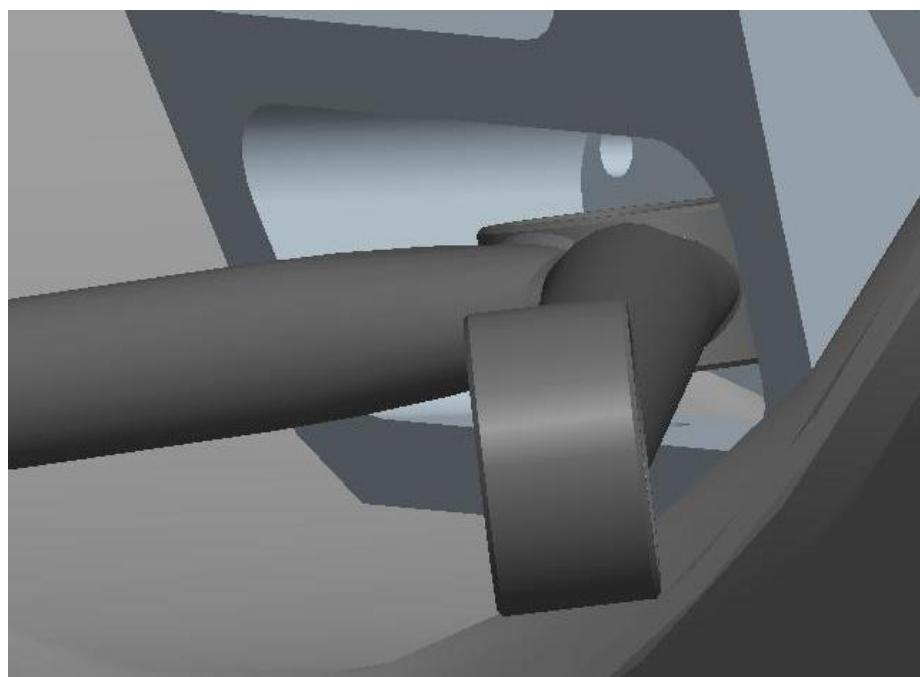


Obr. 55 Vzájemné postavení těhlice, ramen nápravy a tyče řízení

Při objednávání disků kol na Formuli Student bylo nutné zjistit, jakou šířku disků zvolit, aby nedošlo ke kolizi. Čím širší disk kola, tím stabilnější jízda v zatáčkách. Sestavením ramen nápravy s diskem kola o různé šířce bylo možné vidět případnou kolizi. Na obr. 56 je použit disk kola o šířce 7'' při zdvihu kola směrem dolů a při natočení kola o 26° do pravého rejdu. Na obr. 57 je použit stejný disk kola při zdvihu kola směrem nahoru při stejném natočení kola. V případě použití disku kola o šířce 7,5'' dochází ke kolizi s horním ramenem nápravy.



Obr. 56 Prostor mezi diskem kola šířky 7'' a horním ramenem nápravy



Obr. 57 Prostor mezi diskem kola šířky 7'' a dolním ramenem nápravy



5.2 ZAČLENĚNÍ SESTAVY KOLA DO SESTAVY FORMULOVÉHO VOZU

Na Formuli Student pracoval náš studentský tým po celý rok, kde se navrhly všechny konstrukční celky a jednotlivé součásti, které tvoří sestavu formulového vozu. Na následujícím obrázku je vyobrazena sestava vozu Formule Student.




Obr. 58 Sestava vozu Formule Student



6 VYTVOŘENÍ VÝROBNÍCH VÝKRESŮ Z 3D MODELŮ

V této práci jsou navrženy 3D modely podle nichž se daná součást vyrobí. K výrobě je zapotřebí alespoň nekompletní technický výkres (náčrt) v případě, že se vytvoří program z 3D modelu ve formátu např. IGES. Aby bylo možné zpracovat výkresovou dokumentaci (náčrt s tolerancemi a hlavními rozměry) těchto součástí, bylo nezbytné převést prostorové modely na rovinné, viz Příloha 5. Tento převod se skládá z určitých kroků, které byly provedeny v programu Pro/ENGINEER. Tyto kroky budou uvedeny níže, podobně jako v [2].

6.1 POSTUP PŘEVODU Z 3D MODELU NA 2D VÝKRES

- otevřít model
- file - new - drawing – uložit pod určitým názvem a potvrdit OK
- empty - landspace – vybrat velikost formátu a potvrdit stiskem na tlačítko OK
- create a general view , potvrzením funkce tlačítka se klikne do pracovního prostoru a objeví se tvar dané součásti
- objeví se tabulka, v kategorii vybrat View Display a zvolit možnosti zobrazení hran, potvrdit OK
- přidržením pravého tlačítka na daném modelu se vygeneruje tabulka, kde lze měnit např. pohledy součásti nebo se podívat do vlastnostech (properties)

6.2 TVORBA POHLEDU

- označit součást - pravé tlačítko – insert projection view – poté podle posunu myši ve kvadrantech je možné vybrat požadovaný pohled, např. pohled zepředu, shora, zprava, atd.

Ukládání souboru

„Takto provedené činnosti je potřeba uložit, aby bylo možné se k souboru opětovně vrátit a pracovat s ním. Soubory se ukládají ve formátu (*.dwg), protože s takto vytvořeným souborem je možné pracovat v programu AutoCAD.“ [2]



7 SÍLY PŮSOBÍCÍ NA TĚHLICI A POUŽÍVANÉ JÍZDNÍ STAVY

7.1 SÍLY PŮSOBÍCÍ NA TĚHLICI

Při jízdě po vozovce vznikají síly a momenty, které působí na ramena náprav a na rám vozu. V případě přední nepoháněné, řízené nápravy jsou to boční síly, zajišťující říditelnost, síla tíhová od vlastní hmotnosti vozu, brzdná (podélná) síla. Dále pak řídicí síly, rázy od nerovností vozovky apod. *Obr. 59* ukazuje směry vektorů těchto sil.

- 1 – brzdná síla
- 2 – boční síla
- 3 – tíhová síla



Obr. 59 Síly působící na automobilové kolo [2]

7.2 JÍZDNÍ STAVY POUŽÍVANÉ PŘI VÝPOČTOVÉ KONTROLE SOUČÁSTÍ

Při provozu vozidel vznikají jízdní stavy, které mají rozdílné velikosti a směry vektorů sil působících na těhlici. Z těchto jízdních stavů byly vybrány jízdní stavy, které mají nejhorší jízdní vlastnosti. Aby bylo možné zjistit tyto jízdní stavy, bylo nutné určit polohu bodu, ve kterém působí jednotlivé síly. Tento bod se nachází ve středu styku pneumatiky s vozovkou, tzn. ve vzdálenosti rozchodu kola, který má hodnotu 1260,42 mm. Těmi jsou:

- přejezd nerovnosti
- vozovka s výmoly
- prudké brzdění
- prudká akcelerace



7.3 SÍLY V KLOUBECH ZAVĚŠENÍ PŘEDNÍ TĚHLICE

Zde jsou hodnoty sil působící v jednotlivých bodech uchycení, viz [3]:

C – bod uchycení dolního ramene nápravy k těhlici

G – bod uchycení tyče řízení k těhlici

F – bod uchycení horního ramene nápravy k těhlici

Brzdná síla $F = 9300 \text{ N}$ se dělí na dva šrouby. Tato síla působí ve směru otáčení brzdového kotouče tzn. směr tečny.

Tab. 7 Síly v jednotlivých bodech upevnění

přejezd nerovnosti	F_x [N]	F_y [N]	F_z [N]	Výslednice F [N]
C dolní rameno	4	1233	42	1233,722
G tyč řízení	-111	-254	7	277,283
F horní rameno	-106	660	-28	669,044

vozovka s výmoly	F_x [N]	F_y [N]	F_z [N]	Výslednice F [N]
C dolní rameno	-14	1771	400	1815,664
G tyč řízení	-139	-320	-22	349,578
F horní rameno	-102	802	64	810,990

prudké brzdění	F_x [N]	F_y [N]	F_z [N]	Výslednice F [N]
C dolní rameno	1543	161	-158	1559,402
G tyč řízení	82	188	-5	205,166
F horní rameno	610	334	23	695,834

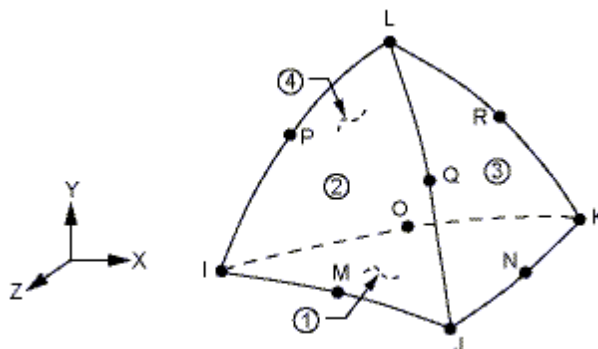
prudká akcelerace	F_x [N]	F_y [N]	F_z [N]	Výslednice F [N]
C dolní rameno	3	663	23	663,406
G tyč řízení	-65	-149	4	162,610
F horní rameno	-62	448	-19	452,669

Největší zatížení představuje jízdní stav „vozovka s výmoly“. Výslednice sil v úchytných bodech tohoto jízdního stavu jsou vyobrazeny červeně. Zjištěním sil působících na kolo bylo možné určit síly, které se přenáší na těhlici. Nejvyšší naměřené hodnoty sil působících na přední těhlici, které byly odečteny z grafů vytvořených multibody systémem ADAMS při těchto jízdních stavech, je možno použít jako zátěžné účinky pro MKP analýzu těhlic.



8 ANALÝZA MODELU TĚLES POMOCÍ MKP

Ze zátěžných sil působících v úchytných bodech těhlice vozidla mohou začít analyzovat navržené modely metodou konečných prvků v programu ANSYS. Nejdříve spočítám analýzu horního segmentu těhlice a poté těleso těhlice. Základním použitým prvkem pro konečnoprvkovou síť modelu horních segmentů a těhlic je použit SOLID 92, který má kvadraticky posunuté reagování a je vhodný k modelování neregulerních sítí, jako jsou produkty z různých CAD/CAM systémů. Jedná se o prvek definovaný 10-ti uzly, které mají tři stupně volnosti na každém uzlu.



Obr.60 Tvar prvku SOLID 92 [21]

Důležitým faktorem při analýze horního segmentu těhlice a těhlice je koncentrace napětí, nebo-li maximální hodnota redukovaného napětí. Přestože jsou součástí únavově namáhané, budou hodnotit maximální zatížení pro statické posouzení dle koeficientu bezpečnosti (4), kde σ_k ($R_{p0,2}$) je mez kluzu materiálu a σ_{redMAX} je maximální redukované napětí, které nastalo při zvolené podmínce. Výsledkem analýz jsou isoplochy redukovaného napětí dle podmínky von – Mises, nebo také HMM.

„Redukované napětí σ_{red} jsou stanovena v soulase s kritérii definující pevnost elementu materiálu při kombinovaném namáhání. Redukované napětí σ_{red} je v podstatě jednoosá tahová napjatost elementu materiálu, který odpovídá pevnostně témuž elementu při kombinovaném namáhání. Existuje několik teorií např. teorie maximálního poměrného prodloužení (Saint – Venant), ale v našem případě vycházíme z teorie potenciální energie na změnu tvaru (Huber-Mises-Hencky – HMM) nebo-li **von Mises stress**.“[3]

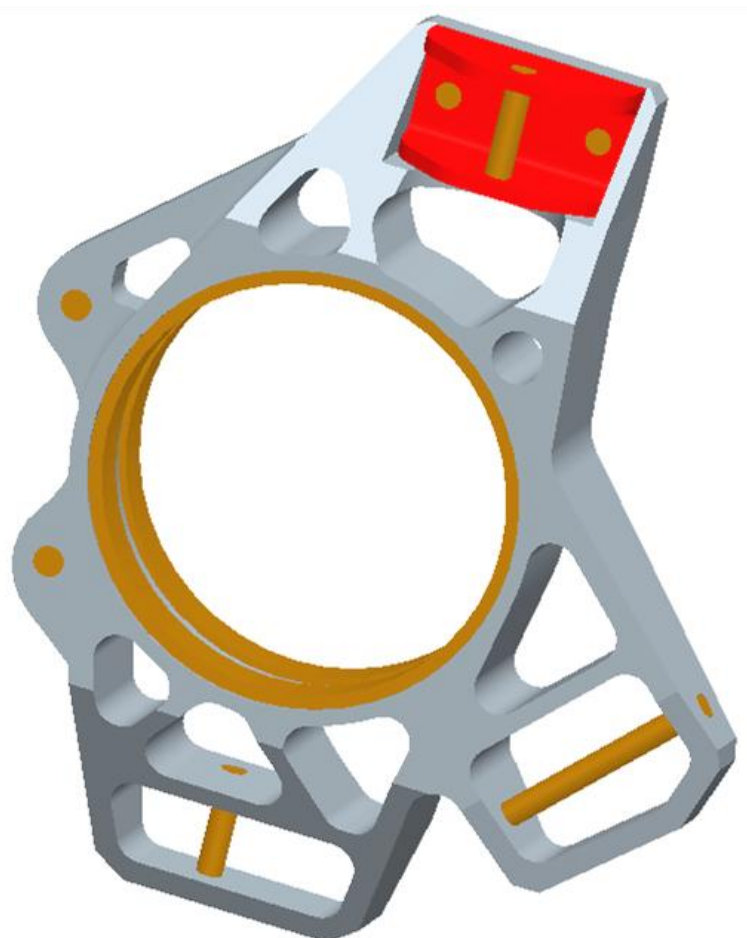
$$k_k = \frac{\sigma_k}{\sigma_{redMAX}} \quad (4)$$



8.1 ZADÁNÍ OKRAJOVÝCH PODMÍNEK A ZÁTĚŽNÝCH SIL

Důležitým krokem pro výpočet napjatosti a deformace metodou konečných prvků bylo upevnění modelu v prostoru tak, aby nemohlo dojít k jeho samovolnému pohybu. Kdyby nebylo těleso upevněno, výpočet by nemohl proběhnout. Musí dojít ke správnému nahrazení vazeb a zvolení vhodných elementů pro zadání okrajových podmínek. Nahrazení vazeb spočívá v nahrazení sférické vazby v úchytných bodech C, F, G. Čepy (šrouby), které nahrazují sférické vazby jsou připevněny k tělesu těhlice a horního segmentu pomocí funkce GLUE (lepidlo) v programu ANSYS. Stejným způsobem jsou připevněny vnější kroužky ložisek ve střední části přední těhlice a šrouby upevňující brzdový třmen. Takto zvolený způsob výpočtu pomocí MKP lépe realizuje skutečnost, kdy se jednotlivé prvky nápravy připevňují šrouby. Dále je lépe vystižena reálná situace, kde těhlice a horní segment jsou z jiného materiálu než kroužky ložisek a čepy. Objemy čepů (šroubů) byly rozděleny pomocí tzv. pracovní roviny ve zvoleném systému MKP tak, aby vznikl bod na ose čepu. V těchto vzniklých bodech se realizovalo zatížení v konkrétních jízdních stavech. Zvolený způsob je použit v samotné analýze následujícího řešení.

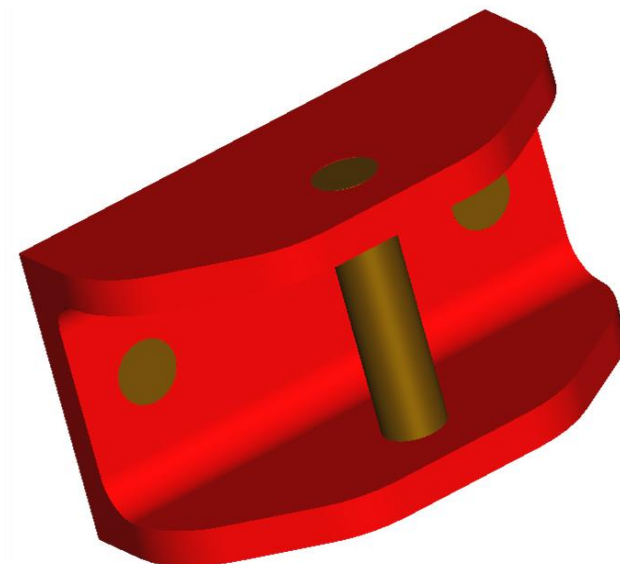
Pro napěťovou analýzu jsem si připravil sestavu v programu Pro/ENGINEER, ve které jsou sestaveny čepy, horní segment těhlice a vnější kroužky ložisek s těhlicí, *obr. 61*. Možné je i řešení, kdy se čepy a kroužky vytvoří v samotném programu ANSYS.



Obr. 61 Sestava pro analýzu těhlice v programu ANSYS

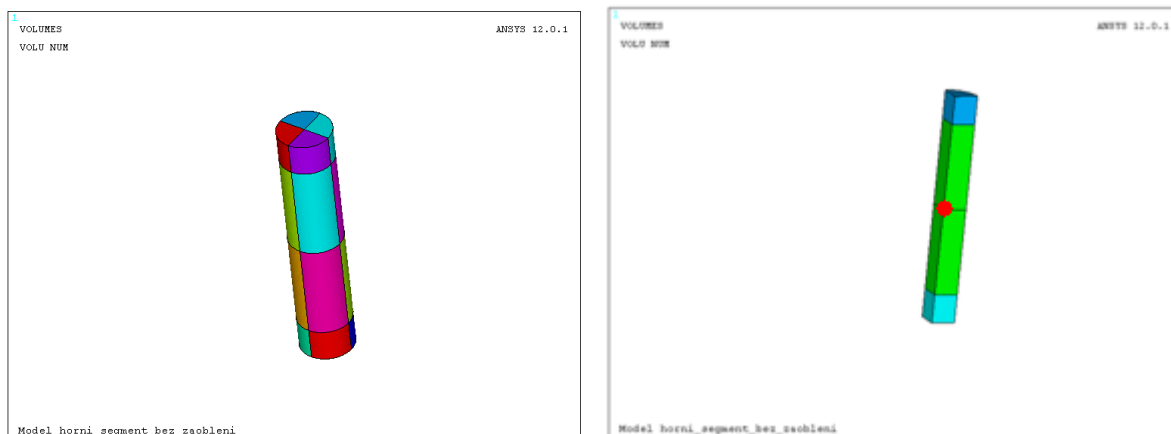


Síly, přenášené do horního ramene nápravy, jsou skrz horní segment těhlice přenášeny na těleso těhlice. Pro zadání silových podmínek horního segmentu těhlice se zvolil způsob, kdy se vytvořila sestava horního segmentu těhlice s čepem nahrazující šroubové spojení a čepem (šroubem), který slouží k uchycení horního ramene nápravy, *obr. 62*.



Obr. 62 Sestava pro analýzu horního segmentu těhlice

Čep (šroub) se připevnil k hornímu segmentu pomocí funkce GLUE a následně se rozdělil do 16-ti objemů, *obr. 63*. Tímto rozdělením vznikl bod na ose šroubu (označen červeně), nebo-li bod F, ve kterém se aplikovalo zatížení v jízdních stavech, viz. *Tab. 7*.

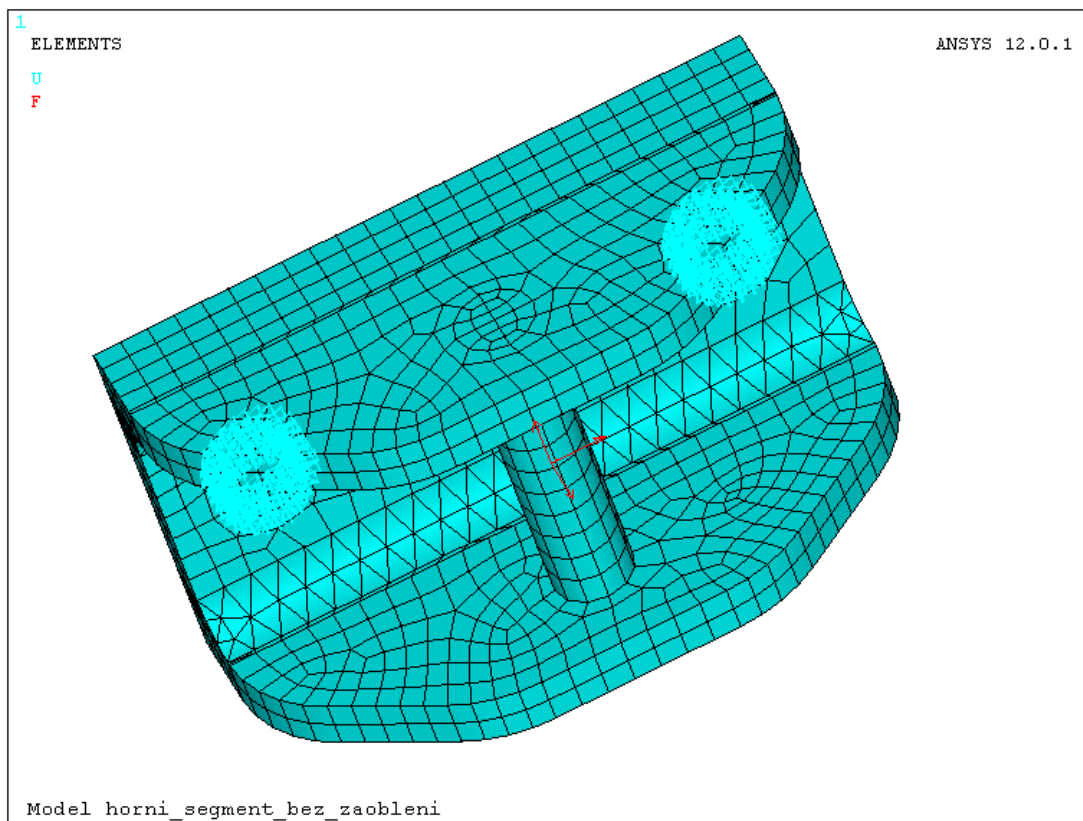


Obr. 63 Tvorba klíčového bodu pro aplikaci zátěžných sil

Vazbové podmínky se realizovaly v místech, kde prochází šroub horním segmentem a tělesem těhlice, kde se čep (šroub) slepil se segmentem pomocí funkce GLUE.

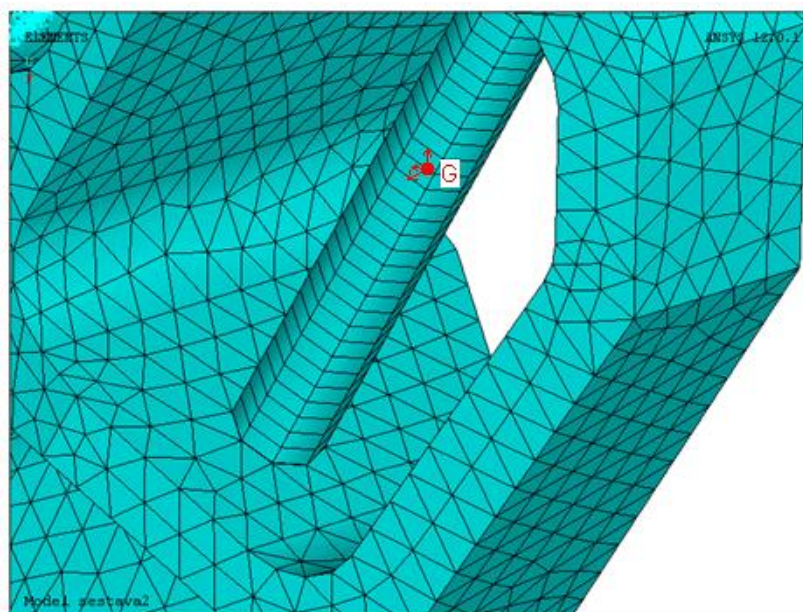


Aplikování zátěžných sil na horní segment těhlice



Obr. 64 Zadání okrajových podmínek horního segmentu těhlice

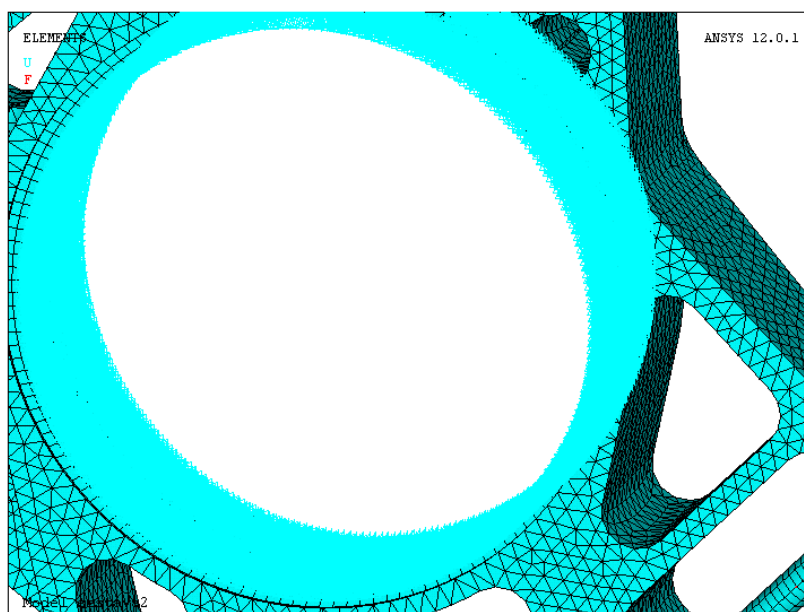
Aplikování zátěžných sil v úchytném bodu řízení



Obr.65 Ukázka zatížení v úchytném bodu G



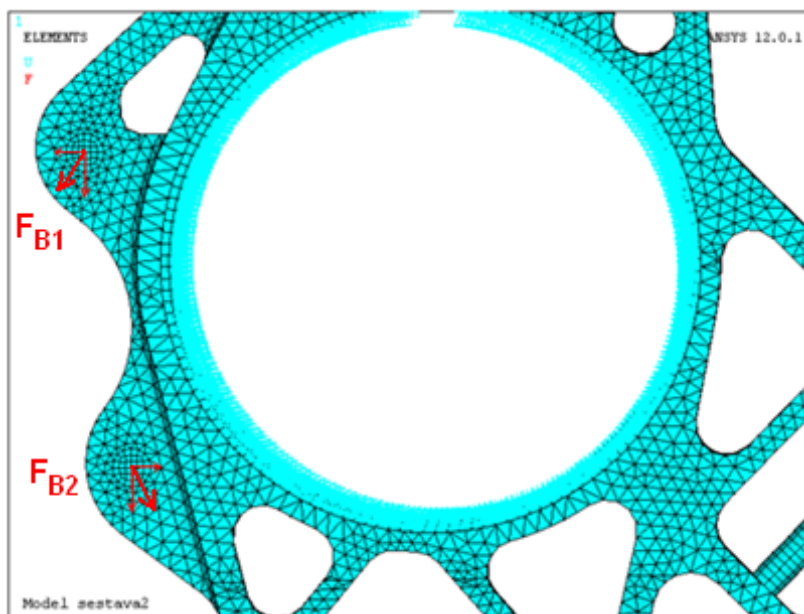
Ve střední části těhlice je realizováno zamezení posuvu a rotací na vnitřní ploše vnějšího kroužku ložiska ve všech osách X, Y, Z, tedy jsou odebrány všechny stupně volnosti.



Obr. 66 Ukázka okrajové podmínky v náboji přední těhlice

Zatěžující síly mění svoji velikost ve všech jízdních stavech. Brzdná síla $F_B = 9300$ N se dělí pro každý otvor na polovinu, tedy na dvě síly F_{B1} a F_{B2} . Tato síla působí ve směru otáčení brzdového kotouče tzn. směr tečny. Výslednice F_{B1} a F_{B2} , na následujícím obrázku, je rozložena do dvou směrů.

Brzdná síla vyvolaná stavem brzdění na přední těhlici



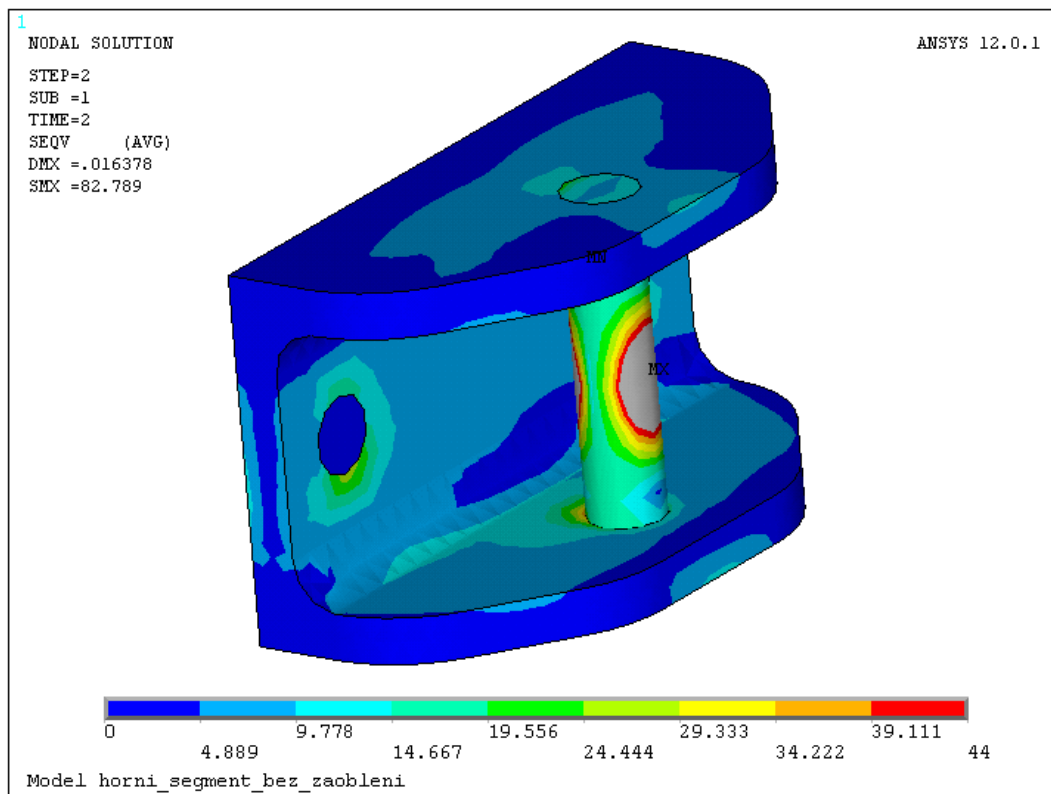
Obr. 67 Zatížení v konzole přední těhlice při stavu brzdění



8.2 ANALÝZA NAPJATOSTI A DEFORMACE HORNÍHO SEGMENTU TĚHLICE

Z analýzy napjatosti je zřejmé, že nejvyšší hodnoty redukovaného napětí dosahuje horní segment těhlice při jízdě stavu „vozovka s výmoly“. Analýza dále ukázala, že horní segment těhlice je předdimenzovaný materiálem. Odebrání materiálu je možné v místech, která představují téměř nulové koncentrace napětí, ale musí se postupovat opatrně, aby nedošlo ke ztrátě pevnosti a zvýšení redukovaného napětí nad hranici meze kluzu materiálu.

Průběh napětí jízdě stavu „vozovka s výmoly“ horního segmentu přední těhlice



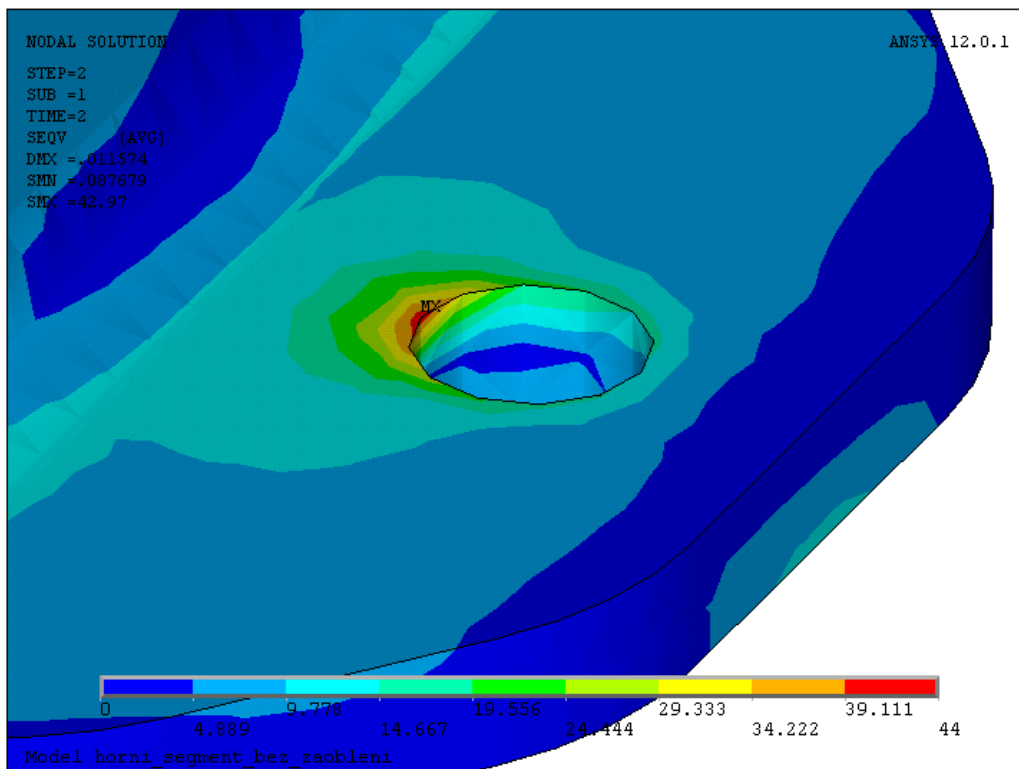
Obr. 68 Analýza horního segmentu těhlice, jízdě stav „vozovka s výmoly“

Na obr. 69 je zobrazena maximální hodnota koncentrace napětí při jízdě stavu „vozovka s výmoly“, která činí 44 MPa.

Na následujícím obr. 70 je vyobrazen průběh deformace horního segmentu přední těhlice. Podobně jako u průběhu napětí na obr. 68 a na dalších obrázcích uvedených níže je i u průběhu deformace nejvyšší hodnota na čepu (šroubu), protože v bodě na jeho ose působí zatěžující síla. Ve skutečnosti zátěžná síla nepůsobí v jednom bodě nýbrž na části povrchu šroubu, proto na oblast šroubů nebude brána pozornost. Tato síla vyvolává maximální napětí, které nelze uvažovat jako maximální napětí v tělese. Z tohoto důvodu se upravilo měřítko stupnice redukovaného napětí tak, aby se zjistilo σ_{redMAX} v samotném tělese a následkem této změny se v místě působící síly zobrazilo napětí šedou barvou. Šedé zobrazení redukovaného napětí znamená, že je mimo rozsah této stupnice. Výsledky výpočtů jsou prezentovány jako barevné isoplochy.

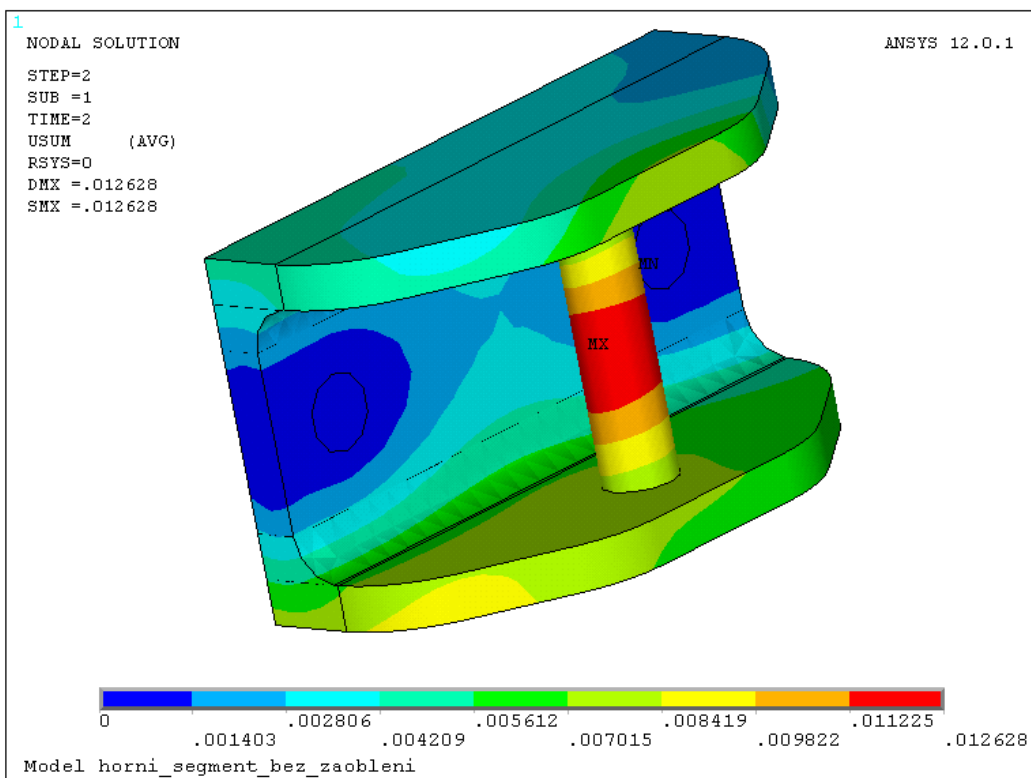


Výsledek maximální koncentrace napětí horního segmentu těhlice při jízděm stavu „vozovka s výmoly“



Obr. 69 Maximální koncentrace napětí horního segmentu těhlice, jízděm stav „vozovka s výmoly“

Průběh deformace horního segmentu těhlice



Obr. 70 Průběh deformace horního segmentu těhlice, jízděm stav „vozovka s výmoly“



Tabulka s výslednými hodnotami jízdních stavů pro horní segment

Tab.8 Hodnoty napěťové analýzy horního segmentu

Pořadí	Jízdní stav	Deformace [mm]	σ_{redMAX} [MPa]	Bezpečnost [-]	Hmotnost [kg]
1	Přejezd nerovnosti	0,010	37	13,37	0,08
2	Vozovka s výmoly	0,013	44	11,25	
3	Prudké brzdění	0,012	32	15,47	
4	Prudká akcelerace	0,007	29,3	16,90	

Z tabulky 8 vyplývá, že nejvyšší redukované napětí vzniká při jízdním stavu „vozovka s výmoly“ a nejnižší redukované napětí při jízdním stavu „prudká akcelerace“. Z výsledků výpočtové simulace napjatosti vychází vysoká bezpečnost vzhledem k meznímu stavu pružnosti (mezi kluzu materiálu). Výsledná bezpečnost je příliš vysoká, proto bude provedena konstrukční úprava, kde se z napěťové analýzy ukáže, zda-li bude dostatečná či nikoliv.

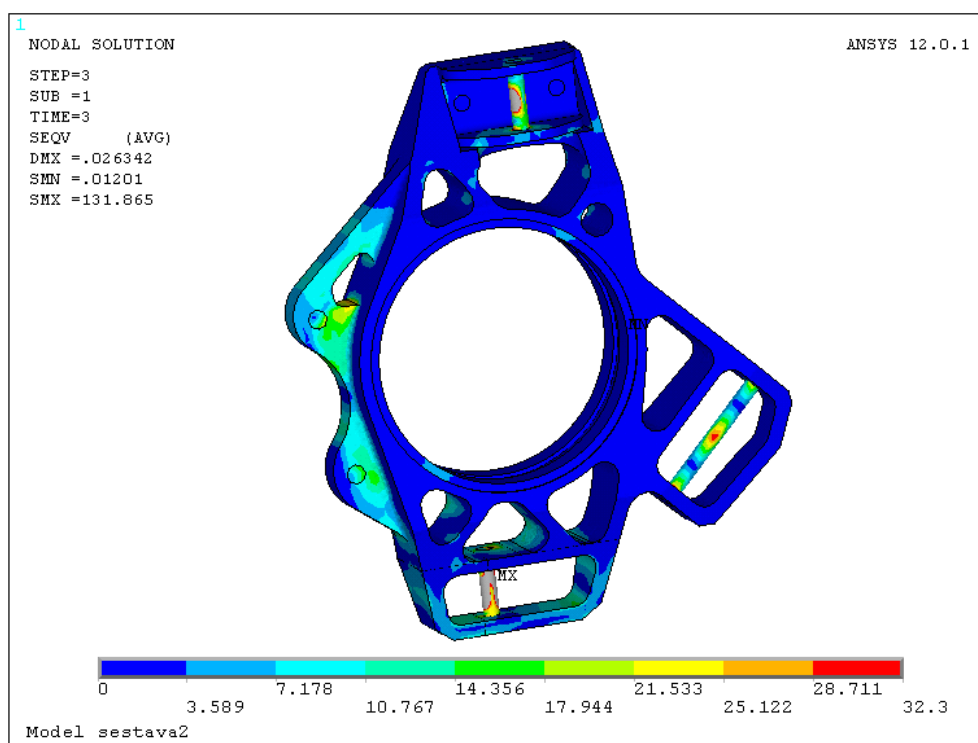


8.3 ANALÝZA NAPJATOSTI A DEFORMACE PŘEDNÍ TĚHLICE

Místa koncentrace napětí přední těhlice jsou patrná z obrázků průběhu napětí a deformace pro jednotlivé jízdní stavy. Brzdná síla F_B bude působit ve všech jízdních stavech kromě jízdního stavu „prudká akcelerace“. Mohla by nastat situace, kdy současně působí zatížení na těhlici brzdou silou a silami v jednotlivých bodech upevnění, viz. *Tab. 7*, proto provedu napěťovou analýzu pro současné zatížení. V případě, že by brzdná síla působila pouze v jízdním stavu „prudké brzdění“ byla by součást méně namáhána, tedy toto zatížení má vyšší nároky na bezpečnost.

Ze sledovaných jízdních stavů vyplývá, že se nejvyšší hodnoty redukovaného napětí dosahuje při jízdním stavu „prudké brzdění“, která má maximum v úchytné konzole brzdového třmenu a činí 32,3 MPa, viz. *obr. 71 a 72*. Tato hodnota napětí nepřevyšuje napětí meze kluzu materiálu a tímto lze výsledek analýzy považovat za vyhovující. Podobně jako u analýzy horního segmentu těhlice nebudou ve výsledcích uvažovány šrouby, které spojují ramena nápravy a tyč řízení, jako místa s maximální koncentrací redukovaného napětí. Napětí v okolí těchto šroubů, která jsou ve styku s těhlicí, též nebude ve výsledcích uvažováno, protože je spojeno (přilepeno) k tělesu těhlice a tím není simulována přesná realita. Měřítko redukovaného napětí je nastaveno u všech jízdních stavů podle jízdního stavu s nejvyšší hodnotou redukovaného napětí. Na oblastech označené modrou barvou, na obrázcích průběhu redukovaného napětí, lze odebrat materiál, kterého je v daném místě mnoho.

Průběh napětí zatíženého stavu „prudké brzdění“ přední těhlice

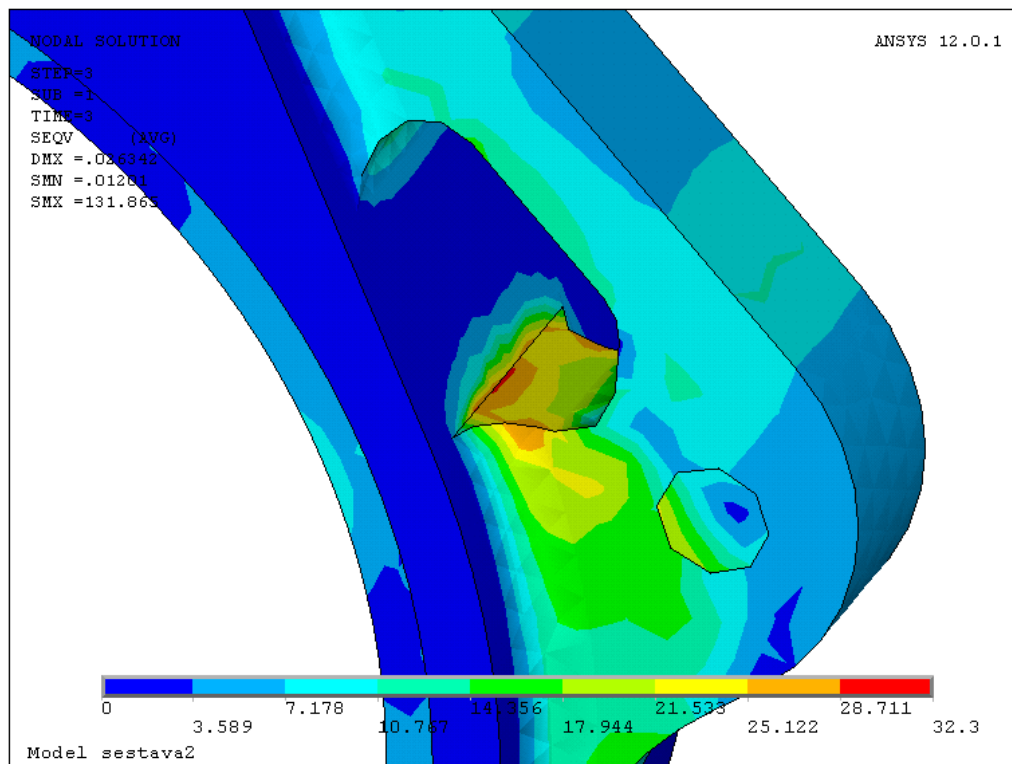


Obr. 71 Průběh redukovaného napětí těhlice při jízdním stavu „ prudké brzdění “

Maximální hodnota deformace nastává při jízdním stavu „vozovka s výmoly“, která činí 0,04 mm a probíhá v dolní části těhlice. Průběh deformace při tomto jízdním stavu je na *obr. 74*. Druhým nejvíce nebezpečným jízdním stavem je „vozovka s výmoly“, kde maximální redukované napětí dosahuje hodnoty 31,9 MPa opět v úchytné konzole brzdového třmenu. Průběh napětí těhlice při tomto jízdním stavu je zobrazen na *obr. 73*.

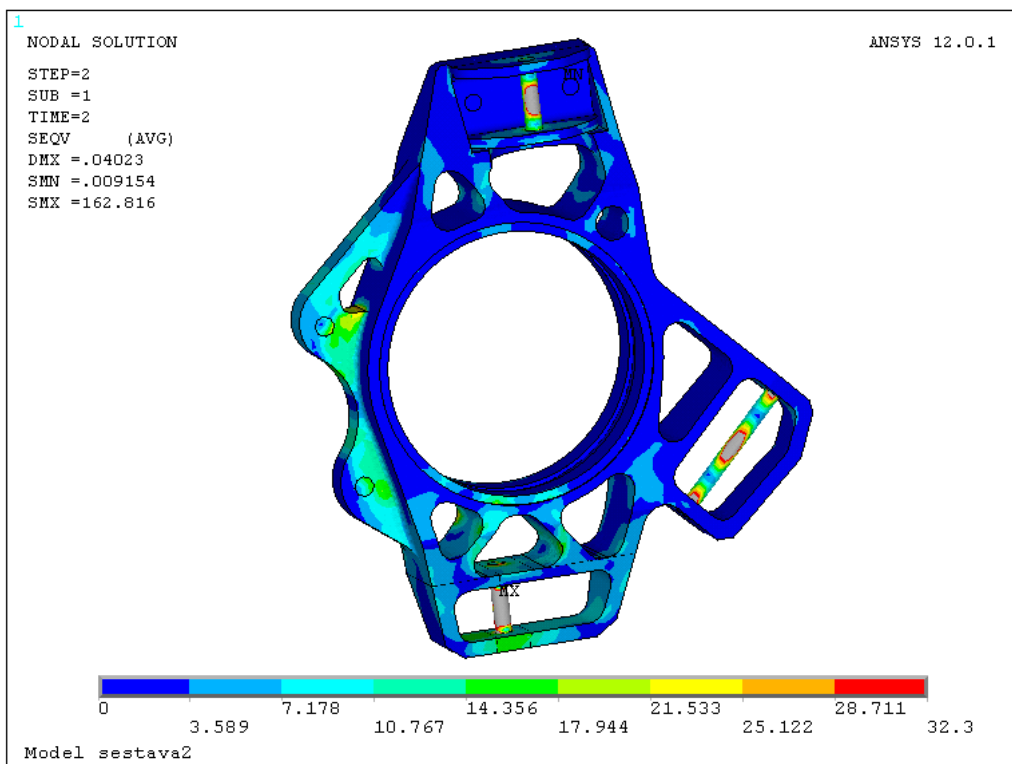


Výsledek maximální koncentrace napětí přední těhlice při jízdním stavu „prudké brzdění“



Obr. 72 Detail maximální koncentrace napětí těhlice při jízdním stavu „ prudké brzdění “

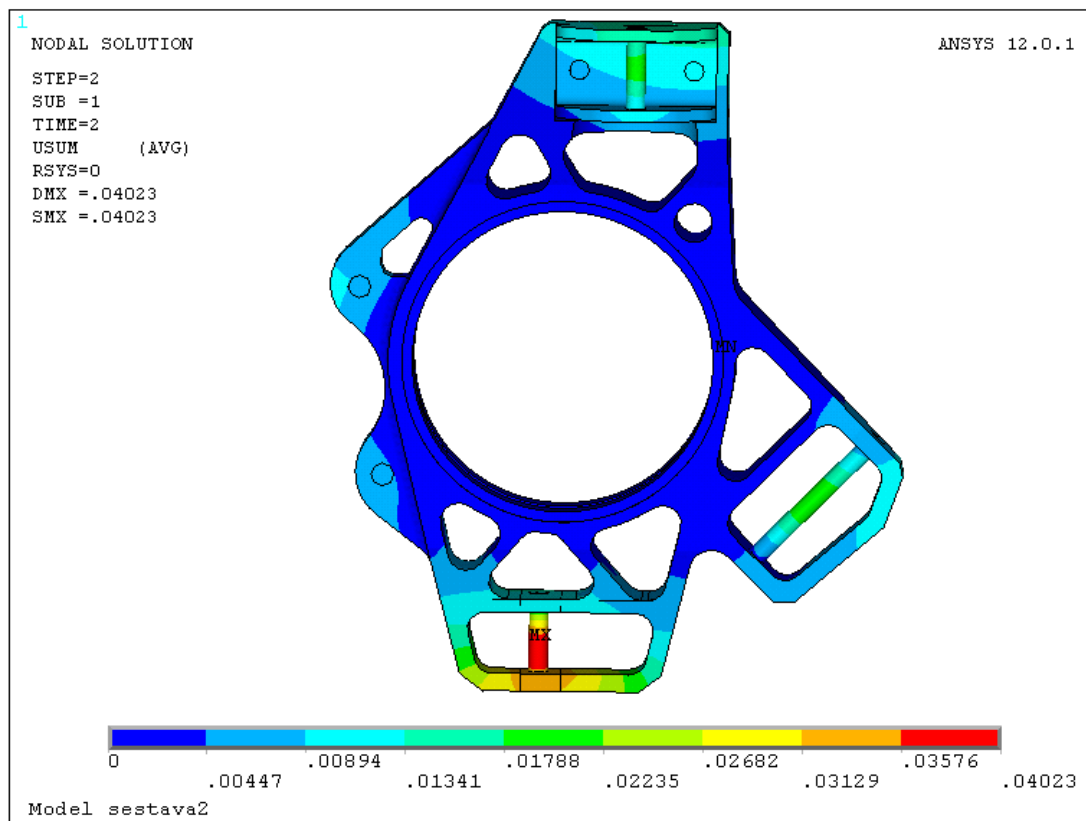
Průběh napětí zatíženého stavu „vozovka s výmoly“ přední těhlice



Obr. 73 Průběh redukovaného napětí při jízdním stavu „vozovka s výmoly“



Průběh deformace přední těhlice při jízdě stavu „vozovka s výmoly“



Obr. 74 Průběh deformace těhlice při jízdě stavu „vozovka s výmoly“

Tabulka s výslednými hodnotami jízdě stavů pro přední těhlici Formule Student

Tab.9 Hodnoty napěťové analýzy přední těhlice

Pořadí	Jízdní stavy	Deformace [mm]	σ_{redMAX} [MPa]	Bezpečnost [-]	Hmotnost [kg]
1	Přejezd nerovnosti	0,030	31,3	15,8	1,48
2	Vozovka s výmoly	0,040	31,9	15,5	
3	Prudké brzdění	0,026	32,3	15,3	
4	Prudká akcelerace	0,016	9	55	

Z tabulky 9 vyplývá, že hodnota maximálního redukovaného napětí se nepřiblížila hodnotě meze kluzu materiálu, viz Tab. 2 a deformace nijak neovlivnila navrženou geometrii. **Tímto lze považovat navrženou přední těhlici za vyhovující z hlediska bezpečnosti k meznímu stavu pružnosti (mezi kluzu materiálu) nikoliv vzhledem k hmotnosti.**

Průběh redukovaného napětí a průběh deformace těhlice ostatních jízdě stavů jsou uvedeny v příloze.

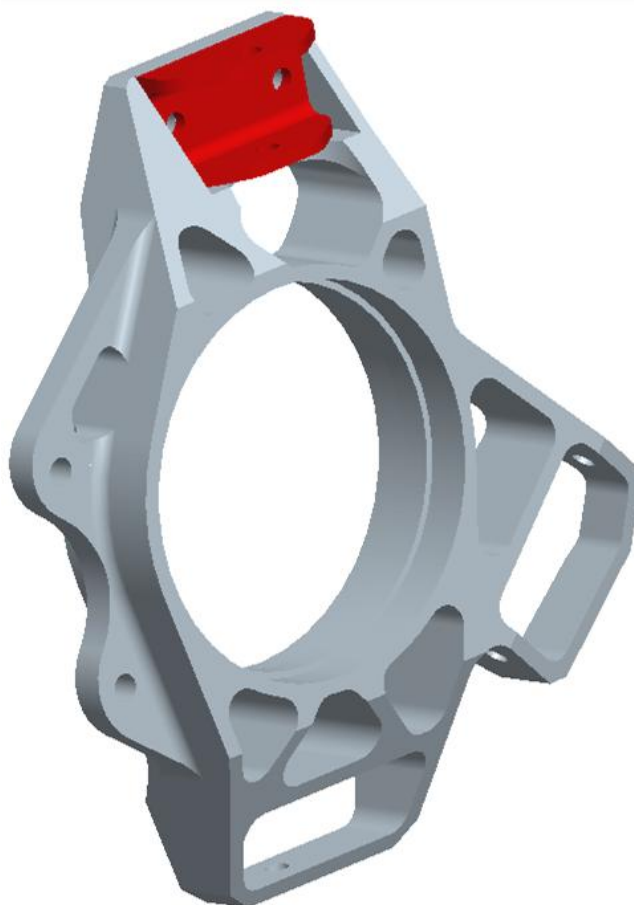


8.4 KONSTRUKČNÍ ÚPRAVA - ODLEHČENÍ TĚHLICE

Přestože nebylo nutné upravit tvar těhlice a tím opakovat výpočtovou simulaci napjatosti z důvodu hrozícího poškození, považují za důležité upravit těleso těhlice a provést analýzu napjatosti z důvodu snížení hmotnosti. V této kapitole budou uvedeny úpravy na tělese těhlice a horním segmentu těhlice. Jak již bylo uvedeno výše, je nutné postupovat opatrně při odebrání materiálu za účelem snížení hmotnosti. Proto zde budou popsány tři konstrukční úpravy přední těhlice.

8.4.1 PRVNÍ KONSTRUKČNÍ ÚPRAVA

První úprava spočívala v odebrání materiálu po obvodu, nebo-li zvětšení otvorů. Tímto došlo k zúžení stěn z původních 8 mm na 6 mm. Dále došlo k ztenčení konzoly pro upevnění brzdového třmenu o 3 mm. Horní segment těhlice se upravil tak, že stěny se zmenšily o 1 mm z 5 mm na 4 mm. Touto úpravou se musí zvětšit šířka podložky pro nastavení odklonu kola o 1 mm. Po těchto úpravách se vytvořila sestava a postup napěťové analýzy se opakoval stejným způsobem, který je popsán v kap. 8.1. Model na *obr. 75* reprezentuje odlehčenou verzi přední těhlice vážící 1,36 kg a horní segment, který má hmotnost 0,065 kg.

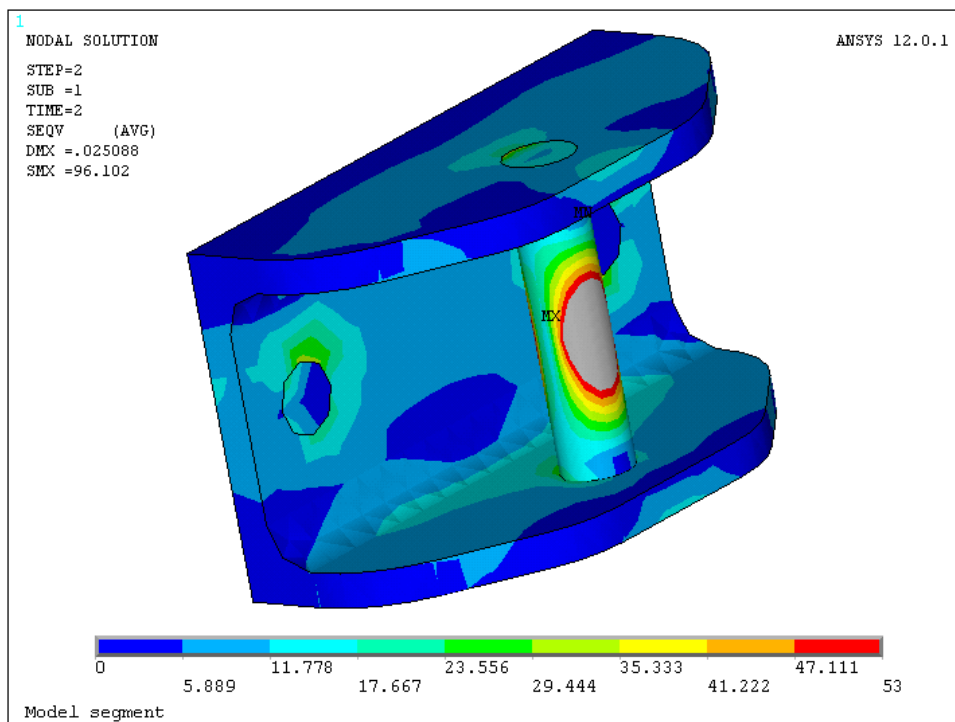


Obr. 75 Odlehčený model první konstrukční úpravy těhlice

Na *obr. 79* je zobrazen průběh nejvyššího redukovaného napětí těhlice při jízdě v stavu „prudké brzdění“, jehož vznik je v horní části konzoly pro upevnění brzdového třmene.

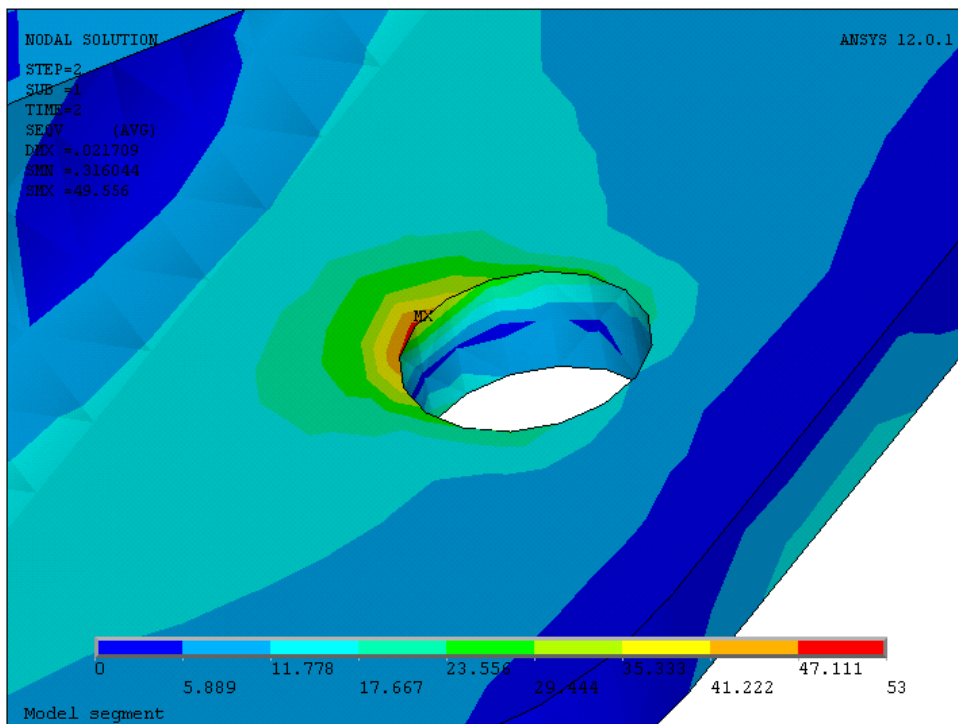


Průběh napětí první konstrukční úpravy horního segmentu těhlice při jízdním stavu „vozovka s výmoly“



Obr. 76 Průběh redukovaného napětí první konstrukční úpravy horního segmentu těhlice při jízdním stavu „vozovka s výmoly“

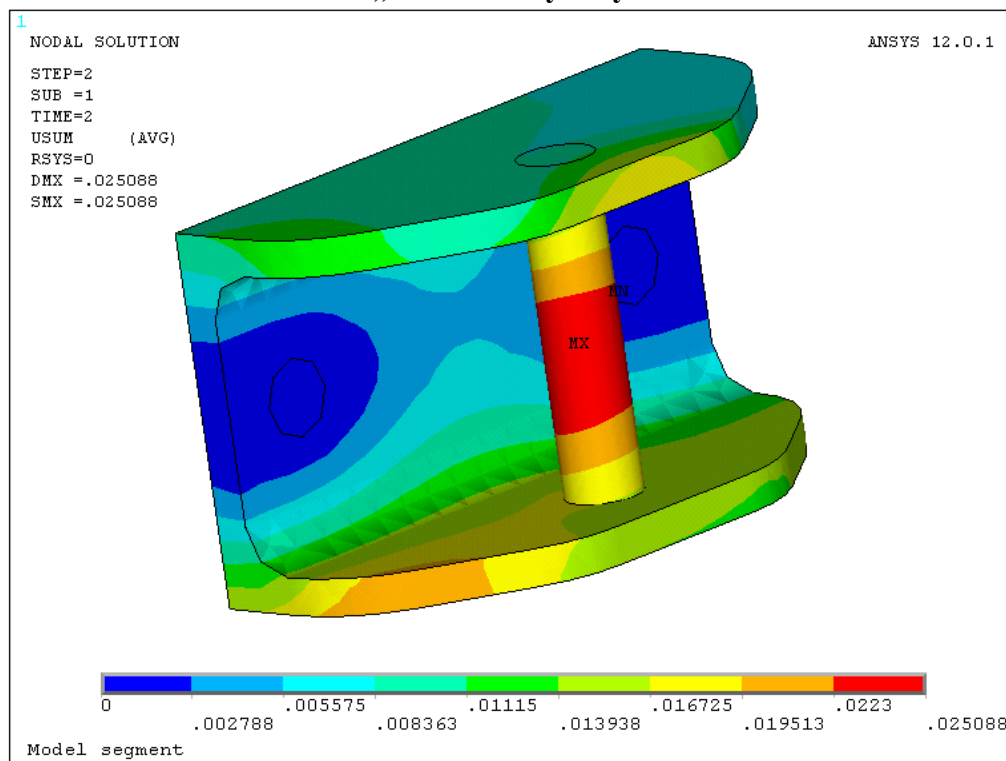
Výsledek maximální koncentrace napětí první konstrukční úpravy horního segmentu těhlice při jízdním stavu „vozovka s výmoly“



Obr. 77 Maximální koncentrace napětí horního segmentu těhlice, jízdni stav „vozovka s výmoly“

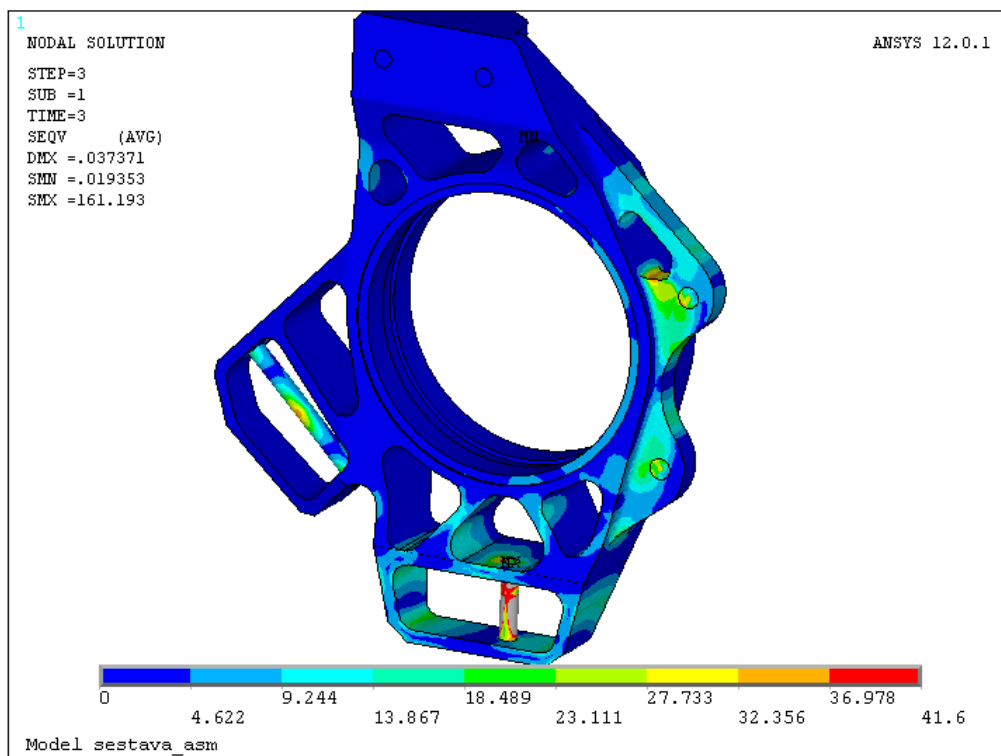


Průběh deformace první konstrukční úpravy horního segmentu při jízděm stavu „vozovka s výmoly“



Obr. 78 Průběh deformace první konstrukční úpravy horního segmentu při jízděm stavu „vozovka s výmoly“

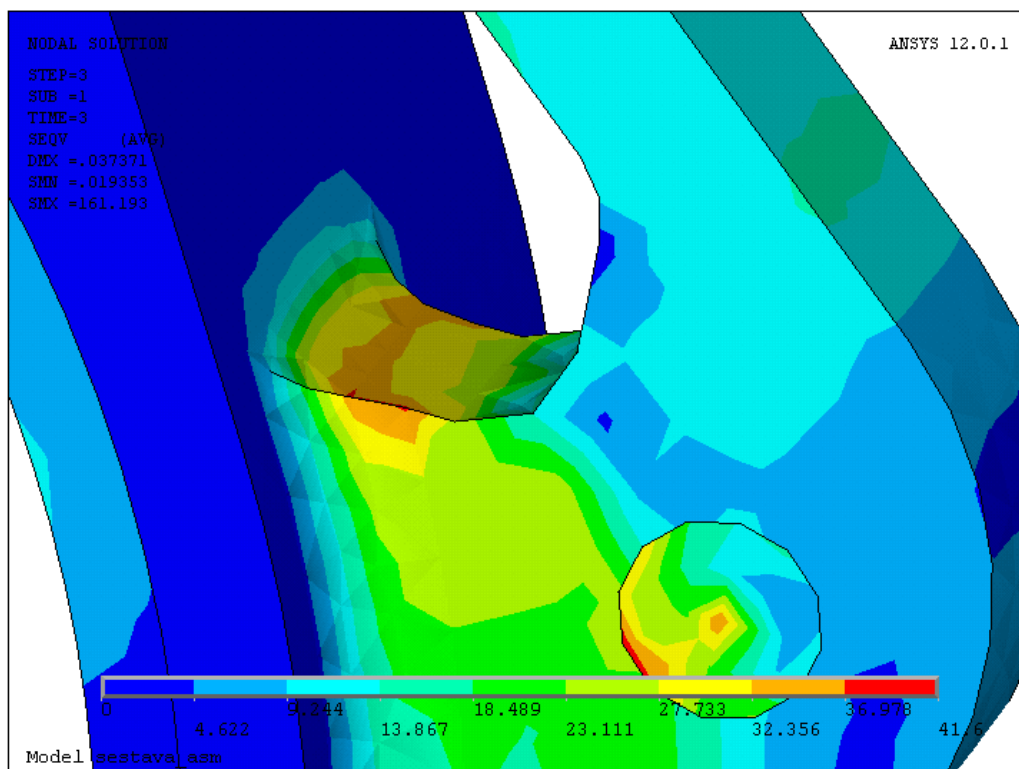
Průběh napětí první konstrukční úpravy těhlice při jízděm stavu „prudké brzdění“



Obr. 79 Průběh redukovaného napětí první úpravy těhlice při jízděm stavu „prudké brzdění“

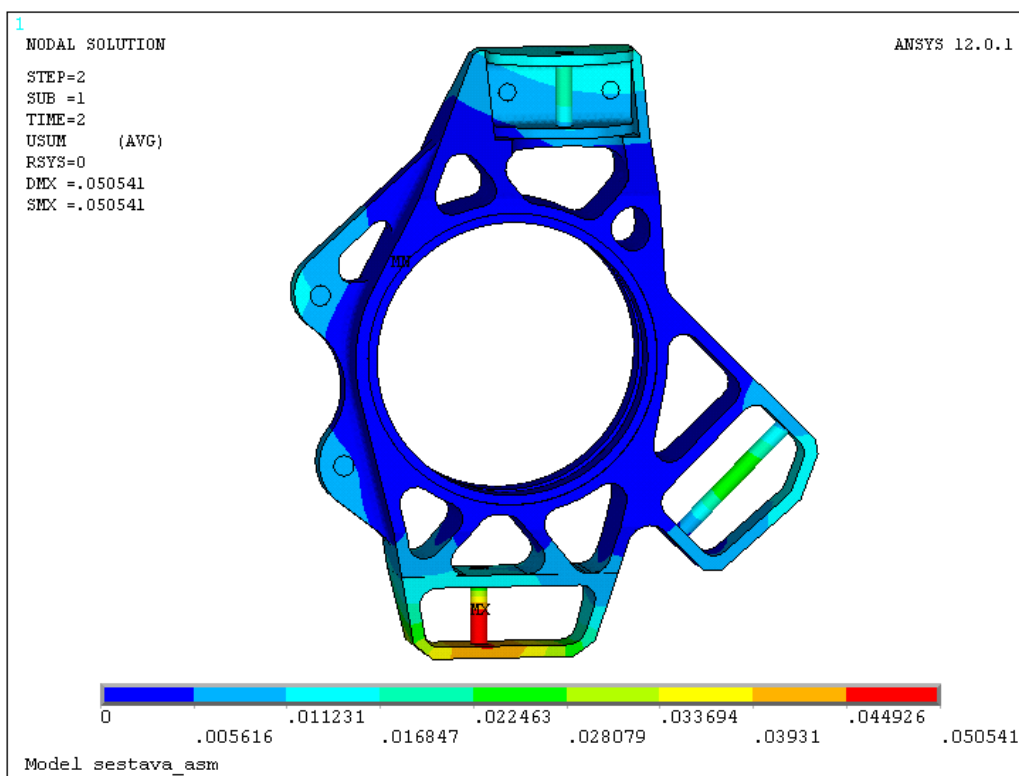


Výsledek maximální koncentrace napětí první konstrukční úpravy přední těhlice při jízdním stavu „prudké brzdění“



Obr. 80 Detail maximální koncentrace napětí těhlice při jízdním stavu „ prudké brzdění “

Průběh deformace první úpravy přední těhlice při jízdním stavu „vozovka s výmoly“



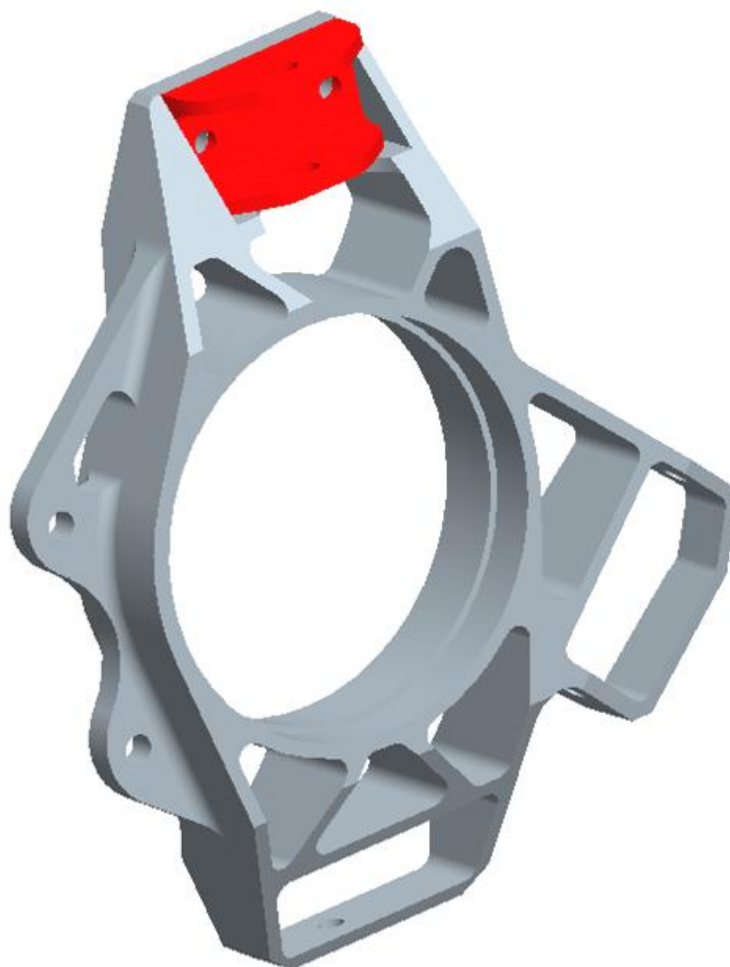
Obr. 81 Průběh deformace první úpravy těhlice při jízdním stavu „prudké brzdění“



8.4.2 DRUHÁ KONSTRUKČNÍ ÚPRAVA

Po provedení napěťové analýzy první konstrukční úpravy těhlice lze konstatovat, že součást je možné dále odlehčit odebráním materiálu. Proto se provede další výpočtová simulace napjatosti, která ukáže, zda-li bude možné těleso těhlice dále upravovat či nikoliv.

Druhá konstrukční úprava spočívala v dalším zeslabení stěn po obvodu o 1 mm z předešlé první úpravy, tedy na tloušťku stěn 5 mm. Došlo k zeslabení konzoly pro upevnění brzdového třmenu o 2 mm z předchozí úpravy, tedy na hodnotu 10 mm. Dále se zmenšil poloměr zaoblení hran z původních 8 mm na 5 mm. Horní segment těhlice se zde neměnil a zůstal zachován z řešení první konstrukční úpravy. Takto upravený model těhlice na *obr. 82* má hmotnost 1,18 kg.

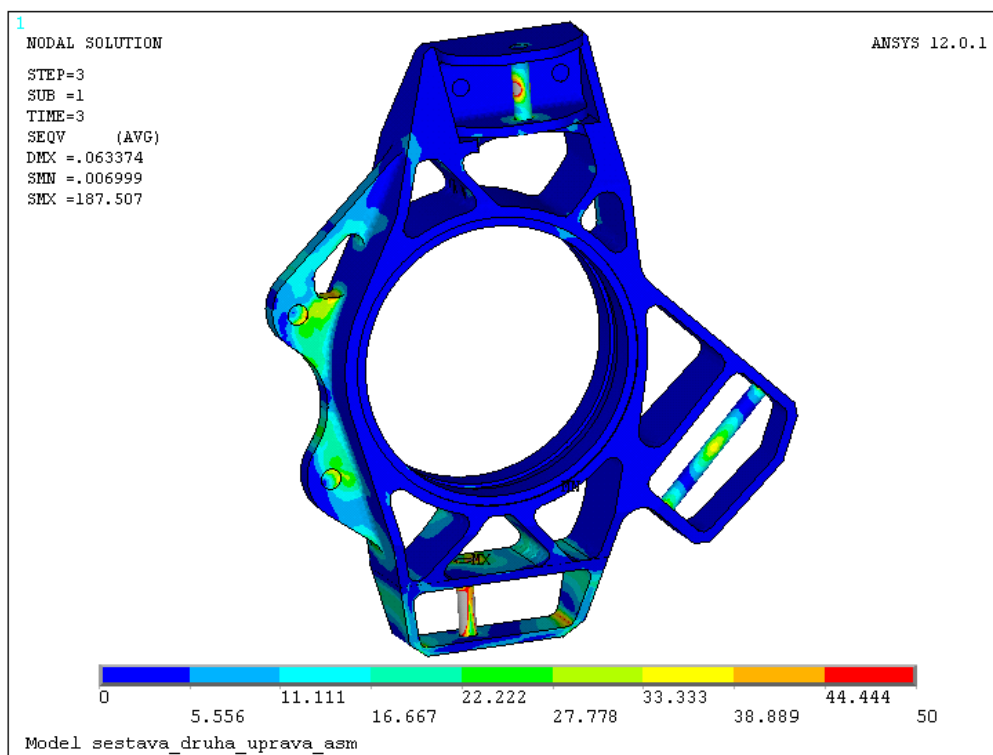


Obr. 82 Odlehčený model druhé konstrukční úpravy těhlice

Na následujících obrázcích je vyobrazen průběh napětí a deformace přední těhlice v zátěžném jízdním stavu „prudké brzdění“. Na *obr. 83* je zobrazen průběh nejvyššího redukovaného napětí, jehož vznik je v dolní části těhlice, viz. *obr. 84*.

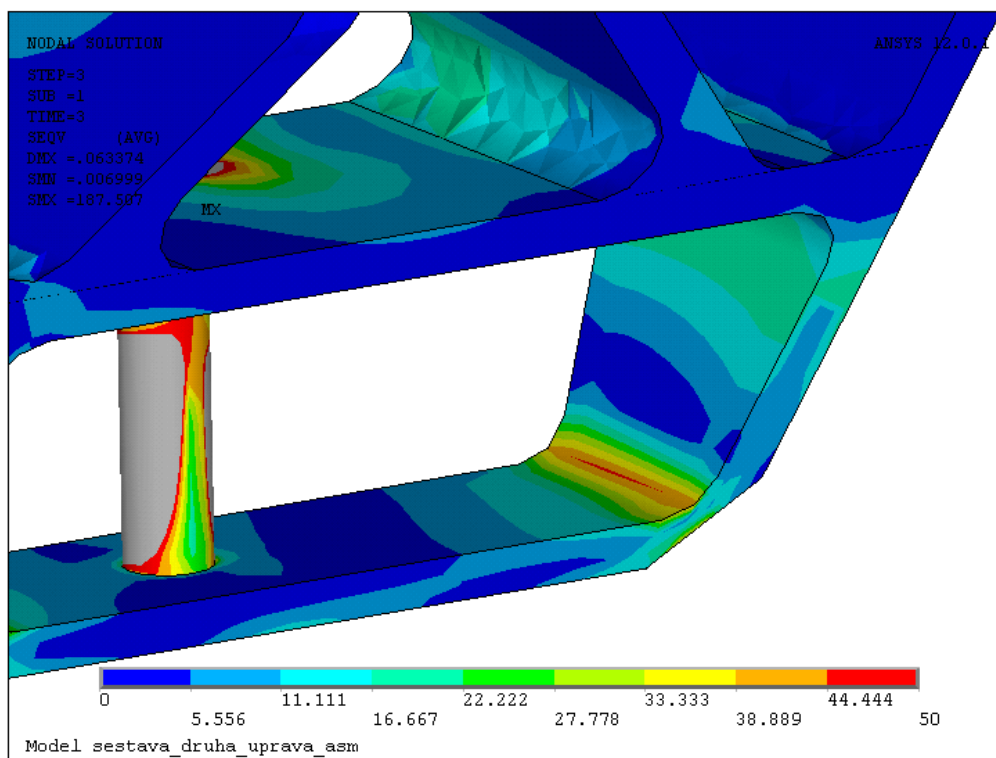


Průběh napětí druhé konstrukční úpravy těhlice při jízděm stavu „prudké brzdění“



Obr. 83 Průběh redukovaného napětí druhé úpravy těhlice při jízděm stavu „prudké brzdění“

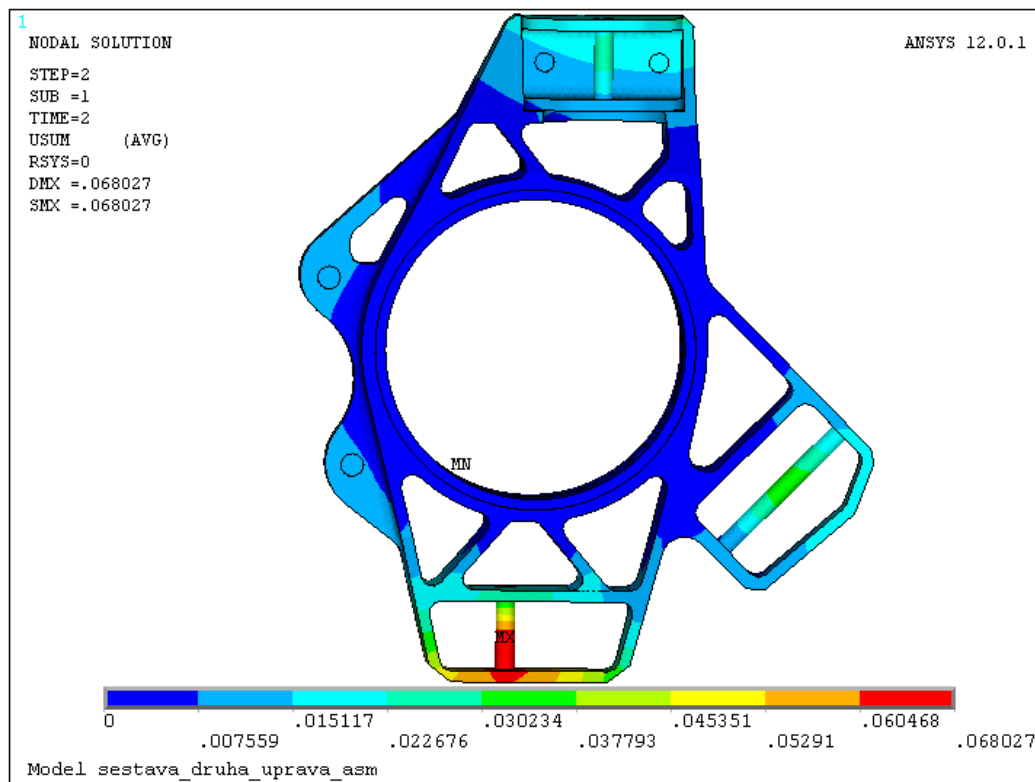
Výsledek maximální koncentrace napětí druhé konstrukční úpravy přední těhlice při jízděm stavu „prudké brzdění“



Obr. 84 Detail místa nejvyšší koncentrace napětí druhé konstrukční úpravy těhlice při jízděm stavu „prudké brzdění“



Průběh deformace druhé konstrukční úpravy přední těhlice při jízdním stavu „prudké brzdění“



Obr. 85 Průběh deformace druhé konstrukční úpravy těhlice při jízdním stavu „prudké brzdění“

8.4.3 TŘETÍ KONSTRUKČNÍ ÚPRAVA

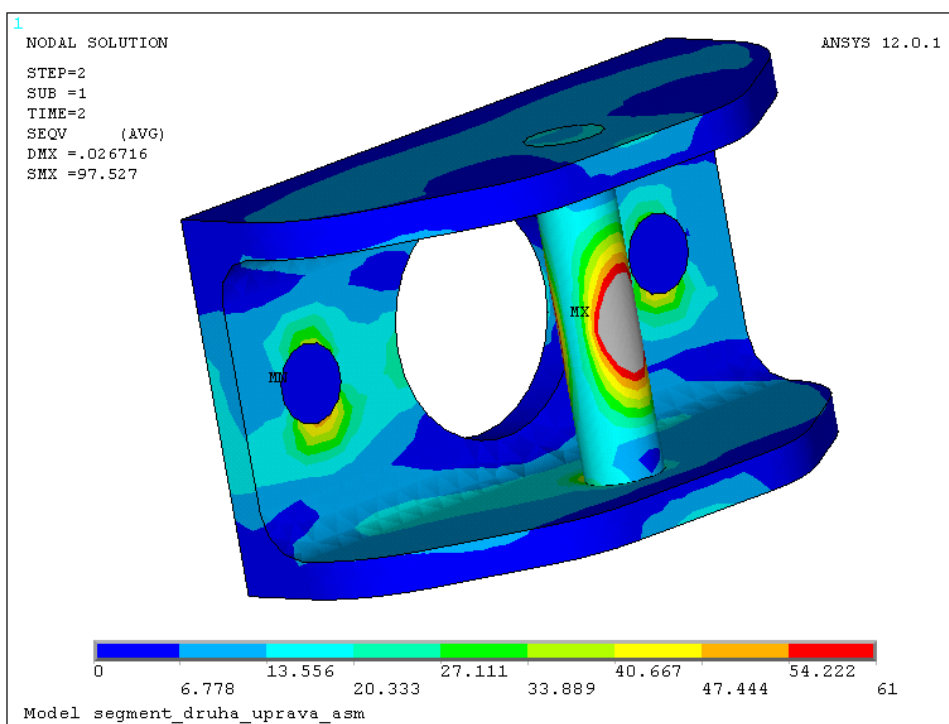
Z výsledku napěťové analýzy druhé konstrukční úpravy lze konstatovat, že je vhodné provést další, v pořadí třetí, konstrukční úpravu. U třetí konstrukční úpravy se zúžily obvodové stěny na tloušťku 3 mm. Došlo k odebrání materiálu v horní části těhlice a odstranila se příčka v oblasti konzoly řízení. Dále se upravil tvar konzoly pro upevnění brzdového třmenu, kde došlo k zúžení stěny na tloušťku 7 mm. U této provedené konstrukční úpravy se upravil i horní segment těhlice. Tato úprava, v pořadí druhá, spočívala ve vyvrtání otvoru mezi upevňovacími otvory pro šrouby. Proto se provedla výpočtová simulace napjatosti u obou upravených těles. Takto upravený model těhlice, na obr. 86, má hmotnost 0,86 kg a horní segment má hmotnost 0,06 kg.

Na obrázcích 87-89 je vyobrazen průběh napětí a deformace horního segmentu těhlice v zátěžném jízdním stavu „vozovka s výmoly“. Na obr. 90 je zobrazen průběh nejvyššího redukovaného napětí těhlice, jehož vznik je v dolní části těhlice, viz. obr. 91.



Obr. 86 Odlehčený model třetí konstrukční úpravy těhlice

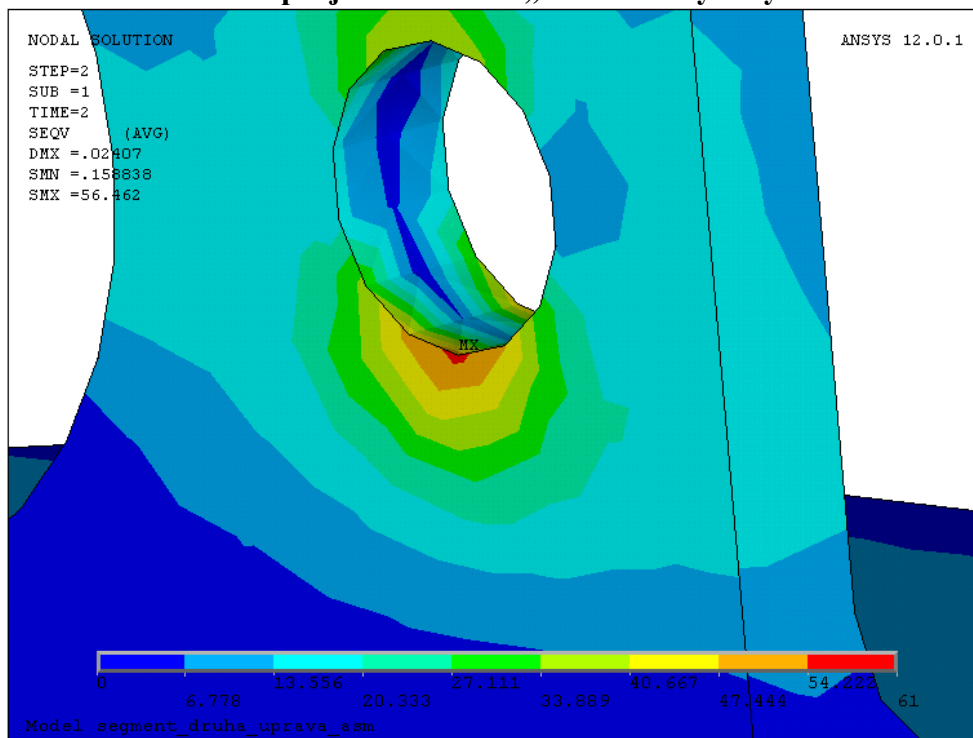
Průběh napětí druhé konstrukční úpravy horního segmentu těhlice při jízdním stavu „vozovka s výmoly“



Obr. 87 Průběh redukovaného napětí druhé konstrukční úpravy horního segmentu těhlice při jízdním stavu „vozovka s výmoly“

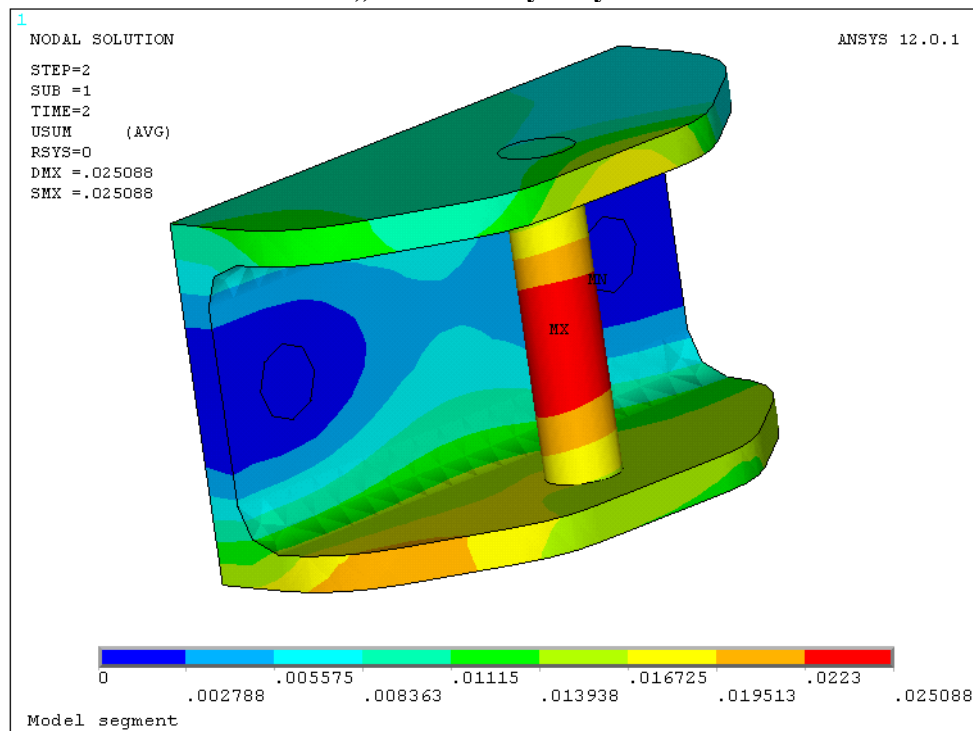


Výsledek maximální koncentrace napětí druhé konstrukční úpravy horního segmentu těhlice při jízdě stavu „vozovka s výmoly“



Obr. 88 Maximální koncentrace napětí horního segmentu těhlice, jízdě stav „vozovka s výmoly“

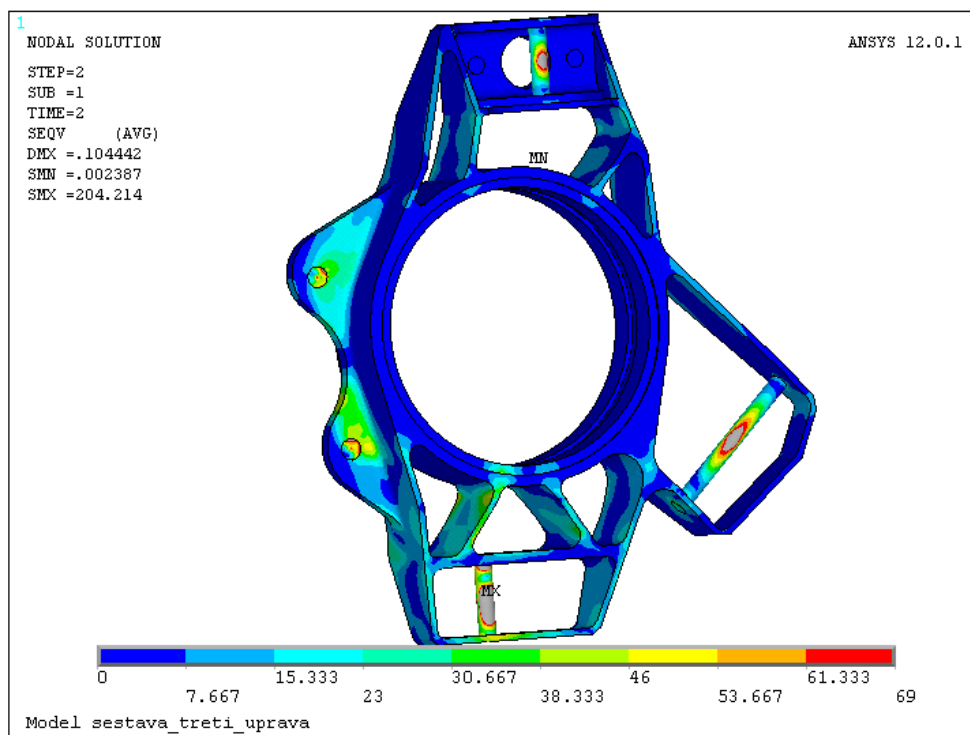
Průběh deformace druhé konstrukční úpravy horního segmentu při jízdě stavu „vozovka s výmoly“



Obr. 89 Průběh deformace druhé konstrukční úpravy horního segmentu při jízdě stavu „vozovka s výmoly“

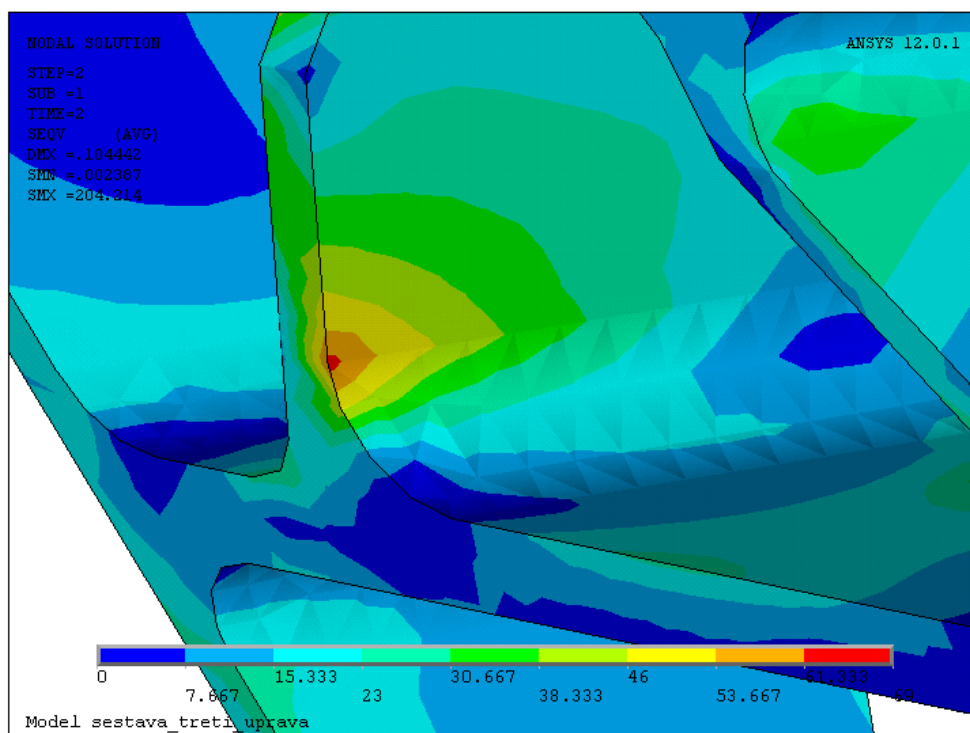


Průběh napětí třetí konstrukční úpravy těhlice při jízdě stavu „vozovka s výmoly“



Obr. 90 Průběh redukovaného napětí třetí úpravy těhlice při jízdě stavu „vozovka s výmoly“

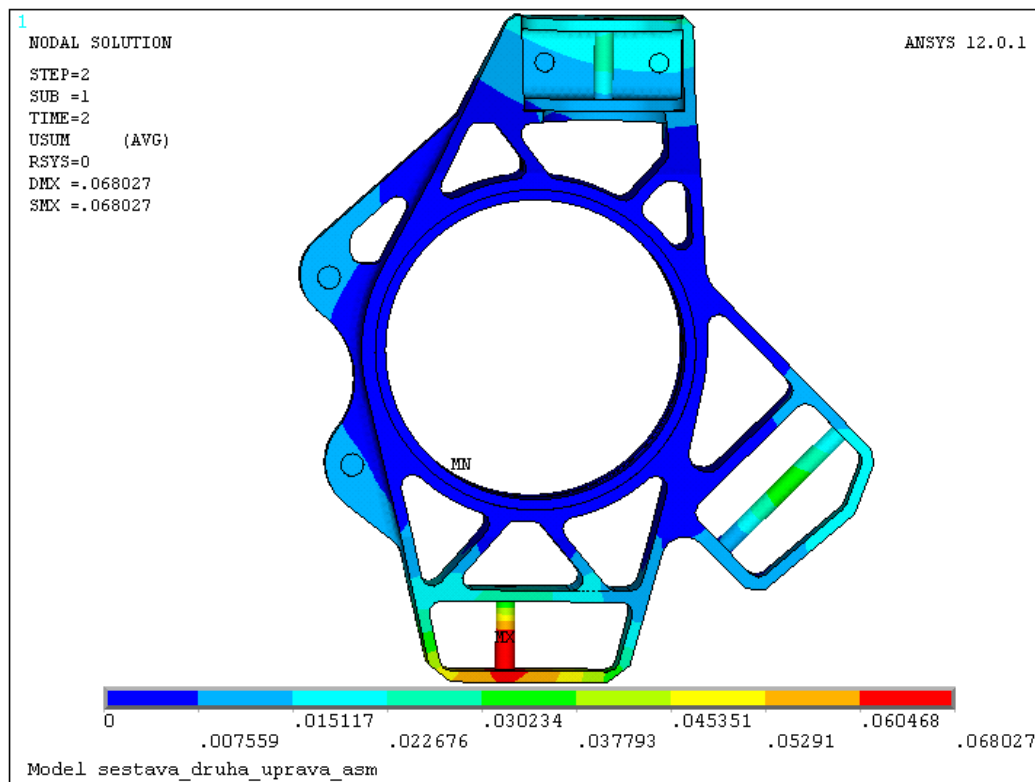
Výsledek maximální koncentrace napětí třetí konstrukční úpravy přední těhlice při jízdě stavu „vozovka s výmoly“



Obr. 91 Detail místa nejvyšší koncentrace napětí třetí konstrukční úpravy těhlice při jízdě stavu „vozovka s výmoly“



Průběh deformace třetí konstrukční úpravy přední těhlice při jízděm stavu „vozovka s výmoly“



Obr. 92 Průběh deformace třetí konstrukční úpravy těhlice při jízděm stavu „vozovka s výmoly“

8.4.4 VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ KONSTRUKČNÍCH ÚPRAV

Konstrukční úpravy modelů těles se podrobily analýze napětí při čtyřech jízděm stavech (Tab. 7), kde se ukázal nejhorší jízděm stav „prudké brzdění“ u výpočtu první a druhé konstrukční úpravy těhlice a „vozovka s výmoly“ u třetí konstrukční úpravy těhlice. U první konstrukční úpravy bylo dosaženo nejvyšší hodnoty redukovaného napětí 41,6 MPa, u druhé 50 MPa a u třetí 69 MPa. Po analýze napjatosti horního segmentu těhlice se ukázal jako nejhorší jízděm stav „vozovka s výmoly“, kde byly dosaženy nejvyšší hodnoty redukovaného napětí 53 MPa u první konstrukční úpravy a 61 MPa u druhé. Z průběhů deformací lze konstatovat, že nejvyšší hodnoty deformace se dosahuje při jízděm stavu „vozovka s výmoly“ u výpočtu první a druhé konstrukční úpravy těhlice a „prudké brzdění“ u třetí konstrukční úpravy těhlice. Ze všech provedených výpočtů se dosahuje nejvyšší hodnoty deformace 0,136 mm u třetí konstrukční úpravy těhlice. Úpravy se týkaly horního segmentu těhlice a samotné konečné varianty těhlice, kde byla upravena tloušťka stěn a při druhé konstrukční úpravě těhlice i velikost poloměrů zaoblení. U třetí konstrukční úpravy se upravila tloušťka stěn, konzola brzdového třmene, otvory v horní části těhlice a odebrala se příčka (žebro) konzoly řízení. Z výsledků uvedených níže lze konstatovat, že upravené tvary těles jsou předdimenzovány materiálem a je u nich možné další zpracování (optimalizace).



Tabulka s výslednými hodnotami jízdních stavů první a druhé úpravy horního segmentu

Tab.10 Hodnoty napěťové analýzy horního segmentu

	Pořadí	Jízdní stav	σ_{redMAX} [MPa]	Bezpečnost [-]	Hmotnost [kg]
První konstrukční úprava	1	Přejezd nerovnosti	39,7	12,5	0,065
	2	Vozovka s výmoly	53	9,4	
	3	Prudké brzdění	44	11,3	
	4	Prudká akcelerace	26	19	
Druhá konstrukční úprava	1	Přejezd nerovnosti	43	11,5	0,06
	2	Vozovka s výmoly	61	8,1	
	3	Prudké brzdění	53	9,3	
	4	Prudká akcelerace	28,7	17,2	

Tabulka s výslednými hodnotami jízdních stavů pro první, druhou a třetí konstrukční úpravu přední těhlice Formule Student

Tab.11 Hodnoty napěťové analýzy první, druhé a třetí konstrukční úpravy přední těhlice

	Pořadí	Jízdní stav	σ_{redMAX} [MPa]	Bezpečnost [-]	Hmotnost [kg]
První konstrukční úprava	1	Přejezd nerovnosti	40,8	12,1	1,36
	2	Vozovka s výmoly	41	12,1	
	3	Prudké brzdění	41,6	11,9	
	4	Prudká akcelerace	12,5	39,6	
Druhá konstrukční úprava	1	Přejezd nerovnosti	48	10,3	1,18
	2	Vozovka s výmoly	48,5	10,2	
	3	Prudké brzdění	50	9,9	
	4	Prudká akcelerace	17,4	28,5	
Třetí konstrukční úprava	1	Přejezd nerovnosti	62	8	0,86
	2	Vozovka s výmoly	69	7,2	
	3	Prudké brzdění	61,5	8	
	4	Prudká akcelerace	27	18,3	

Z uvedených výsledků výpočtové simulace napjatosti vyplývá, že všechny tělesa vyhovují podrobené analýze vzhledem k mezi kluzu materiálu. Doporučuji další konstrukční úpravy a následné výpočtové simulace napjatosti na těhlici předního kola Formule Student s hlavním cílem snížení hmotnosti, protože takto navržený tvar má vysokou hmotnost a statickou bezpečnost. Popsanými a provedenými úpravami těles se zredukovala hmotnost konečné varianty těhlice vážící 1,48 kg na 0,86 kg a horního segmentu těhlice o hmotnosti 0,08 kg na 0,06 kg.



ZÁVĚR

Hlavním úkolem této diplomové práce bylo provést konstrukční návrh náboje kola a součástí, které s těhlicí tvoří kompletní sestavu kola Formule Student. Inspiraci pro samotný návrh přední těhlice Formule Student mně poskytl *obr. 17* v rešeršní části této práce. Na konstrukci těhlice bylo kladeno několik požadavků mezi které patří nízká hmotnost, okamžitá změna odklonu kola, variabilní nastavení geometrie přední nápravy, atd.

Pro modelování objemového tvaru náboje kola byl zvolen počítačový CAD program Pro/ENGINEER. Pro navržení tvaru přední těhlice Formule Student bylo nutné vyřešit nastavování okamžitého odklonu kola. Splnění tohoto požadavku se uskutečnilo pomocí přesného rozměru podložek, které se vkládají mezi horní segment těhlice a těhlicí. Vzdálenost, která představuje mezeru mezi horním segmentem a těhlicí, umožňuje nastavování negativního odklonu kola do 4° . Tato vzdálenost byla konstrukčně zpracována a početně ověřena. Postupným modelováním a konzultacemi s ostatními skupinami týmu se vytvořilo několik variant přední těhlice, kde první variantu nelze použít z prostorových důvodů v dolní části náboje kola a kolize šroubového spojení s těhlicí. Z uvedeného důvodu se navrhla druhá varianta, která má malý průměr ložisek. Na základě požadavků týmu Formule Student se vytvořila třetí varianta těhlice s velkým průměrem ložisek, které mají výhodu v lepším vedení kola, menších valivých odporech, atd. Proto se tvar upravil na konečnou variantu, která má ještě větší průměr ložisek a nejnižší hmotnost ze všech použitelných variant těhlic. Jelikož byl požadavek na nízkou hmotnost, je tento konečný návrh vhodný pro další zpracování. Z tohoto důvodu byl navržen materiál pro výrobu součástí, který má malou měrnou hmotnost a zároveň vysokou hodnotu meze kluzu materiálu.

Pro přesné dodržení navržených rozměrů a řešení uložení náboje kola, byla navržena hřídel náboje, která slouží k upevnění kola a brzdového kotouče. Podle postupné změny variant těhlic se navrhovaly varianty hřídele náboje. Hřídele náboje doporučuji podrobit výpočtové simulaci napjatosti a případně jejich úpravu. Tímto se otvírá možnost spolupráce s kolegy ze čtvrtého ročníku, kteří se zabývají pokračováním na projektu Formule Student.

Další úkol diplomové práce spočíval v sestavení jednotlivých navržených komponent do sestavy kola, která se následně začlenila do sestavy vozu. Díky sestavě kola se vizuálně zjistilo, že nedošlo ke kolizi mezi jednotlivými komponenty formulového vozu ve všech důležitých pozicích.

V této diplomové práci byla provedena výpočtová simulace napjatosti navržených 3D modelů při statickém zatížení pomocí metody konečných prvků ve čtyřech jízdních stavech viz. *Tab. 7*. Na základě napěťové analýzy se zjistily místa, ve kterých by se mohly vyskytnout s nejvyšší pravděpodobností první poruchy. Nejvyšší hodnoty napětí se dosahovalo při jízdních stavech „prudké brzdění“ a „vozovka s výmoly“. Na těhlicí se nejvíce koncentrovalo napětí o velikosti 32,3 MPa na konzole pro upevnění brzdového třmene, viz. *obr. 72*. 3D modely podrobené výpočtové simulaci napjatosti lze považovat za vyhovující. Přes tuto skutečnost byla provedena deformačně napěťová analýza konstrukční úpravy těhlice za účelem snížení hmotnosti. První a druhá konstrukční úprava horního segmentu těhlice o hmotnosti 0,065 kg a 0,06 kg s nejvyšší hodnotou redukovaného napětí 53 MPa a 61 MPa se ukázaly po analýze jako vyhovující a je možné další odebrání materiálu. Z provedených simulací napjatosti vychází nejvyšší hodnoty redukovaného napětí v jízdním stavu „prudké brzdění“ u výpočtu první a druhé konstrukční úpravy těhlice a „vozovka s výmoly“ u třetí konstrukční úpravy těhlice. Nejvyšší hodnota redukovaného napětí vzniká na konzole pro



upevnění brzdového třmene u první konstrukční úpravy a v dolní oblasti těhlice viz. *obr. 84, 91* u druhé a třetí konstrukční úpravy. U první konstrukční úpravy, která má hmotnost 1,36 kg, bylo dosaženo nejvyšší hodnoty redukovaného napětí 41,6 MPa, u druhé, vážící 1,18 kg, 50 MPa a u třetí, vážící 0,86 kg, 69 MPa. Nejvyšší deformace se dosahovalo při jízdním stavu „prudké brzdění“ u třetí konstrukční úpravy těhlice, která činí 0,136 mm. Na základě napěťových analýz konstrukčních úprav přední těhlice, lze konstatovat, že jsou vyhovující ve všech jízdních stavech a je možné další odebrání materiálu.

Doporučuji pokračovat v návaznosti na provedené konstrukční řešení, jelikož má těleso těhlice vysokou hmotnost a bezpečnost vzhledem k meznímu stavu pružnosti. Dále doporučuji provést výpočtovou simulaci napjatosti při dynamickém zatížení ke zjištění bezpečnosti vzhledem k meznímu stavu únavového poškození. Výsledné ověření vhodnosti provedeného návrhu jednotlivých částí zavěšení kola pak poskytne samozřejmě ověření v praxi.



POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] JAN, Zdeněk, ŽDÁNSKÝ, Bronislav. *Automobily 1 : podvozky*. 2. vyd. Brno : Avid s.r.o.Brno, 2001. 211 s.
- [2] LNĚNIČKA, M. *Uložení předního kola vozidla Formule Student*. Brno : Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 44 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Pavel Ramík.
- [3] VYMAZAL, R. *Těhlice vozu kategorie Formule SAE*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. 110 s. Vedoucí diplomové práce Ing. David Svída.
- [4] JANDA, Petr. *1 f Podvozek a karoserie* [online]. 2007 [cit. 2011-02-22]. Dostupné z: <<http://www.sosi.cz/texty/1f-podvozek-a-karoserie.pdf>>.
- [5] MUSIL, J. *Přední těhlice vozu formule SAE*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2006. 97 s. Vedoucí diplomové práce Ing. David Svída
- [6] *COLORADO STATE UNIVERSITY* [online] [cit. 2011-01-24] Dostupné z: <<http://www.engr.colostate.edu/RamRacing/>>
- [7] *SKF: Interactive Engineering Catalogue* [online] [cit. 2011-02-07] Dostupné z: <http://www.skf.com/portal/skf/home/products?maincatalogue=1&lang=cs&newlink=3_3_21>
- [8] *SKF: Interactive Engineering Catalogue* [online] [cit. 2011-02-03] Dostupné z: <<http://www.skf.com/skf/productcatalogue/Forwarder?action=PPP&lang=cs&imperial=false&windowName=tabWindow&perfid=127052&prodid=1270521822>>
- [9] ENTERPRISES , Jelsoft. *SOLSTICE FORUM* [online]. 2000-2009 [cit. 2011-03-08]. Dostupné z: <www.solsticeforum.com>.
- [10] *Custom Shed* [online]. 2001 [cit. 2011-03-08]. Dostupné z: <www.fastlane.com.au/Custom_Shed/suspension.jpg>.
- [11] *AUTO PART WAREHOUSE* [online] [cit. 2011-01-28] Dostupné z: <<http://www.autopartswarehouse.com/>>
- [12] *BILLZILLA* [online] [cit. 2011-01-24] Dostupné z: <<http://www.billzilla.org/newrcar.htm>>
- [13] *CONSTRUCTORS F1* [online] [cit. 2011-01-24] Dostupné z: <<http://www.constructorsf1.com/modules.php?name=News&pagenum=3>>
- [14] *The Car Maintenance Bible Renderings in High Res* [online]. 2009 [cit. 2011-03-09]. Dostupné z: <www.carbibles.com/buytheimages.html>
- [15] *FSSRACING*, [online] [cit. 2011-04-21] Dostupné z: <http://fssracing.com/index.php?option=com_content&task=view&id=15&Itemid=19>



- [16] *KTHRACING* [online]. 2008 [cit. 2011-02-28]. Dostupné z: <www.kthracing.se/potd.php>
- [17] *Formula Student Germany* [online]. 2005 [cit. 2011-02-28]. Dostupné z: <<http://www.formulastudent.de/academy/pats-corner/advice-details/article/pats-column-october/>>.
- [18] *ALFUN* [online]. 2008 [cit. 2011-02-28]. Dostupné z: <<http://www.alfun.cz/hlinik-d-EN-AW-7122.html>>.
- [19] *FITECHNICAL* [online]. 2011 [cit. 2011-03-02]. Dostupné z: <<http://www.f1technical.net/forum/viewtopic.php?f=6&t=8861&start=105>>.
- [20] WILWOOD Engineering, Catalog-Technical Parts Guide [PDF formát]. 2008, revized:27.october 2008, [cit. 2011-04-01]. Dostupné z: <http://catalogs.wilwood.com/2008_Tech_Catalog.pdf>
- [21] *Release 11.0 Documentation for ANSYS* [online]. 2005 [cit. 2011-03-15]. SOLID92. Dostupné z: <http://www.kxcad.net/ansys/ANSYS/ansyshelp/Hlp_E_SOLID92.html>.



SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

r_0	[mm]	poloměr rejdu
t	[mm]	tloušťka podložky pro nastavení odklonu kola
y_1	[mm]	souřadnice „osy y“ bodu C souřadného systému FWC
y_2	[mm]	souřadnice „osy y“ bodu G souřadného systému FWC
y_3	[mm]	souřadnice „osy y“ bodu F souřadného systému FWC
C	[-]	hlavní přípojný bod
F	[-]	hlavní přípojný bod
F_x	[N]	síla v kloubu zavěšení ve směru osy x souřadného systému FWC
F_y	[N]	síla v kloubu zavěšení ve směru osy y souřadného systému FWC
F_z	[N]	síla v kloubu zavěšení ve směru osy z souřadného systému FWC
G	[-]	hlavní přípojný bod
Y_0	[mm]	posunutá vzdálenost ve směru osy y při 4° odklonu kola
Y_1	[mm]	posunutá vzdálenost ve směru osy y při 2° odklonu kola
Z_0	[mm]	vzdálenost mezi hlavními přípojnými body C a F
β_0	[°]	úhel odklonu kola 4°
β_1	[°]	úhel odklonu kola 2°
σ	[°]	příklon rejdové osy
ρ	[kg/m ³]	měrná hmotnost
$\sigma_k, R_{p0,2}$	[MPa]	mez kluzu materiálu
σ_{redMAX}	[MPa]	maximální redukované napětí dle hypotézy HMM

Použité zkratky

ET	[mm]	zális disku kola
SV	[-]	souřadný systém středu vozu
FWC	[-]	souřadný systém přední pravé těhlice

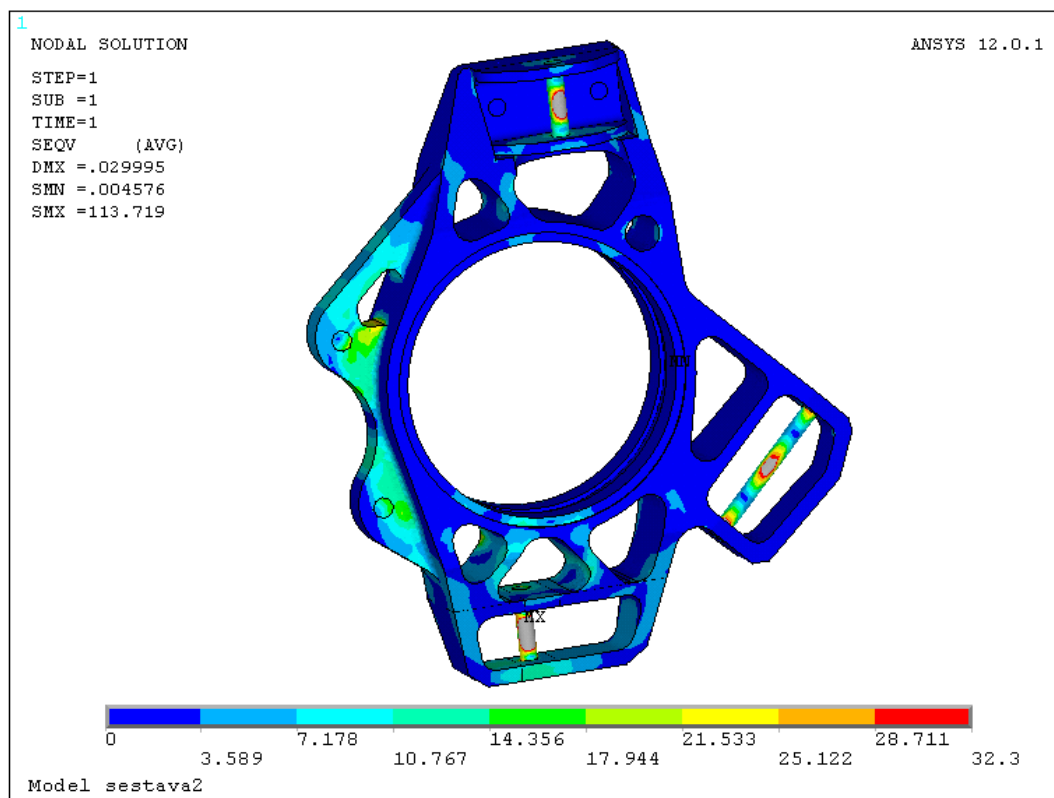


SEZNAM PŘÍLOH

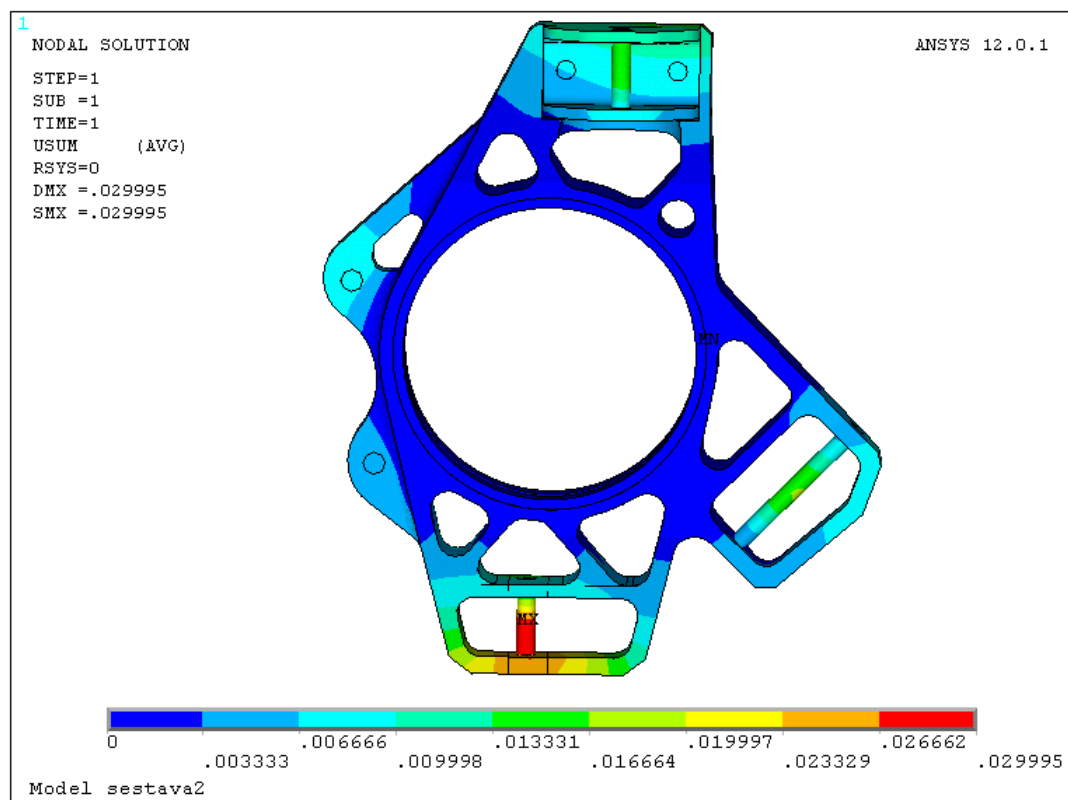
- Příloha 1:** Průběhy redukovaného napětí a deformací pro jednotlivé jízdní stavy přední těhlice
- Příloha 2:** Průběhy redukovaného napětí a deformací pro jednotlivé jízdní stavy první konstrukční úpravy přední těhlice
- Příloha 3:** Průběhy redukovaného napětí a deformací pro jednotlivé jízdní stavy druhé konstrukční úpravy přední těhlice
- Příloha 4:** Průběhy redukovaného napětí a deformací pro jednotlivé jízdní stavy třetí konstrukční úpravy přední těhlice
- Příloha 5:** DVD s obsahem: Elektronická verze diplomové práce (formát .pdf) + výkresy součástí v programu AutoCAD (formát .dwg, .pdf) + 3D modely jednotlivých komponent v programu Pro/ENGINEER + výpočtové simulace napjatosti horního segmentu těhlice, konečné varianty přední těhlice a všech konstrukčních úprav



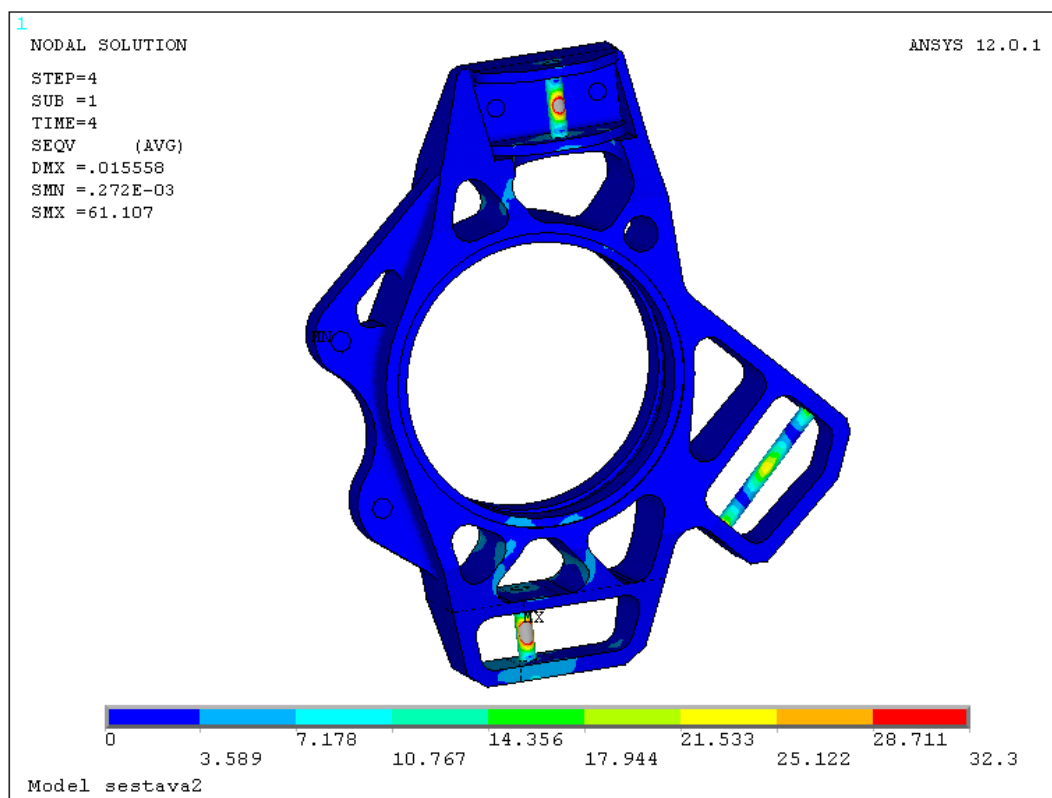
Průběhy redukovaného napětí a deformací pro jednotlivé jízdní stavy přední těhlice



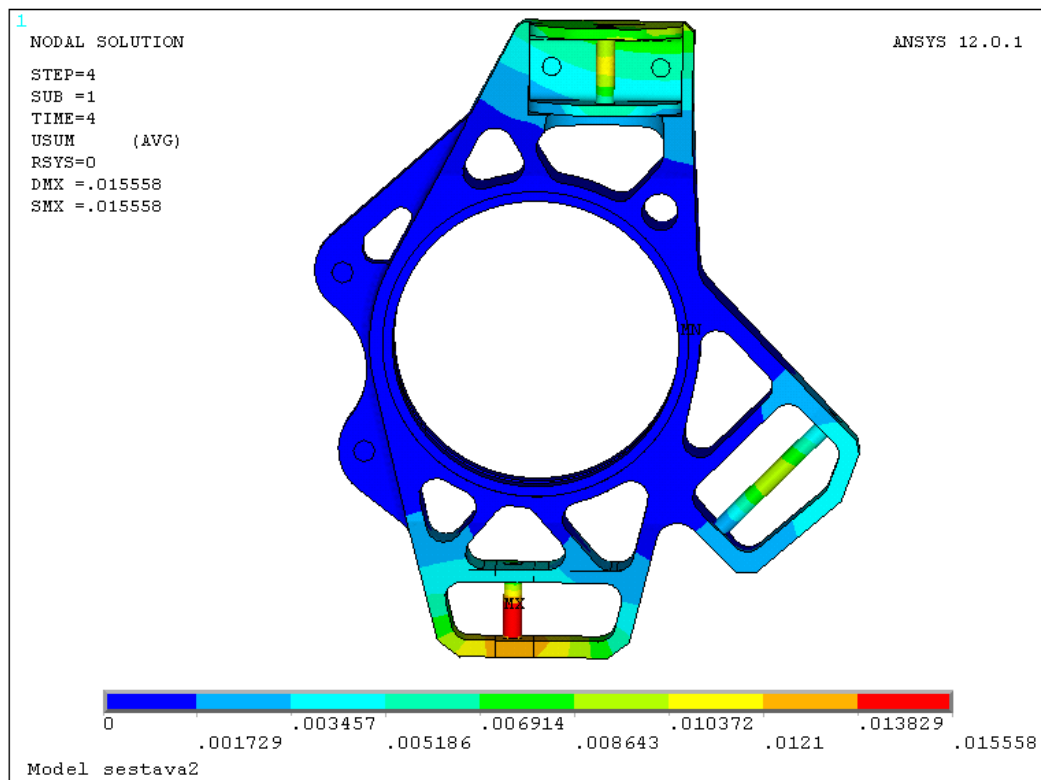
Obr. 1 Průběh redukovaného napětí při jízdním stavu „přejezd nerovnosti“



Obr. 2 Průběh deformace při jízdním stavu „přejezd nerovnosti“



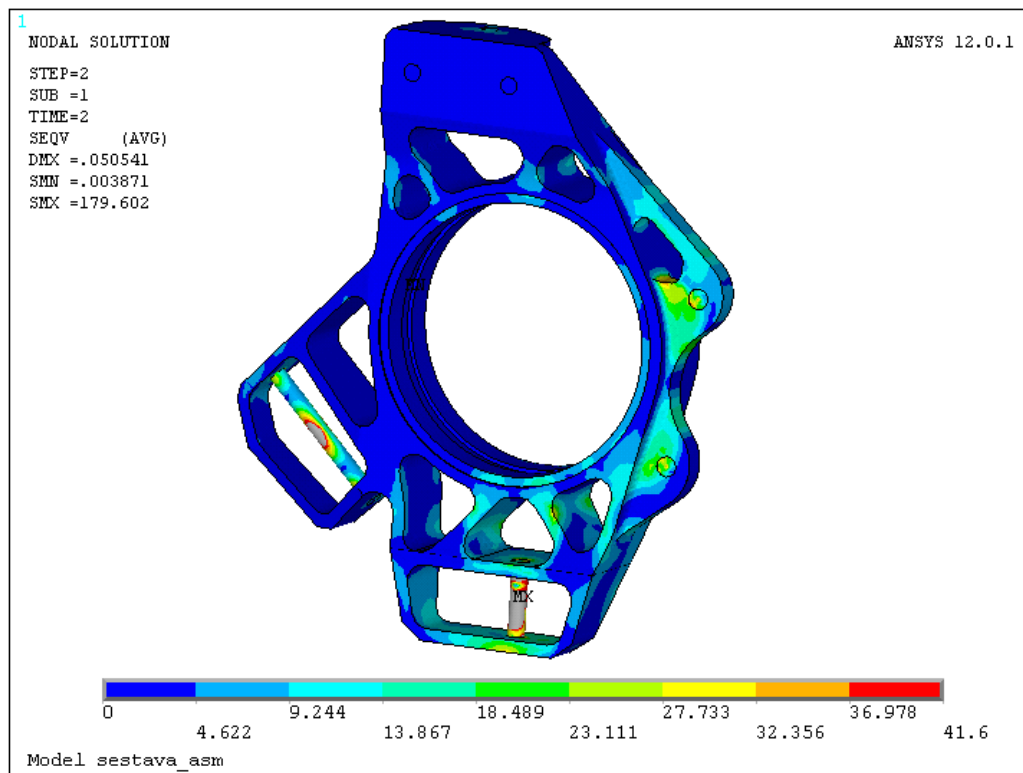
Obr. 3 Průběh redukovaného napětí při jízděm stavu „prudká akcelerace“



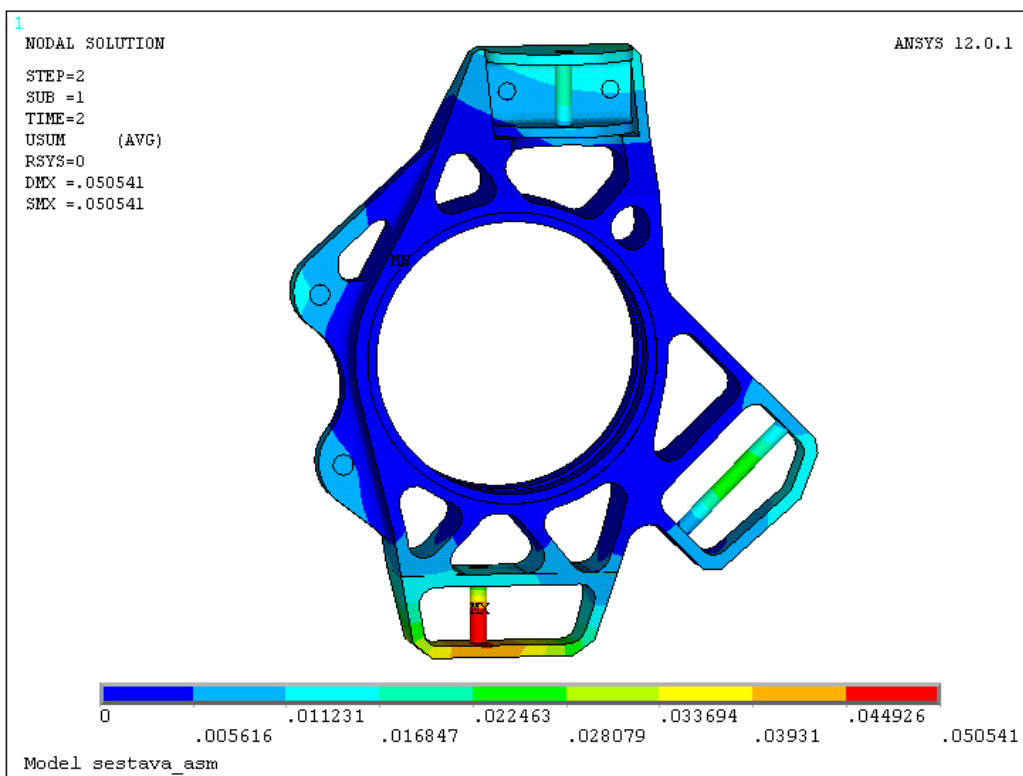
Obr. 4 Průběh deformace při jízděm stavu „prudká akcelerace“



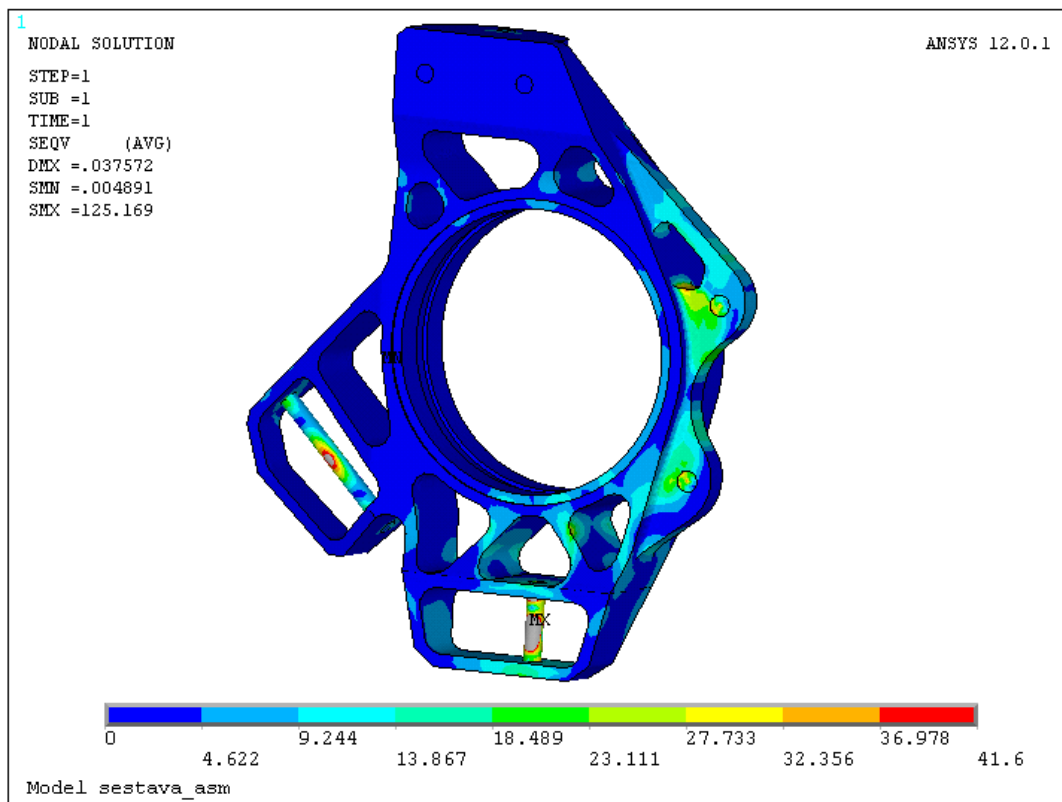
Průběhy redukovaného napětí a deformací pro jednotlivé jízdní stavy první konstrukční úpravy přední těhlice



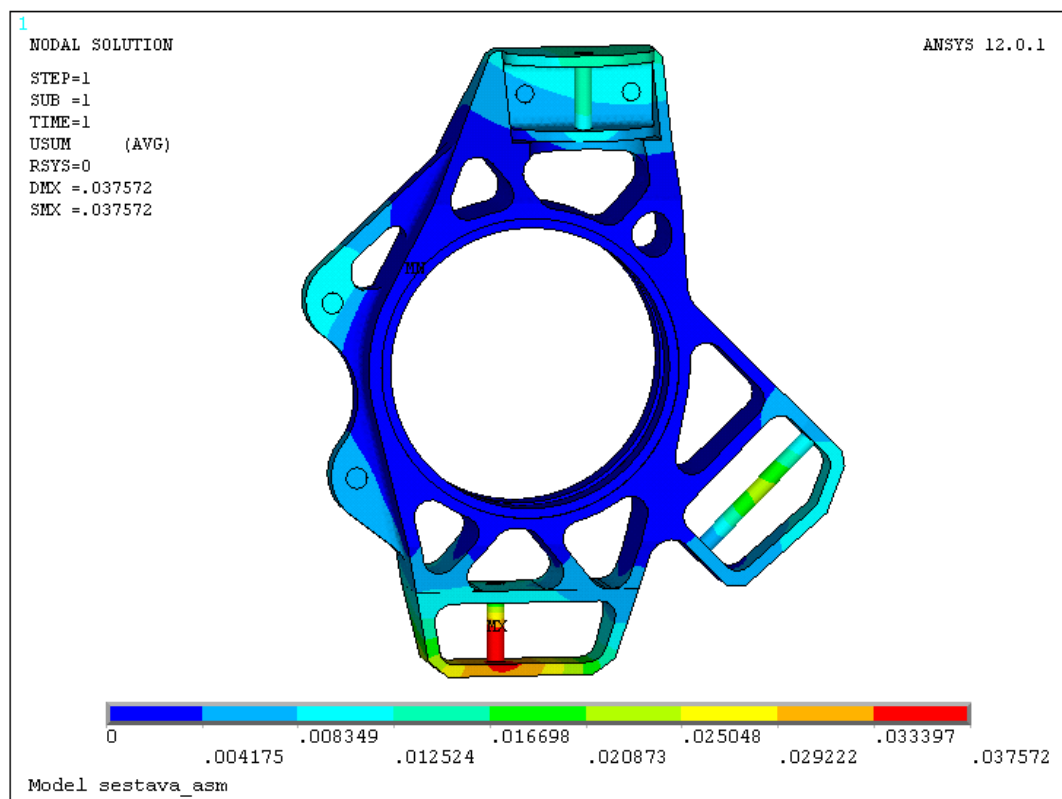
Obr. 5 Průběh reduk. napětí první konstrukční úpravy těhlice při jízdním stavu „vozovka s výmoly“



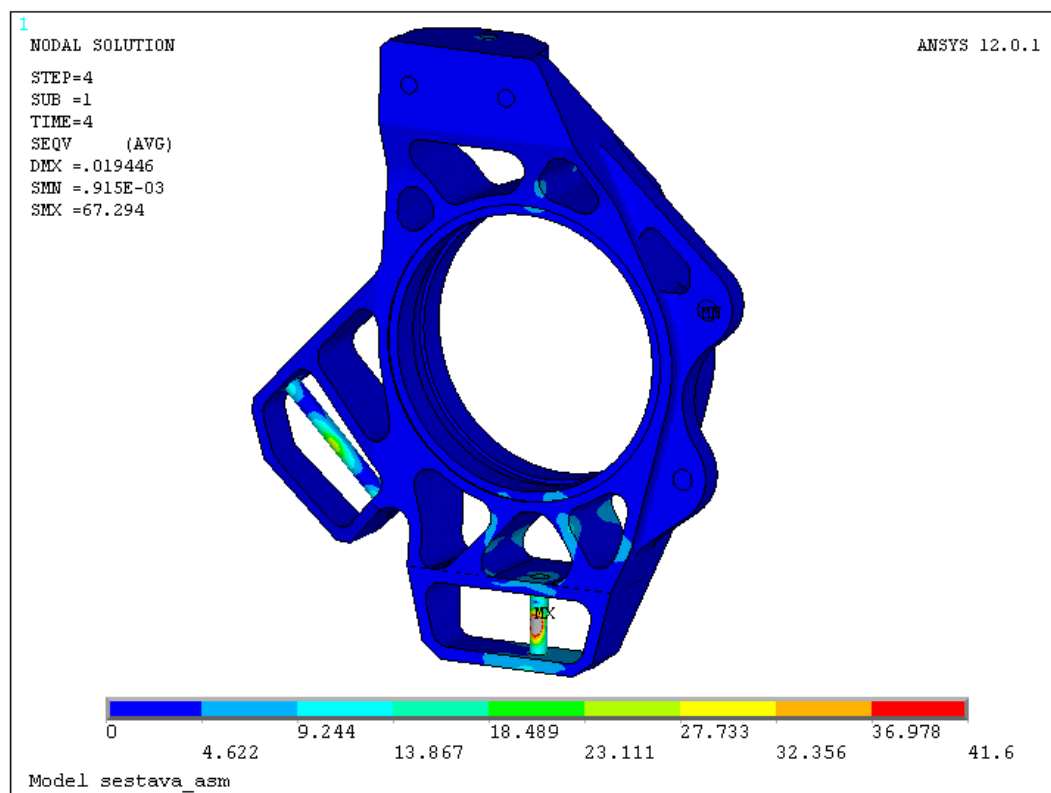
Obr. 6 Průběh deformace první konstrukční úpravy těhlice při jízdním stavu „vozovka s výmoly“



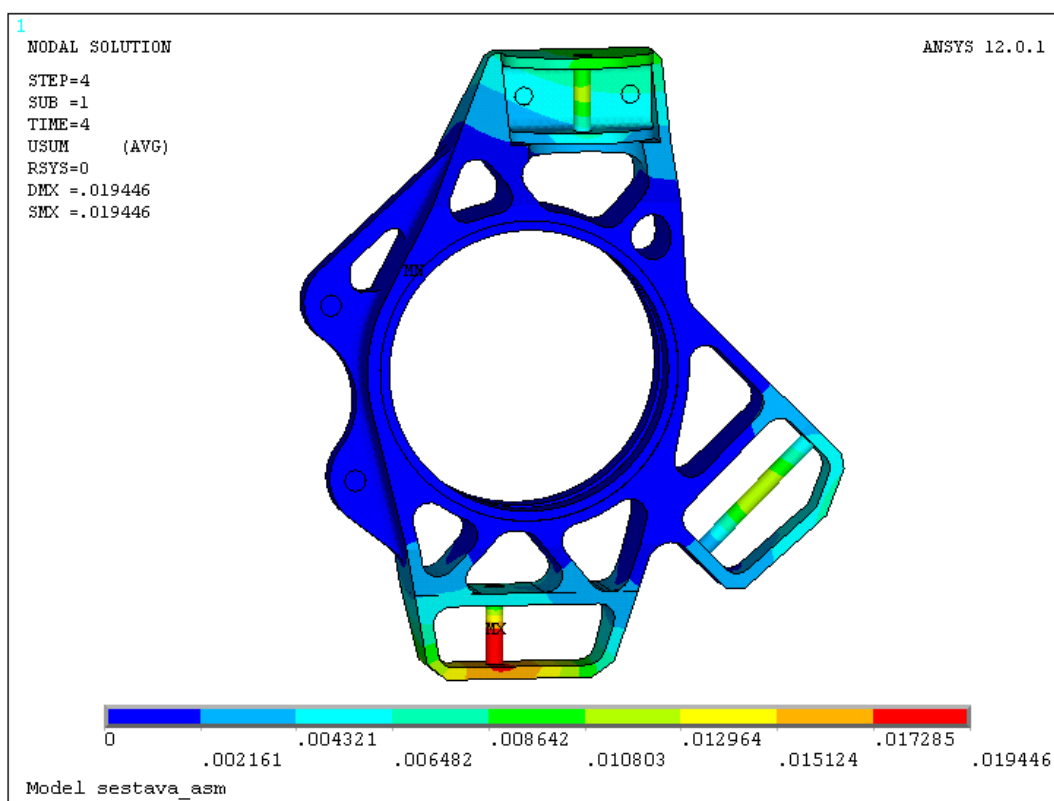
Obr. 7 Průběh redukovaného napětí první konst. úpravy těhlice při jízdním stavu „přejezd nerovnosti“



Obr. 8 Průběh deformace první konstrukční úpravy těhlice při jízdním stavu „přejezd nerovnosti“



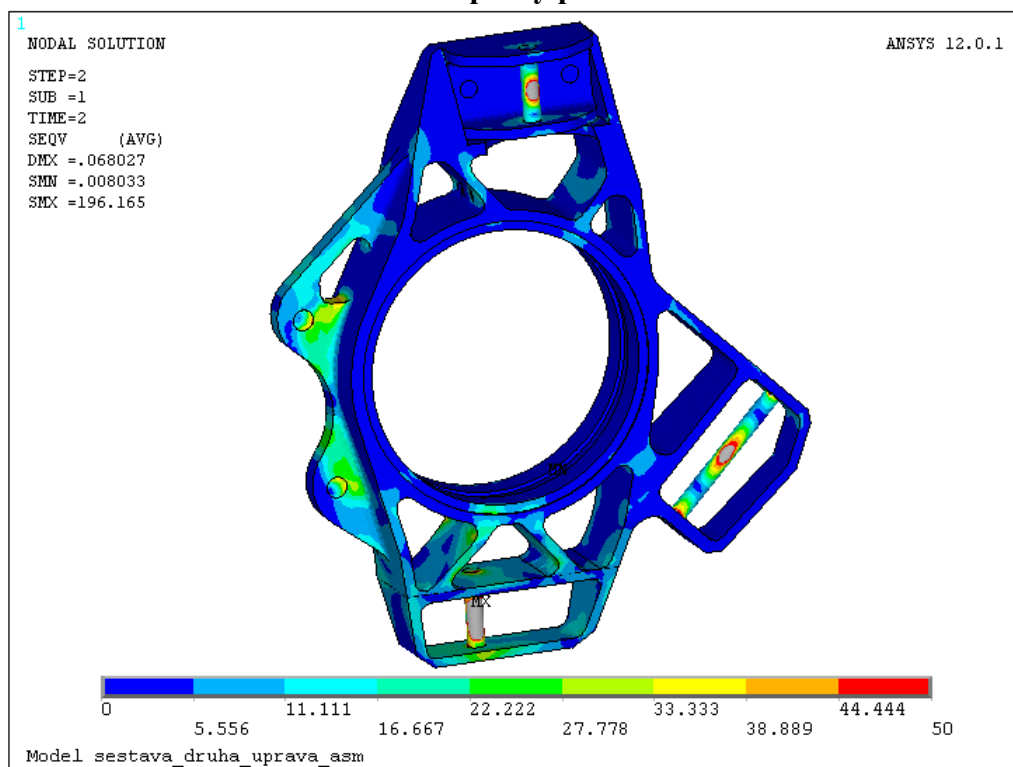
Obr.9 Průběh redukovaného napětí první konst. úpravy těhlice při jízdním stavu „prudká akcelerace“



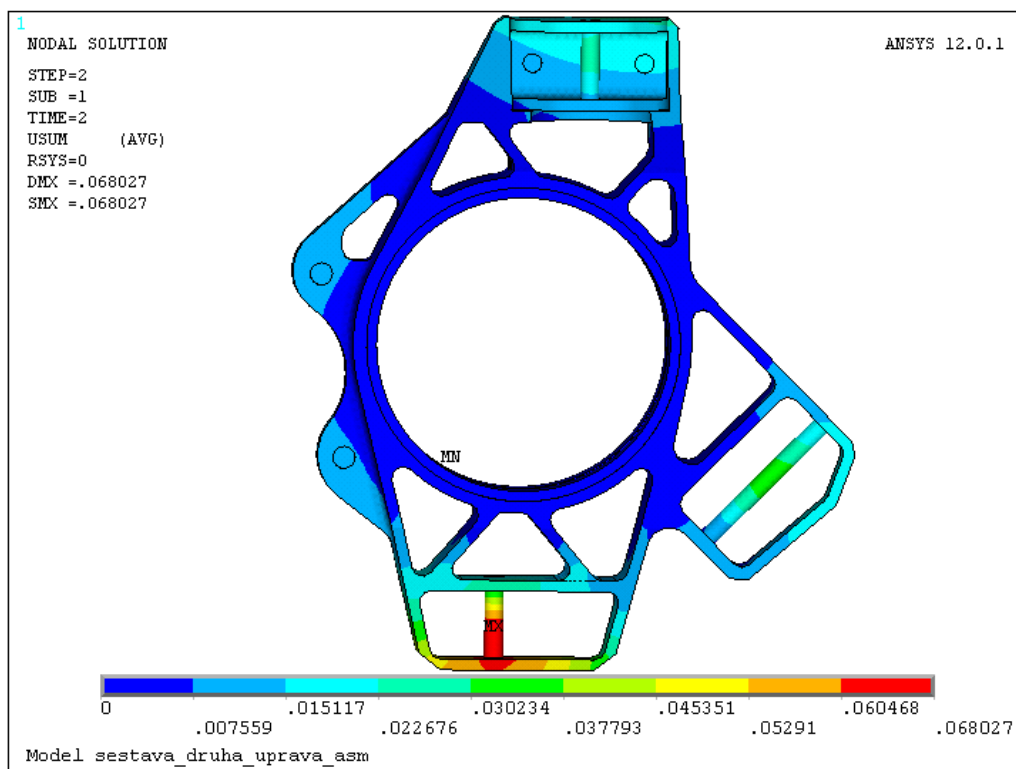
Obr. 10 Průběh deformace první konstrukční úpravy těhlice při jízdním stavu „prudká akcelerace“



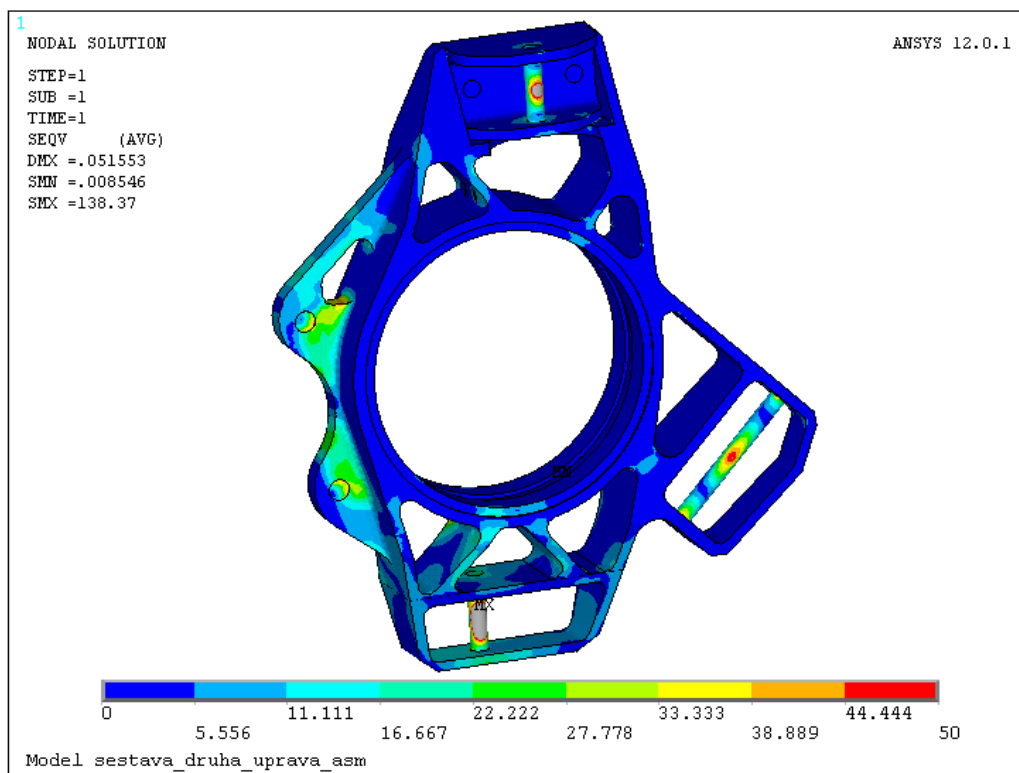
Průběhy redukovaného napětí a deformací pro jednotlivé jízdní stavy druhé konstrukční úpravy přední těhlice



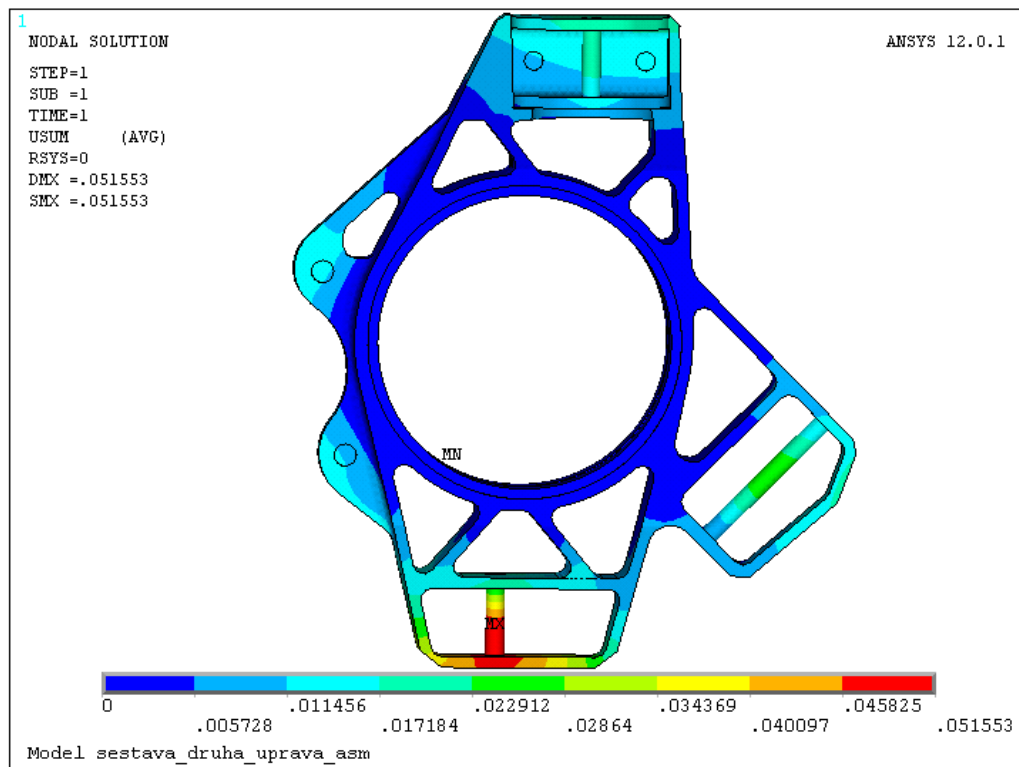
Obr. 11 Průběh reduk. napětí druhé konstrukční úpravy těhlice při jízdním stavu „vozovka s výmoly“



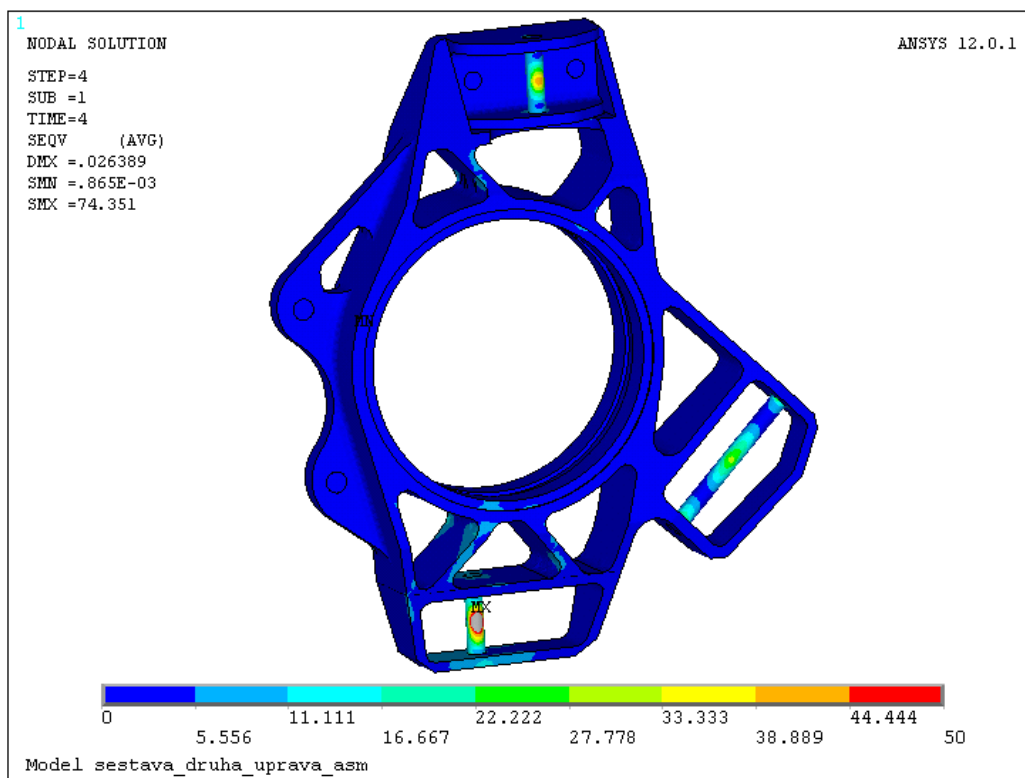
Obr. 12 Průběh deformace druhé konstrukční úpravy těhlice při jízdním stavu „vozovka s výmoly“



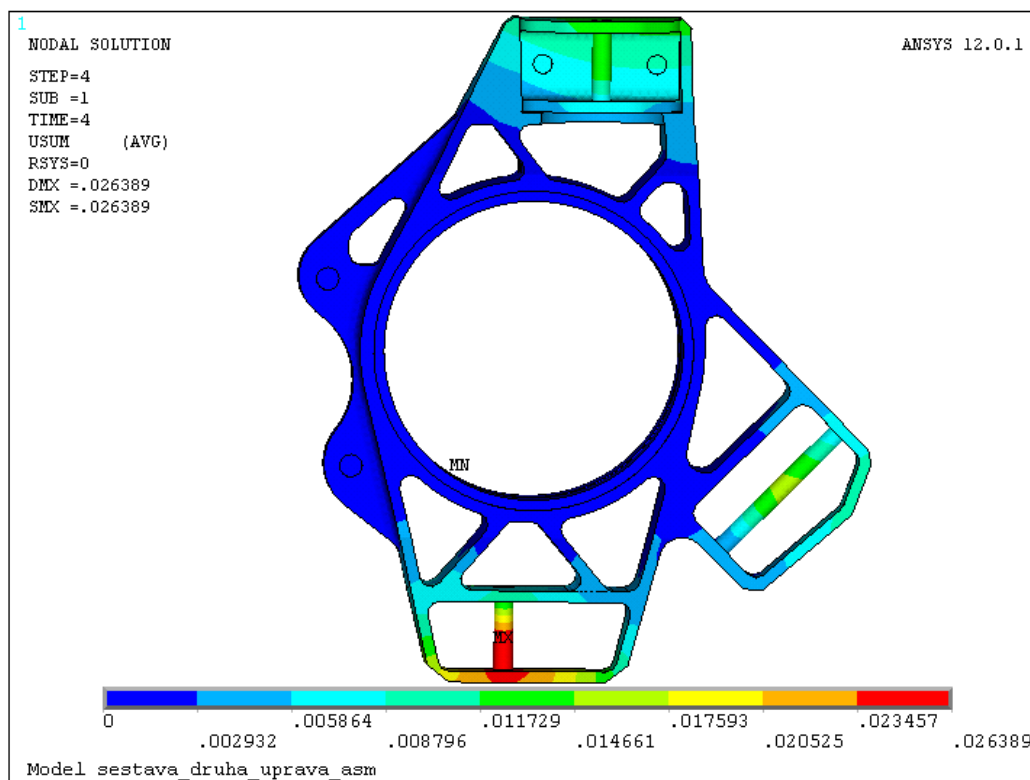
Obr. 13 Průběh redukovaného napětí druhé konstrukční úpravy těhlice při jízdním stavu „přejezd nerovnosti“



Obr. 14 Průběh deformace druhé konstrukční úpravy těhlice při jízdním stavu „přejezd nerovnosti“



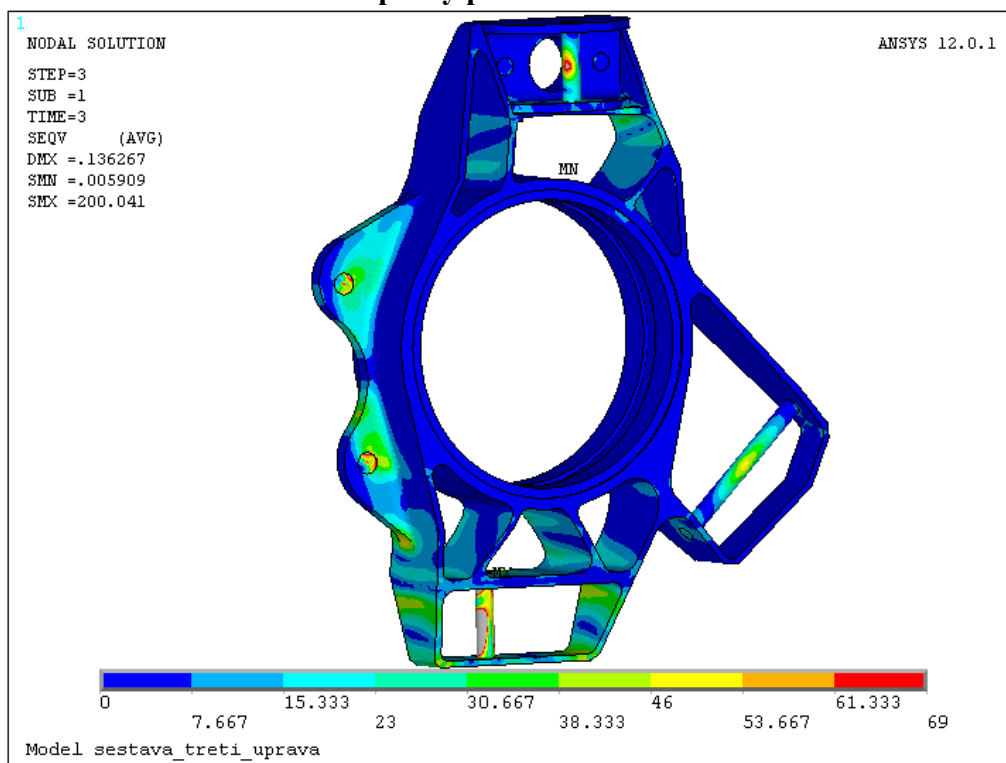
Obr.15 Průběh redukovaného napětí druhé konst. úpravy těhlice při jízdním stavu „prudká akcelerace“



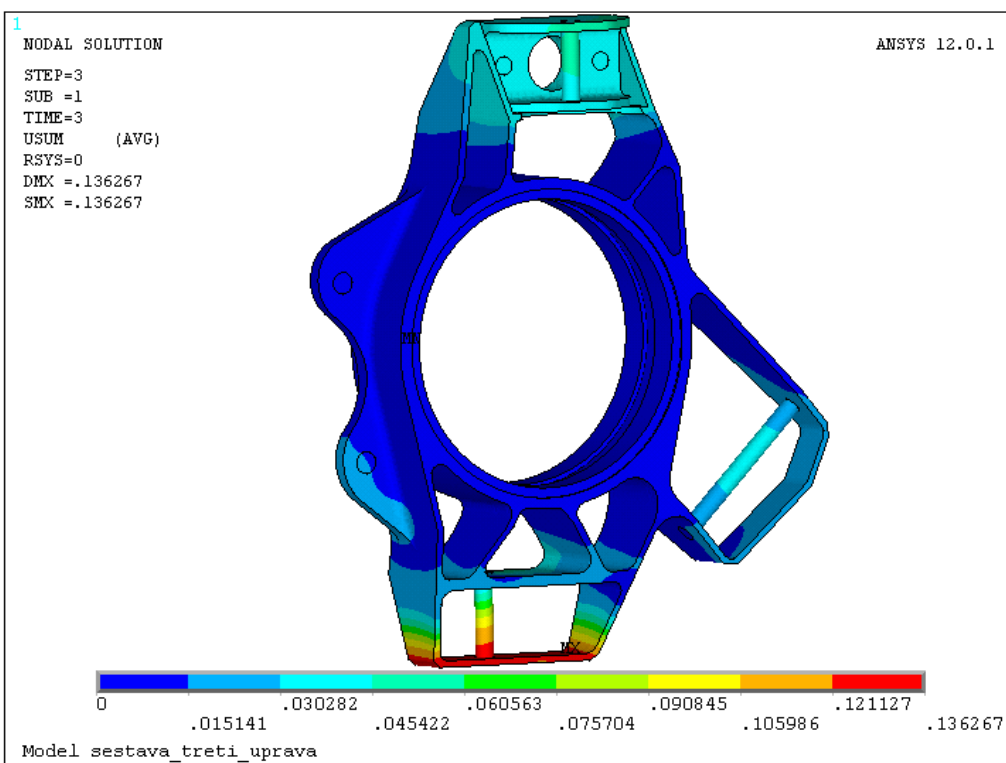
Obr. 16 Průběh deformace druhé konstrukční úpravy těhlice při jízdním stavu „prudká akcelerace“



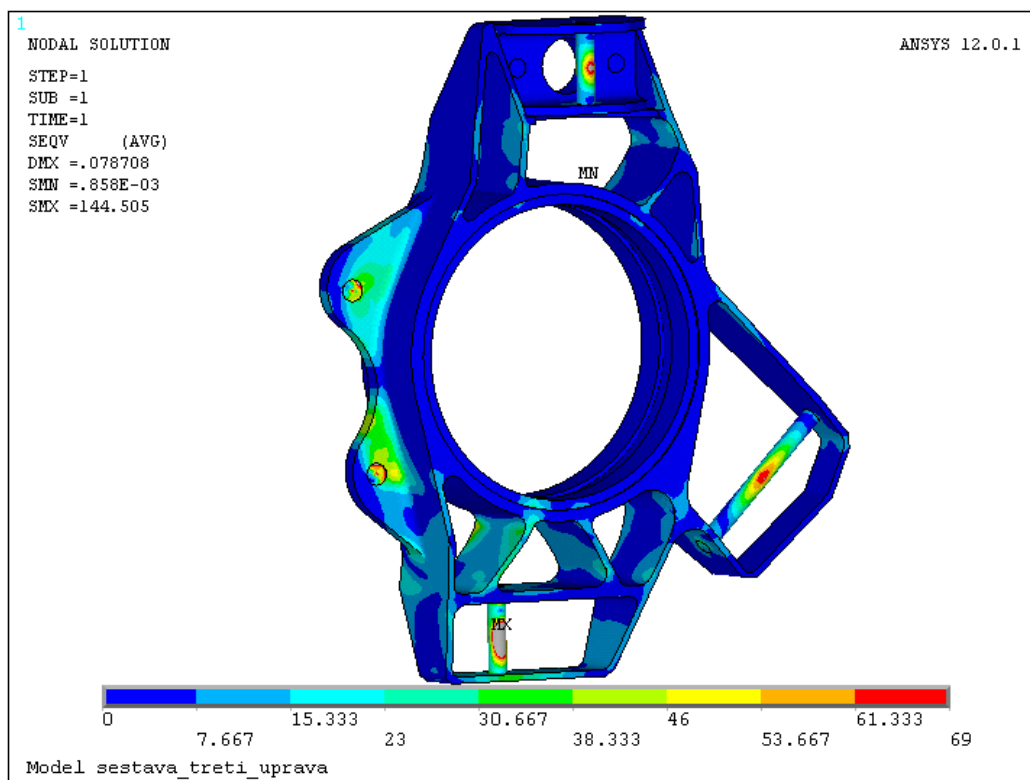
Průběhy redukovaného napětí a deformací pro jednotlivé jízdní stavy třetí konstrukční úpravy přední těhlice



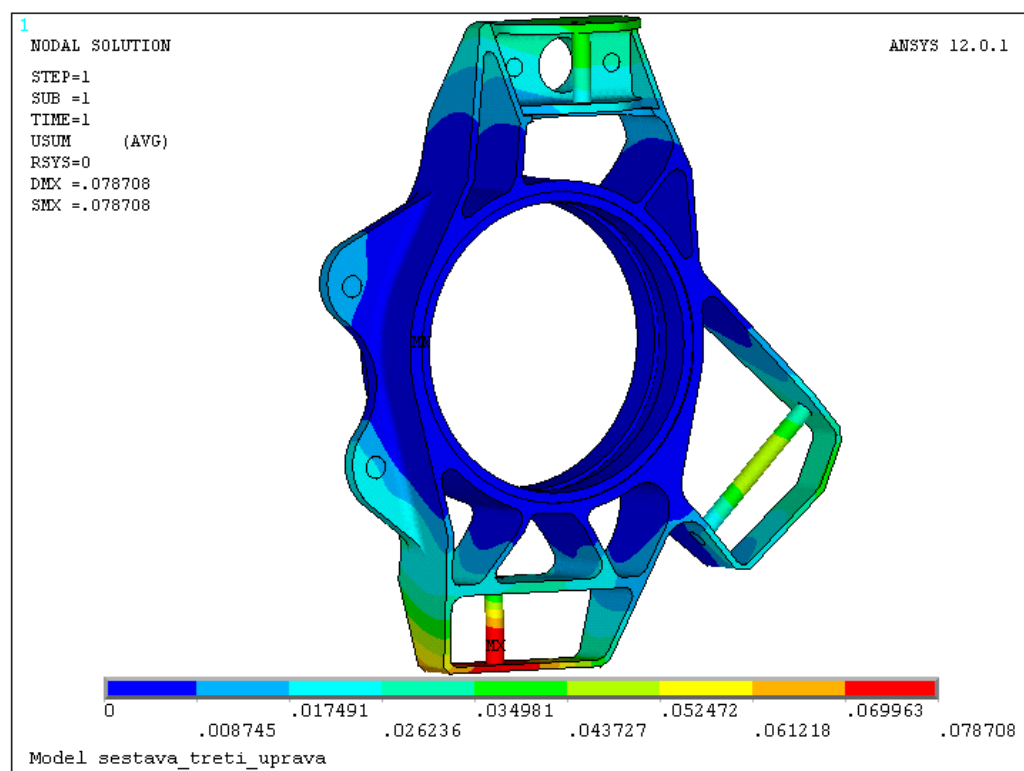
Obr. 17 Průběh redukovaného napětí třetí konstrukční úpravy těhlice při jízdním stavu „prudké brzdění“



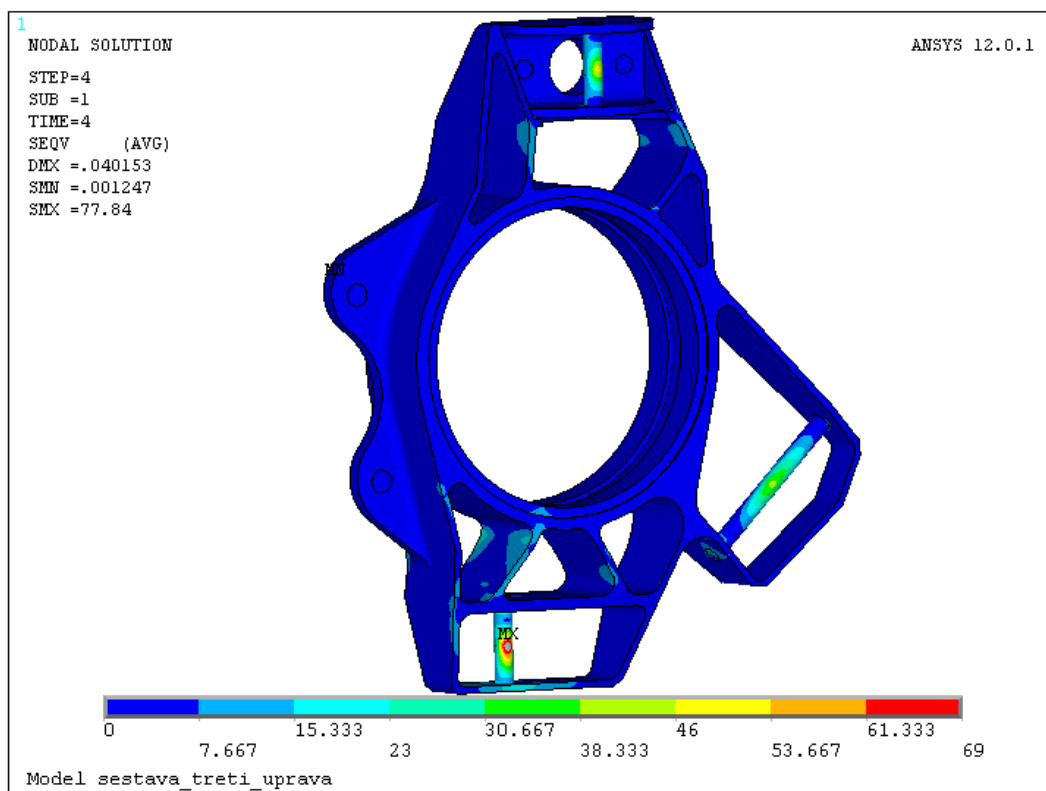
Obr. 18 Průběh deformace třetí konstrukční úpravy těhlice při jízdním stavu „prudké brzdění“



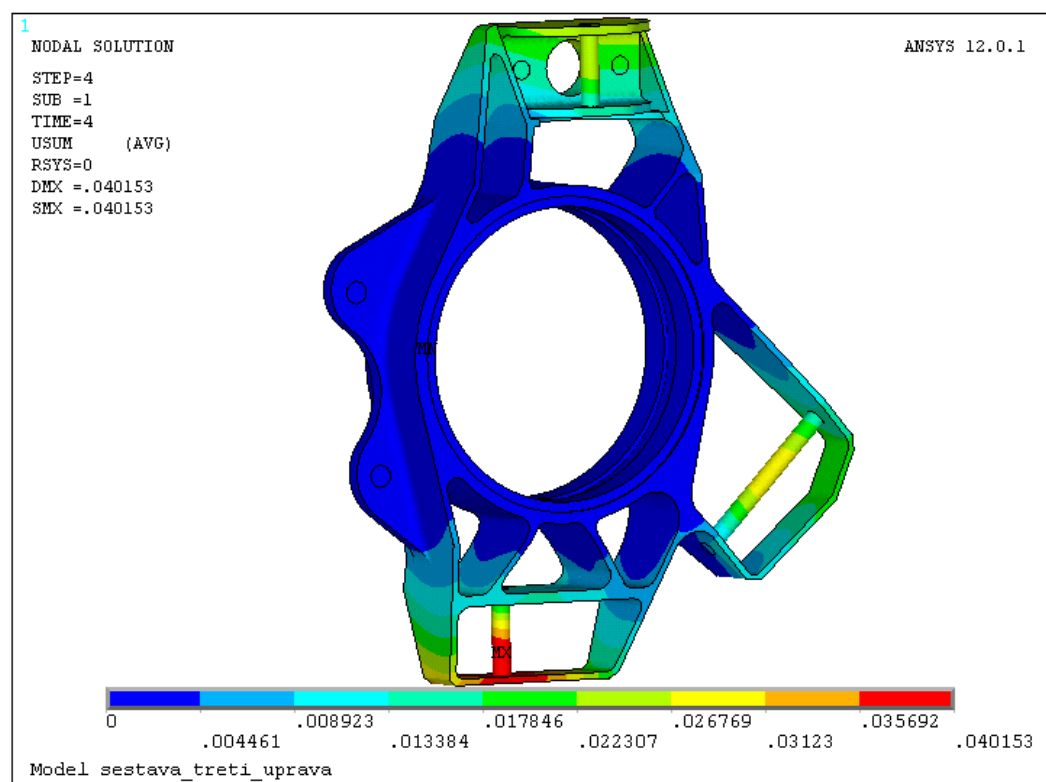
Obr. 19 Průběh redukovaného napětí třetí konstrukční úpravy těhlice při jízdním stavu „přejezd nerovnosti“



Obr. 20 Průběh deformace třetí konstrukční úpravy těhlice při jízdním stavu „přejezd nerovnosti“



Obr.21 Průběh redukovaného napětí třetí konstrukční úpravy těhlice při jízdním stavu „prudká akcelerace“



Obr. 22 Průběh deformace třetí konstrukční úpravy těhlice při jízdním stavu „prudká akcelerace“