



**FAKULTA  
STROJNÍ  
ČVUT V PRAZE**

**Ústav technologie obrábění, projektování a  
metrologie**

## **Bakalářská práce**

**Návrh a výroba části kolové skupiny**

**Michal Bouček**

**Praha**

**24. května 2024**

Vedoucí práce: Ing. Michal Slaný

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Bouček** Jméno: **Michal** Osobní číslo: **509170**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávací katedra/ústav: **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**  
Studijní program: **Teoretický základ strojího inženýrství**  
Studijní obor: **bez oboru**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Návrh a výroba části kolové skupiny**

Název bakalářské práce anglicky:

**Design and manufacture of a wheel group part**

Pokyny pro vypracování:

Rešerše řešení a stanovení provozních podmínek.  
Konstrukční návrh.  
Pevnostní kontrola.  
Návrh přípravků.  
Výrobní postup.

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

**Ing. Michal Slaný ústav technologie obrábění, projektování a metrologie FS**

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **03.04.2024**

Termín odevzdání bakalářské práce: **05.08.2024**

Platnost zadání bakalářské práce: \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_  
Ing. Michal Slaný  
podpis vedoucí(ho) práce

\_\_\_\_\_  
Ing. Libor Beránek, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

\_\_\_\_\_  
doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_  
Podpis studenta

---

*Název práce:*

**Návrh a výroba části kolové skupiny**

*Autor:* Michal Bouček

*Studijní program:* Teoretický základ strojního inženýrství

*Obor:* bez oboru

*Druh práce:* Bakalářská práce

*Vedoucí práce:* Ing. Michal Slaný

*Ústav* Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie,  
Fakulta strojní, České vysoké učení technické v Praze

*Abstrakt:* Práce se zabývá návrhem a výrobou nosného dílu náboje kolové skupiny závodního vozu, typu Formula Student, pro tým eForce Prague Formula. V teoretické části jsou popsány funkce tohoto dílu v kolové skupině a jeho různá konstrukční provedení. V praktické části je popsán konstrukční návrh náboje. Návrh vychází z původního řešení z minulých let, přičemž byl kladen důraz na odstranění jeho předešlých nedostatků. Konstrukce je podložena analytickými výpočty a numerickými simulacemi v programu Ansys Mechanical. Součástí práce je i návrh výrobního postupu pro tento díl.

*Klíčová slova:* náboj kola, návrh a výroba, MKP, CAM

---

*Title:*

**Design and manufacture of a wheel group part**

*Author:* Michal Bouček

*Study programme* Mechanical engineering

*Obor:* bez oboru

*Type of thesis* Bachelor

*Supervisor:* Ing. Michal Slaný

*Department* Department of Machining, Process Planning and Metrology

*Abstract:* The purpose of this thesis is design and production of wheel hub of the wheel group for a Formula Student racing car, for the eForce Prague Formula team. The theoretical part describes the functions of this part in the wheel group and its various structural designs. The practical part describes the design of the hub. The design is based on the original design from previous years, with the focus on eliminating its previous shortcomings. The design is supported by analytical calculations and numerical simulations in Ansys Mechanical. The design of the manufacturing process for this part is also part of the work.

*Key words:* wheel hub, design and manufacturing, FEM, CAM



---

# Prohlášení

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

V Praze

24. května 2024

.....  
Michal Bouček

---

## Poděkování

Děkuji vedoucímu práce Ing. Michalovi Slanému za přínosné konzultace, pomoc a odborné vedení této bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Martinovi Štarmanovi za konzultace MKP výpočtů. Děkuji také týmu eForce Prague Formula za možnost pracovat na takto zajímavém projektu. V neposlední řadě také děkuji své rodině a přátelům za podporu.

---

## Seznam symbolů použitých v textu

značka	jednotka	definiční vztah	název
$Rp_{0,2}$	[MPa]		Smluvní mez kluzu
$F$	[N]		Síla
$k$	[-]		Bezpečnostní koeficient
$M_{br}$	[Nm]		Brzdný moment
$r_{pneu}$	[m]		Poloměr pneumatiky vozu FSE.12 a CTU.24
$\alpha$	[°]		Úhel
$p_{kont}$	[MPa]		Kontaktní tlak
$M_{kr}$	[Nm]		Kroutící moment
$v_c$	[m/min]		Řezná rychlost
$n$	[ot/min]		Otáčky
$f_z$	[mm]		Posuv na zub
$a_p$	[mm]		Hloubka řezu
$f_n$	[mm/ot]		Posuv na otáčku
$f$	[mm/ot]		Posuv na otáčku

---

## Seznam indexů a zkratek

	<b>význam</b>
FEM	Metoda konečných prvků
ČVUT	České vysoké učení technické
CTU.24	Monopost týmu eForce Prague Formula pro rok 2024
F1	Formule 1
FSE	Formula Student Electric
EN AW-7075	Hliníková slitina
T6	Druh tepelného zpracování
MKP	Metoda konečných prvků
CAM	Počítačová podpora obrábění
FEE	Fakulta elektrotechnická
FSE.12	Monopost týmu eForce FEE Prague Formula pro rok 2023
FS.15	Monopost týmu CTU CarTech pro rok 2024
FDA	Americký úřad pro kontrolu potravin a léčiv
NBR	Butadien-akrylonitrilový kaučuk
DIN 3760	Německá norma pro těsnění

---

# Obsah

<b>Úvod</b>	<b>9</b>
<b>1 Teoretická část</b>	<b>10</b>
1.1 Kolová skupina . . . . .	10
1.1.1 Těhlice . . . . .	11
1.1.2 Kolová ložiska . . . . .	11
1.1.3 Brzdový systém . . . . .	11
1.1.4 Náboj kola . . . . .	11
1.2 Konstrukční řešení náboje kolové skupiny . . . . .	11
1.2.1 Základní principy uložení kola . . . . .	12
1.2.2 Ložiskové jednotky třetí generace . . . . .	13
1.2.3 Kolová skupina monopostu FSE.12 . . . . .	14
1.3 Používané materiály a technologie výroby náboje . . . . .	15
1.3.1 Náboje pro ložiskové jednotky třetí generace . . . . .	15
1.3.2 Materiály a technologie výroby náboje pro závodní vozy . . . . .	16
<b>2 Konstrukční návrh</b>	<b>19</b>
2.1 Silové účinky . . . . .	19
2.1.1 Zavedení orientace působících sil . . . . .	19
2.1.2 Uvažované síly pro výpočet . . . . .	20
2.2 Kontura náboje . . . . .	22
2.2.1 Změna pozice ložisek . . . . .	22
2.2.2 Ložisková matice . . . . .	23
2.2.3 Odlehčení . . . . .	23
2.2.4 Kolové šrouby . . . . .	25
2.3 Těsnění převodovky . . . . .	26
2.3.1 Těsnění na vnější straně . . . . .	26
2.3.2 Těsnění na vnitřní straně . . . . .	31
2.3.3 Servisovatelnost . . . . .	34
2.4 Uložení brzdového kotouče . . . . .	35

---

2.4.1	Výpočet kontaktního tlaku pro konstrukci na monopostu FSE.12	35
2.4.2	Navrhované změny . . . . .	36
2.4.3	Kontrolní MKP výpočet . . . . .	38
2.5	Uložení korunového kola . . . . .	40
2.5.1	Výpočet kontaktního tlaku pro konstrukci na monopostu FSE.12	40
2.5.2	Navrhované změny . . . . .	41
2.5.3	Kontrolní MKP výpočet . . . . .	42
2.6	Kontrolní MKP výpočet sestavy . . . . .	43
2.6.1	Okrajové podmínky . . . . .	44
2.6.2	Výsledky MKP výpočtu . . . . .	44
<b>3</b>	<b>Výroba</b>	<b>46</b>
3.1	Zvolená technologie výroby . . . . .	46
3.2	Technologičnost konstrukce . . . . .	46
3.2.1	Plocha pro ložiska . . . . .	46
3.2.2	Uchycení kotouče a korunového kola . . . . .	47
3.3	Návrh upínacích přípravků . . . . .	47
3.4	Výrobní postup . . . . .	48
3.4.1	Volba polotovaru . . . . .	48
3.4.2	Řezání polotovaru . . . . .	48
3.4.3	Hrubování na frézce . . . . .	49
3.4.4	Obrábění na soustruhu . . . . .	52
3.4.5	Upíchnutí náboje od polotovaru . . . . .	55
3.4.6	Operace frézování . . . . .	55
3.5	Použité stroje . . . . .	62
3.5.1	Pásová pila Pilous ARG 300 plus S. A. F7 . . . . .	62
3.5.2	CNC frézka HAAS VF-2 . . . . .	63
3.5.3	Okuma GENOS L200E-MY . . . . .	64
3.6	Použité nástroje . . . . .	65
3.7	Zhodnocení výrobního postupu . . . . .	69
	<b>Závěr</b>	<b>71</b>
	<b>Zdroje</b>	<b>75</b>
	<b>Seznam tabulek</b>	<b>76</b>
	<b>Seznam obrázků</b>	<b>78</b>

---

Seznam použitého SW	79
Seznam příloh	80

## Úvod

V dnešní době jsou elektrická vozidla stále častěji diskutovaným tématem. Konstrukce a vývoj této platformy vozidel přináší pro konstruktéry a technology stále nové výzvy. Ve stejném směru se v posledních letech vyvíjí i soutěž Formula Student, která je zaměřena na konstrukci, výrobu, testování a závodění s malým závodním vozidlem typu formule. Této soutěže se mohou zúčastnit studenti vysokých škol a poskytuje jim jedinečnou příležitost zapojit se do vývoje a stavby závodního vozu.

Tato postupná změna je také výzvou pro studenty, kteří byli v minulosti součástí týmů, které stavěly monoposty se spalovacím motorem. Obdobně je to i v mém případě. V minulé sezóně jsem byl součástí týmu CTU CarTech, který stavěl hybridní monopost. Pro tuto novou sezónu však na ČVUT došlo ke sloučení týmů, které stavěly spalovací a elektrické monoposty. Vznikl tak nový tým eForce Prague Formula, pro jehož nejnovější monopost CTU.24 budu v této práci navrhovat náboj kolové skupiny.

Cílem této práce je provést konstrukční návrh náboje kolové skupiny pro elektrické vozidlo typu Formula Student. Návrh bude založen na předešlé konstrukci, mojí snahou bude odstranit všechny jeho nedostatky. Nová konstrukce bude podložena analytickými výpočty a numerickými simulacemi v programu Ansys Mechanical. Dalším cílem práce je navrhnout výrobní postup a přípravky pro výrobu náboje. Výrobní postup musí být navrhnout tak, aby bylo možné díl vyrobit v laboratořích Ústavu obrábění, projektování a metrologie.

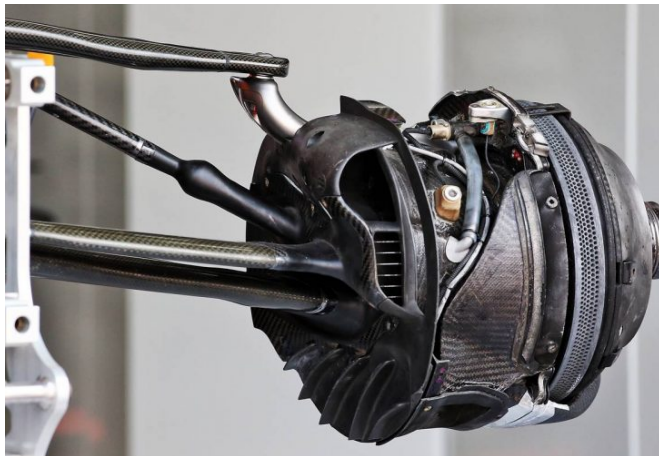


# 1 Teoretická část

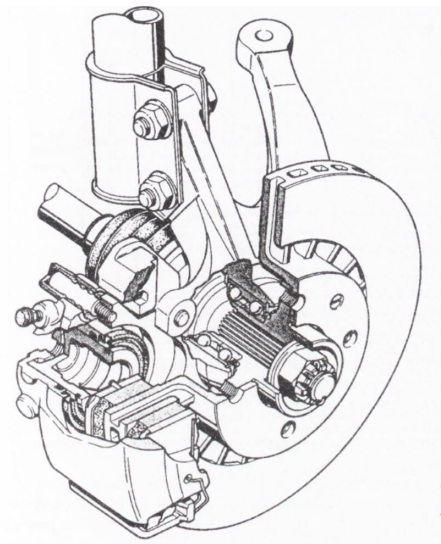
Teoretická část se týká popisu kolové skupiny jako celku, včetně jednotlivých dílů a jejich funkcí. Jsou zde popsána různá konstrukční řešení náboje kolové skupiny. Dále jsou v této kapitole popsány materiály a technologie výroby náboje.

## 1.1 Kolová skupina

Kolová skupina je klíčovou součástí podvozku vozidla. Jedná se o sestavu dílů na vozidle, ke které je připevněno kolo s pneumatikou a nápravy vozidla. Společně s těmito díly nese kolová skupina hmotnost vozidla a přenáší síly mezi vozovkou a vozidlem [1]. V následujících podkapitolách stručně popíši jednotlivé části kolové skupiny a jejich funkce.



Obrázek 1.1: Kolová skupina vozu F1, převzato z [2]



Obrázek 1.2: Konvenční kolová skupina, převzato z [3]

### 1.1.1 Těhlice

Těhlice je hlavní nosnou částí kolové skupiny. Jsou na ní upevněna kolová ložiska. Těhlice je spojená s dalšími členy náprav vozidla. Dále je také na těhlici připevněn brzdový třmen[1].

### 1.1.2 Kolová ložiska

Aby mohl být zajištěn otáčivý pohyb kola, je třeba použít ložiska. Ložiska přenášejí síly, které působí ve stopě pneumatiky na vozidlo. Dále uložení pomocí ložisek může poskytovat uložení bez vůle, což je nutné k přesnému otáčení kola. Ložiska se používají valivá, a to kuželíková nebo kuličková s kosoúhlým stykem. Musí být totiž schopna přenést jak radiální, tak axiální síly. Kuželíková ložiska se používají spíše u náprav s většími zatíženími, jako například u nákladních vozidel. U osobních automobilů se používají ložiska s kosoúhlým stykem[3].

### 1.1.3 Brzdový systém

Brzdový systém na vozidle má za úkol snížení rychlosti vozidla. V oblasti kolové skupiny se nachází brzdový třmen, brzdový kotouč a vedení hydraulické brzdové kapaliny. Dalším možným konstrukčním řešením je použití bubnu s brzdovými čelistmi [3].

### 1.1.4 Náboj kola

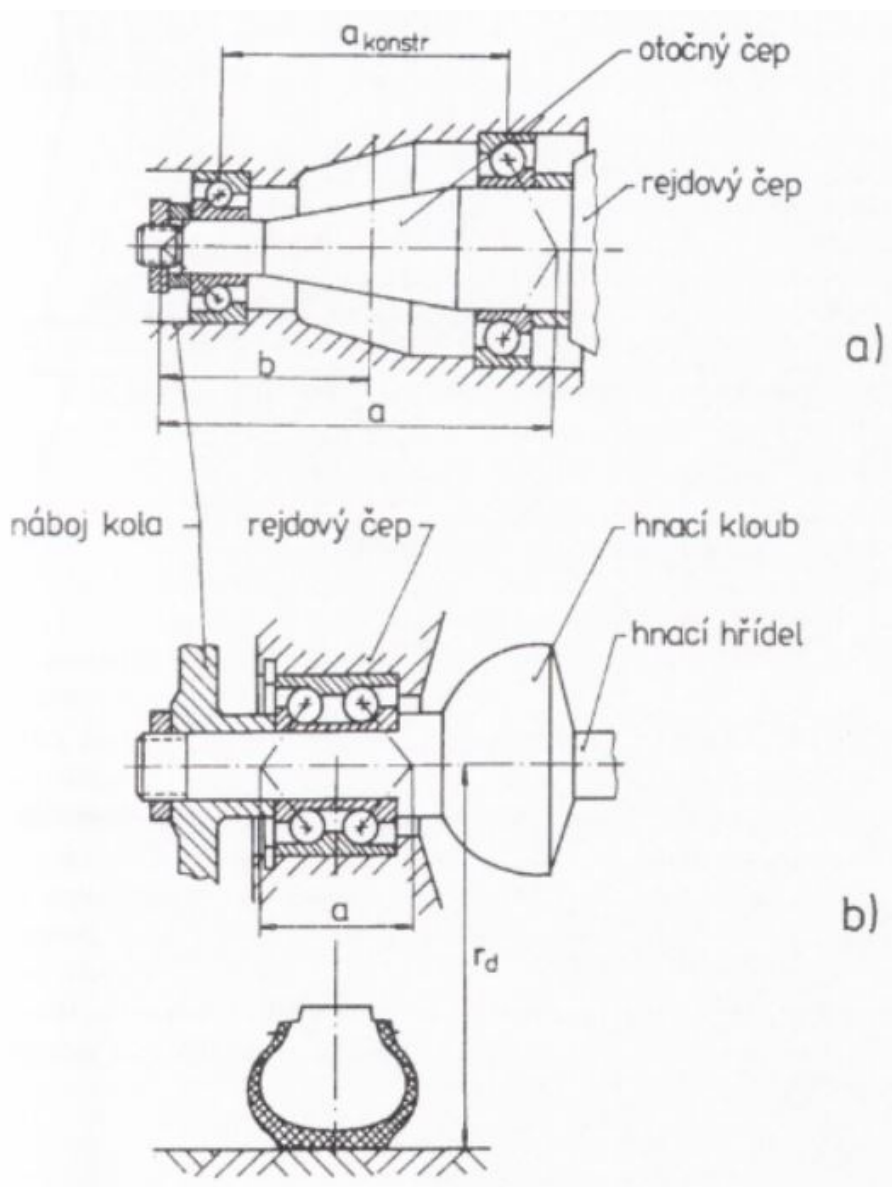
Náboj kola je připevněn ke kolovým ložiskům. Na druhé straně je na něj nasazen límec kola s pneumatikou. Při jízdě náboj společně s kolem koná rotační pohyb. V některých aplikacích se mezi nábojem a límcem kola pro spojení ještě používá střed kola.

## 1.2 Konstrukční řešení náboje kolové skupiny

V této kapitole budou vysvětlena možná konstrukční řešení náboje kolové skupiny. Bude zde popsán základní princip uložení kola a konstrukční řešení náboje u osobních a závodních vozů.

### 1.2.1 Základní principy uložení kola

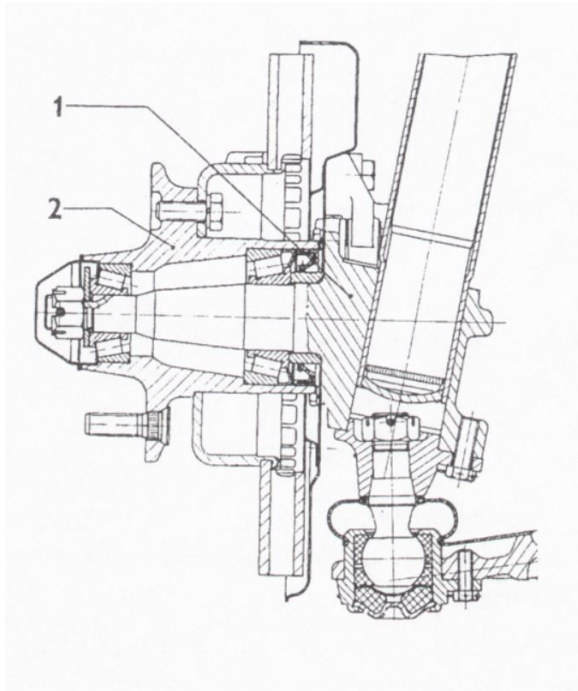
Jak bylo již popsané v kapitole 1.1.2, pro správnou funkci otáčení kola je ideální použít uložení kola bez vůle. Na obrázku 1.3 jsou zobrazeny dva základní principy uložení kola. Na schématu *a* je možné vidět uložení pomocí dvou navzájem sepnutých ložisek. Ložisková vůle je zde vymezována dotahováním ložiskové matice. Konstrukční vzdálenost ložisek  $a_{konstr}$  je menší než účinná vzdálenost  $a$  [3].



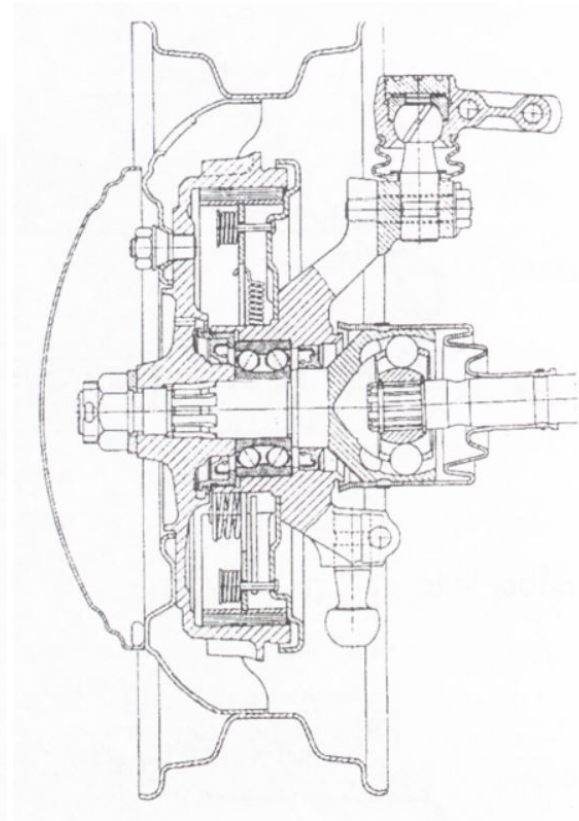
Obrázek 1.3: Základní principy uložení kola, převzato z [3]

Na obrázku 1.3 schématu *b* je zobrazeno uložení kola pomocí dvouřadého ložiska. Použitím tohoto ložiska dochází k velké prostorové úspoře. Nevýhodou tohoto řešení je však nemožnost seřídít ložiskovou vůli.

Na obrázku 1.4 je zobrazeno uložení předního kola automobilu Tatra 613. Princip uložení je stejný, jako na obrázku 1.3 schématu *a*. Díl označený jako *1* je otočný čep kola. Díl *2* je náboj kola. K náboji se z vnější strany připevňuje límec kola s pneumatikou. Na vnitřní straně náboje je připevněn brzdový kotouč.



Obrázek 1.4: Uložení předního kola automobilu Tatra 613, převzato z [3]



Obrázek 1.5: Uložení předního poháněného kola, převzato z [3]

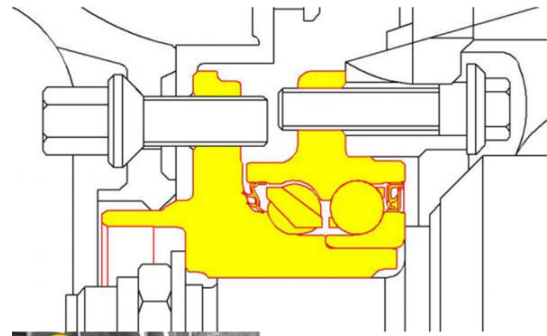
Na obrázku 1.5 je zobrazeno uložení předního poháněného kola. Kolo je uloženo pomocí dvouřadého ložiska, stejně jako na obrázku 1.3 schématu *b*.

### 1.2.2 Ložiskové jednotky třetí generace

V dnešní době se na osobních automobilech nejčastěji používají takzvané ložiskové jednotky třetí generace (obrázek 1.6). Jedná se o jeden díl, který ale obsahuje jak kolová ložiska, tak náboj kola (obrázek 1.7). Celá ložisková jednotka se jednoduše pomocí několika šroubů připevní k těhlici. Výhodou tohoto řešení je jednoduchá montáž a demontáž. Ložisková vůle se nemusí vymezovat, jelikož je vymezena již při výrobě. Nevýhodou však je, že není možné vůli následně vymezovat při jejím zvětšení vlivem opotřebení ložisek[4].



Obrázek 1.6: Ložisková jednotka třetí generace, převzato z [5]



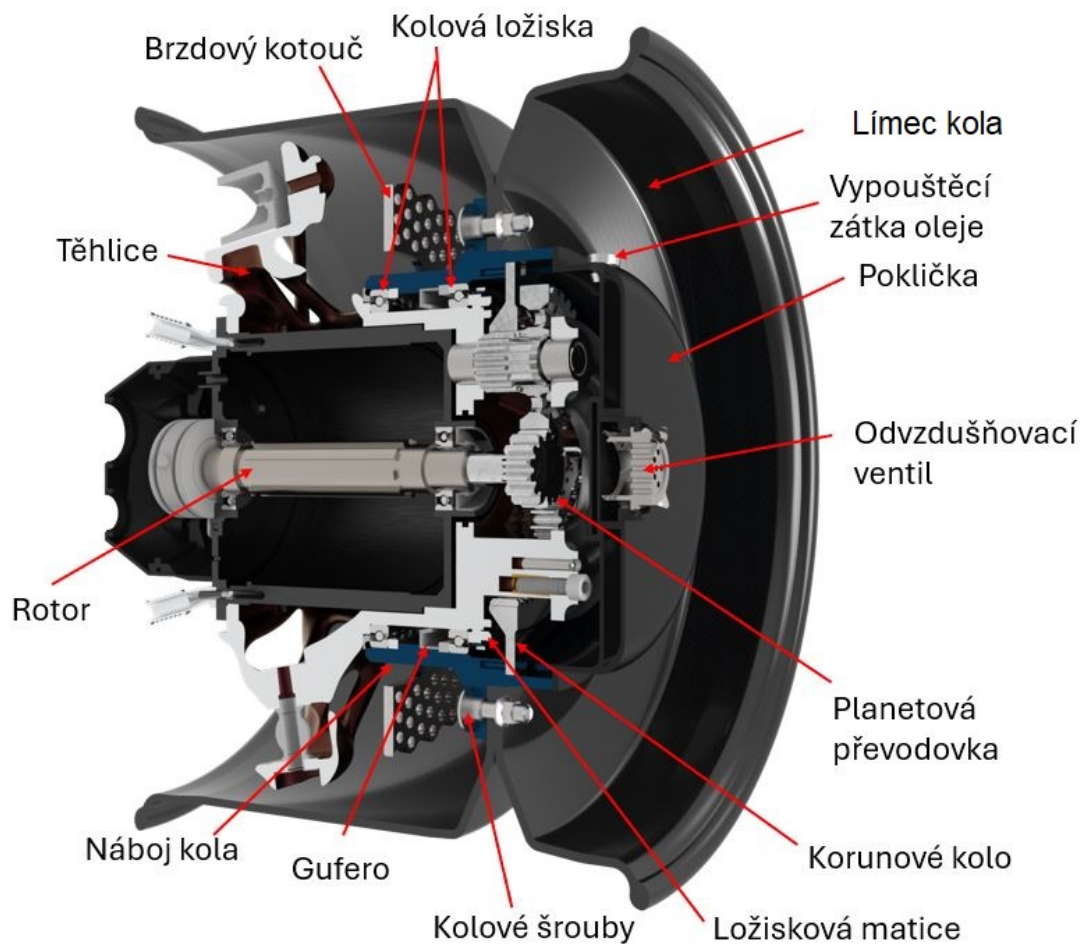
Obrázek 1.7: Řez ložiskovou jednotkou, převzato z [4]

### 1.2.3 Kolová skupina monopostu FSE.12

Na obrázku 1.8 je zobrazena kolová skupina monopostu FSE.12.

Monopost FSE.12 je elektrické vozidlo typu formula student týmu eForce FEE Prague Formula. Elektromotory jsou zakomponované do kolové skupiny, oproti klasickému řešení na spalovacích vozech zde tedy chybí poloosy. Místo toho je hnací moment od motoru převáděn na kola pomocí planetové převodovky, která je také zaintegrovaná. Vzhledem k celému zástavbovému prostoru je zde náboj kola vnější.

K náboji je připojen límec kola s pneumatikou, brzdový kotouč a výstup z převodovky, což je korunové kolo. Ložiska jsou použita kuličková s kosoúhlým stykem a jedná se o obdobné uspořádání jako na obrázku 1.3 schématu *a*. Planetová převodovka je mazána převodovým olejem, který je těsněn hřídelovým těsněním z jedné strany a pokličkou převodovky z druhé strany. Celková hmotnost kolové skupiny je pak kolem 9 kg.



Obrázek 1.8: Kolová skupina monopostu FSE.12

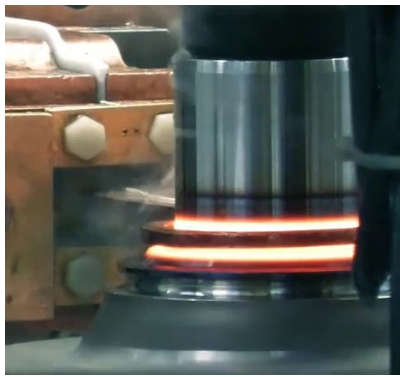
## 1.3 Používané materiály a technologie výroby náboje

### 1.3.1 Náboje pro ložiskové jednotky třetí generace

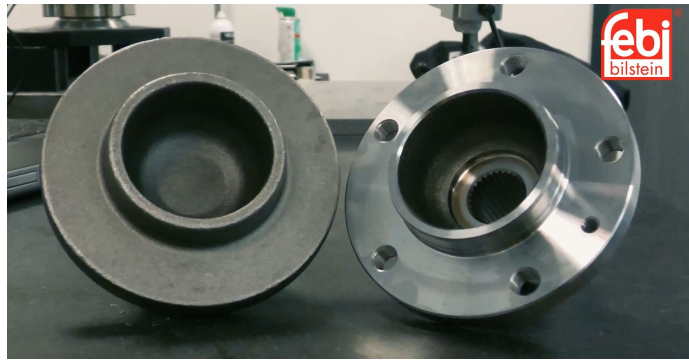
Náboje, které se používají v ložiskových jednotkách třetí generace, jsou většinou vyráběny z oceli (výrobce NSK používá například oceli 1.3505, 1.7027 [6]). Polotovár pro náboje je většinou výkovek, který se následně obrobí třískovým obráběním. V místě, kde je na náboji kontaktní plocha s kuličkami ložisek, je náboj kalený (obrázek 1.9).

V případě, že se jedná o náboj, který je na hnané nápravě, je v náboji ještě vyrobeno drážkování protahováním. V poslední operaci je náboj obroben najemno, a to kvůli deformacím po kalení.



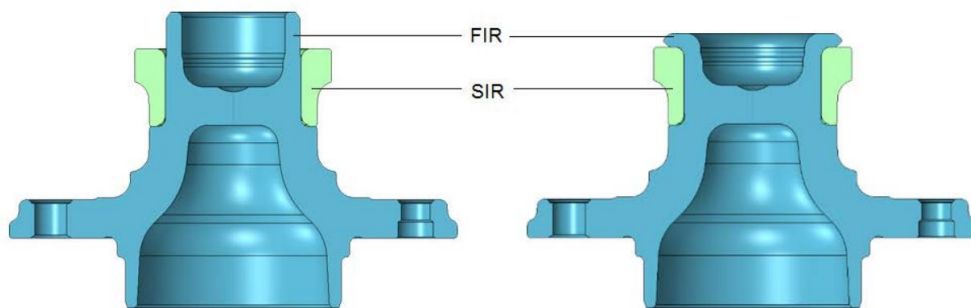


Obrázek 1.9: Kalení náboje, převzato z [7]



Obrázek 1.10: Polotovár a vyrobený kus náboje, převzato z [7]

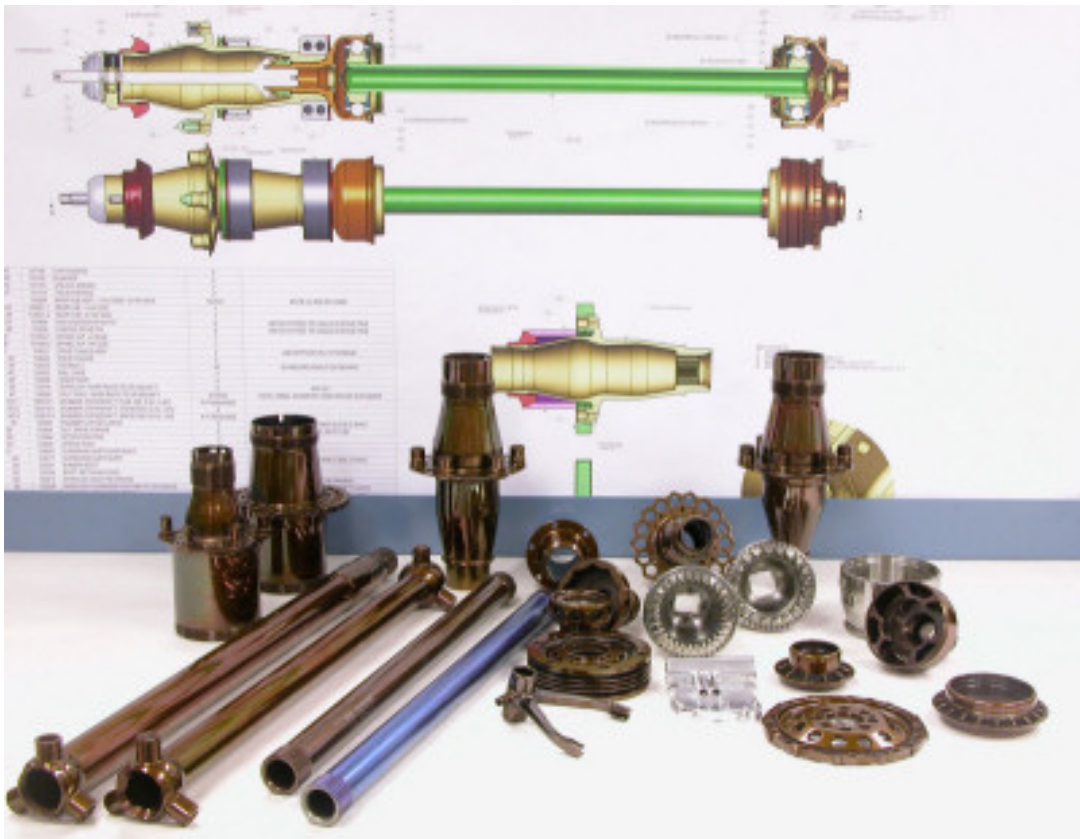
Při kompletaci celé ložiskové jednotky se na náboj vkládá vnitřní kroužek ložiska. Ten musí být axiálně pojištěn. Toho je docíleno pomocí orbitálního tváření konce náboje.



Obrázek 1.11: Orbitální tváření konce náboje [8]

### 1.3.2 Materiály a technologie výroby náboje pro závodní vozy

Při návrhu dílů pro závodní vozy je obvykle kladen důraz na co nejmenší hmotnost dílu. Zároveň se téměř vždy jedná o kusovou prototypovou výrobu, proto jsou díly většinou vyráběné třískovým obráběním.



Obrázek 1.12: Prototypová výroba závodních dílů, převzato z [9]

Například náboje pro závodní vozy Formule 1 jsou vyráběny z oceli 300M. Jedná se o vysokopevnostní ocel s mezí kluzu až 1500 MPa[10]. V minulosti se používaly i lehké slitiny titanu.

Náboje kolové skupiny týmu eForce i CTU Cartech byly v minulosti vyráběny z materiálu EN AW 7075 ve vytvrzeném stavu T6. Jedná se o vysokopevnostní slitinu hliníku, která se používá v leteckém, zbrojním a automobilovém průmyslu. Má dobrou obrobiteľnosť a korozivzdornost. Je těžce svařitelná a hůře eloxovatelná [11].

Vzhledem k těmto vlastnostem a zkušenosti v obou týmech s tímto materiálem byl zvolen pro výrobu náboje.



Tabulka 1.1: Technické vlastnosti použitého materiálu EN AW 7075 T6, převzato z [12]

Slitina	Rozměry			Pevnost v tahu (Rm) MPa	Mez kluzu (Rp0,2)	Tažnost	Tažnost A50
	Min	Max	Stav	Rm N/mm2	MPa	% min	% min
EN AW-7075		25	T6	540	480	7	5
EN AW-7075	25	100	T6511	560	500	7	
EN AW-7075	25	75	T73	475	405	7	
EN AW-7075	25	100	T6	560	500	7	
EN AW-7075	25	75	T73511	475	405	7	
EN AW-7075	75	100	T73511	470	390	6	
EN AW-7075	75	100	T73	470	390	6	
EN AW-7075	100	150	T73	440	360	6	
EN AW-7075	100	150	T6511	550	440	5	
EN AW-7075	100	150	T73511	440	360	6	
EN AW-7075	100	150	T6	550	440	5	
EN AW-7075	150	200	T6511	440	400	5	
EN AW-7075	150	200	T6	440	400	5	

V tabulce 1.1 výše jsou vidět údajované mechanické vlastnosti materiálu EN AW 7075 T6. Náboj bude vyráběn z polotovaru o průměru 200 mm, pro který je uvedena mez kluzu ( $R_{p0,2}$ ) = 400 MPa. Z bezpečnostních důvodů však při návrhu pevnostních dílů používáme v týmu 0,9 násobek mez kluzu. Pro tento materiál tedy uvažují mez kluzu 360 MPa.

## 2 Konstrukční návrh

V této kapitole je popsán můj konstrukční návrh náboje pro nový monopost CTU.24. Při návrhu jsem se snažil odstranit všechny nedostatky předešlé konstrukce, optimalizovat hmotnost a zjednodušit servisovatelnost kolové skupiny monopostu. Návrh vychází z předchozí konstrukce, ale snažil jsem se zúročit zkušenosti a poznatky z vývoje kolových skupin v týmu CTU CarTech.

### 2.1 Silové účinky

Při návrhu nosných dílů je nutností znát vnější vlivy, které na díl působí. Při návrhu jakéhokoliv nosného dílu kolové skupiny jsou při návrhu vstupními parametry síly, které působí na vůz v místě kontaktu s vozovkou. Za kontaktní bod je uvažován geometrický střed pneumatiky, která přichází do kontaktu s vozovkou.

#### 2.1.1 Zavedení orientace působících sil

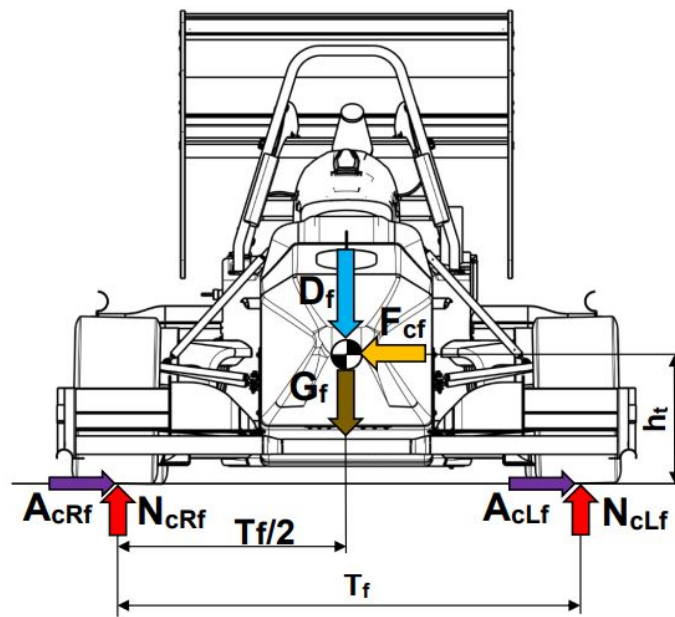
Vůz prochází při jízdě různými stavy. Silové působení v místě myšleného kontaktu je většinou síla v obecném směru. Pro výpočty se tato síla rozkládá do tří složek, tečnou, axiální a normálovou. Na obrázku 2.1 je zobrazen příkladný silový rozbor vozidla při průjezdu levotočivou zatáčkou. V tabulce 2.1 je uveden popis jednotlivých silových účinků.

Tabulka 2.1: Popis silových účinků na vozidlo

---

$D_f$ :	Přítlak na přední nápravu
$F_{cf}$ :	Síla bočního přetížení
$G_f$ :	Tíha na přední nápravě
$A_{cRf}$ :	Axiální síla působící na přední pravé kolo
$N_{cRf}$ :	Normálová síla působící na přední pravé kolo
$A_{cLf}$ :	Axiální síla působící na přední levé kolo
$N_{cLf}$ :	Normálová síla působící na přední levé kolo

---



Obrázek 2.1: Silový rozbor vozidla při průjezdu levotočivou zatáčkou, převzato z [13]

Pro jednoduchost v mé práci budu síly označovat  $F_X$ ,  $F_Y$  a  $F_Z$ . Jejich zavedená orientace je zřejmá z obrázku 2.2. Směr síly  $F_X$  je ve směru jízdy vozidla.

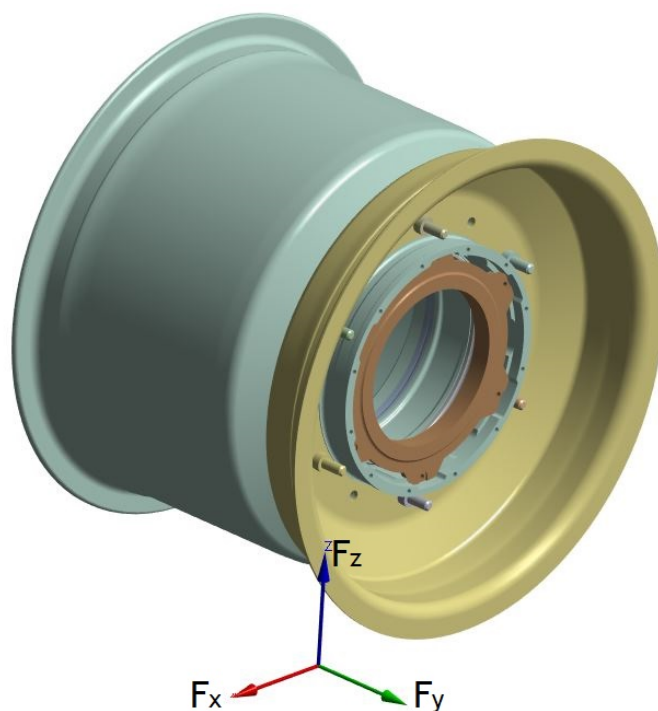
### 2.1.2 Uvažované síly pro výpočet

Při výpočtu sil působících na vozidlo je nutné uvažovat všechny jízdní stavy, které mohou nastat. Jedná se o statický stav, brzdění, zatáčení, zatáčení společně s brzděním, akcelerace a stav při maximální rychlosti. Při výpočtu se vyšetří vnější silové účinky působící na vozidlo a pomocí momentových rovnic se zjistí reakce v místech kontaktu s vozovkou. Podrobnější postup výpočtu je popsán například v bakalářské práci Bc. Jana Vondráčka [13], který tyto výpočty prováděl pro tým CTU Cartech. Cílem mé práce však není zpracování výpočtu sil působících na vozidlo. Touto problematikou se letos zabývali kolegové z podvozkové skupiny z důvodu návrhu nové kinematiky vozidla. Z jejich silového rozboru jsem při mém návrhu však vycházel.

V následující tabulce (tabulka 2.2) jsou uvedeny jízdní stavy a příslušné síly, které jsem uvažoval při výpočtu. Při každém stavu jsem uvažoval nejnamáhanější kolo ze všech čtyř.

V těchto silách jsou uvažovány i bezpečnostní koeficienty. S těmito koeficienty běžně v našem týmu navrhujeme pevnostní díly. Jejich hodnoty jsou uvedeny v tabulce 2.3.

Pro pevnostní výpočty náboje jsem uvažoval i působení kroučícího momentu na



Obrázek 2.2: Zavedené silové účinky v místě kontaktu kola s vozovkou

Tabulka 2.2: Uvažované síly pro výpočet

	$F_x$ [N]	$F_y$ [N]	$F_z$ [N]	Moment [Nm]
Maximální rychlost	0	0	5640	350
Brzdění - brzdový kotouč	-3700	0	6930	0
Brzdění - rekuperace	-3700	0	6930	0
Zatáčení	0	-5560	7950	0
Zatáčení + brzdění - brzdový kotouč	-3700	-5580	7890	0
Zatáčení + brzdění - rekuperace	-3700	-5580	7890	0
Akcelerace	3700	0	6930	350
Přejetí hrbolu	0	0	15000	0

Tabulka 2.3: Uvažované bezpečnostní koeficienty

Koeficient	Hodnota
$k_x$	2
$k_y$	2
$k_z$	3

výstupu z převodovky. Dále jsem rozdělil případy brzdění na stavy, kdy všechnu energii zachycuje kotouč (rekuperace není aktivní) a stav samotné rekuperace, kdy pilot pustí plynový pedál vozidla bez přídatného brzdění. Dále jsem uvažoval i stav při přejetí nerovnosti vozovky.

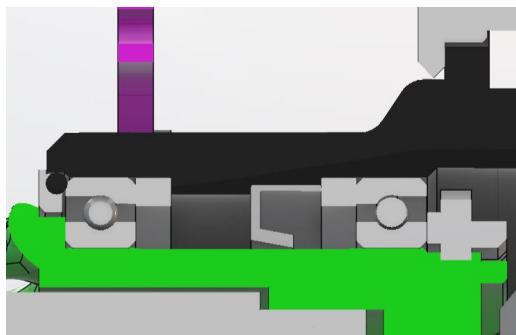
## 2.2 Kontura náboje

Při konstrukčním návrhu jsem se zaměřil na samostatnou konturu náboje. Během letošního návrhu celé kolové skupiny docházelo k více změnám, které se mimo jiné týkaly i náboje. V této kapitole je popsáno, jaké změny byly na kontuře náboje provedeny.

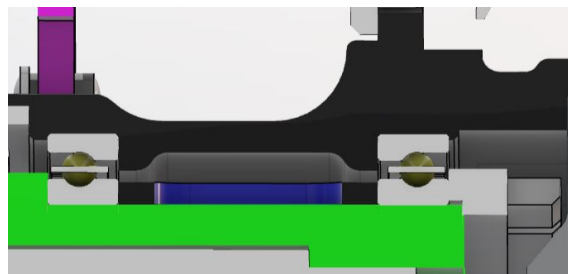
### 2.2.1 Změna pozice ložisek

Během letošní vývojové fáze jsme se mimo jiné zaměřili na výpočet životnosti ložisek. Důvodem byla validace předešlých výpočtů a prohloubení znalostí s výpočtním programem KissSoft, s kterým tým nově pracuje. Výpočty jsem se do hloubky nezabýval já, ale můj kolega. S ním jsem však při návrhu úzce spolupracoval. I v návaznosti na změnu těsnění převodové skříně, o kterém se změnám k kapitole 2.3.1, došlo k posunutí ložisek. Celkovou vzdálenost ložisek od sebe jsme navýšili o 3 mm a obě ložiska jsme posunuli směrem od auta. Posunutí dále od auta bylo zvoleno právě kvůli použitému těsnění.

Dále jsem se rozhodl pro odstranění distančních kroužků, o které se ložiska opírala. Místo těchto kroužků jsem zmenšil průměr náboje, o který se ložiska opírala. Pro možnost demontáže ložisek jsem do náboje přidal montážní drážky.



Obrázek 2.3: Uspořádání ložisek na FSE.12



Obrázek 2.4: Uspořádání ložisek na CTU.24

### 2.2.2 Ložisková matice

Další změna, která se týkala náboje a kolové skupiny, byla změna ložiskové matice. Pomocí ložiskové matice se axiálně zajišťují ložiska a vymezuje se s ní jejich vůle. V našem případě se jedná o matici se závitem M107x1 z materiálu EN AW 7075 T6 (obrázek 2.5). Vzhledem k zástavbovému prostoru je matice dotahována pomocí speciálního přípravku.



Obrázek 2.5: Ložisková matice

Předešlý návrh matice byl však nedostatečný v tom, že měl pouze 3 činné závity. Pro lepší rozložení napětí na závitu sintrované těhlice jsem se rozhodl pro navýšení počtu činných závitů na 5.

Vzhledem ke zvětšení matice, posunutí ložisek a zvětšení tloušťky korunového kola, o kterém bud psát v kapitole 2.5, bylo nutné posunout celou převodovku. Celkový posun převodovky byl 8,5 mm směrem od auta. Posunutím převodovky se samozřejmě změnila i poloha drážek pro korunové kolo.

### 2.2.3 Odlehčení

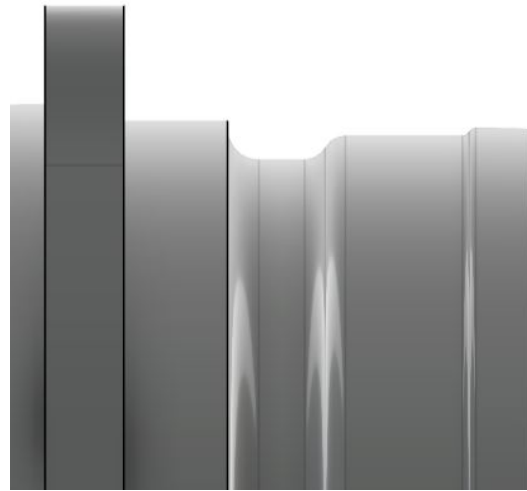
Při návrhu je nutné také myslet na to, že se jedná o díl, který je navrhován pro sportovní vůz. Je tak běžné, že je vyvíjena snaha docílit co nejmenší hmotnosti dílů, ale bez ztráty pevnosti či tuhosti. V neposlední řadě je náboj kola neodpruženou rotační hmotou, která má vliv na chování vozu.

Mezi drážkami pro korunové kolo jsem vytvořil odlehčovací kapsy. Jelikož je v tomto místě na náboji materiálu hodně, navrhl jsem i kapsu na vnější kontuře

náboje, mezi krytem převodovky a uchycením límce kola (obrázky 2.6 a 2.7).

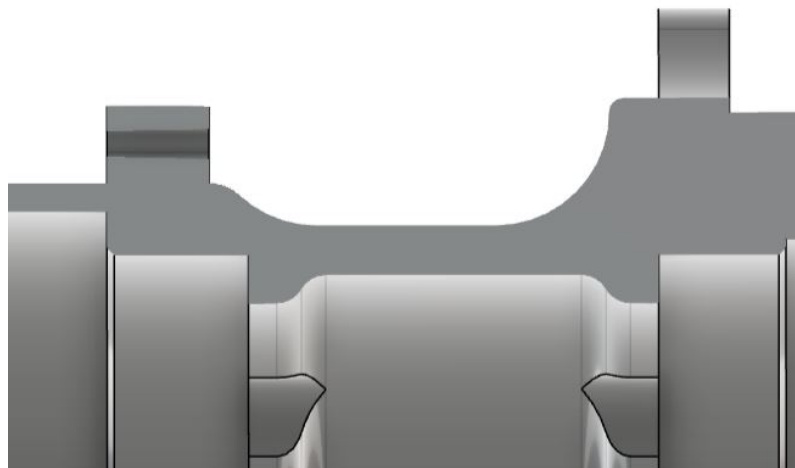


Obrázek 2.6: Odlehčovací kapsa mezi drážkami pro korunové kolo



Obrázek 2.7: Vnější odlehčovací kapsa mezi ráfkem a pokličkou

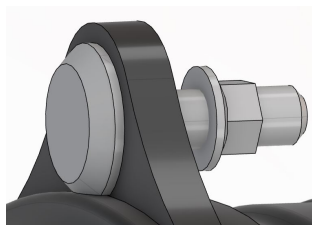
Dále jsem změnil vnitřní a vnější konturu náboje v oblasti mezi rlímcem kola a brzdovým kotoučem (obrázek 2.8). Pevnostní simulace naznačovaly, že by bylo možné odlehčovat i v oblasti uchycení brzdového kotouče, ale bohužel kvůli zvolenému typu těsnění a výrobnímu postupu to možné nebylo. Náboj se oproti předešlé verzi podařilo odlehčit o 34 g na kus, což je celkem 136 g na celý vůz.



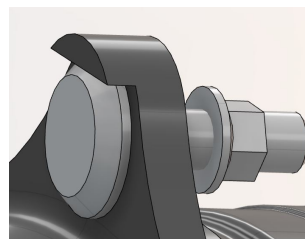
Obrázek 2.8: Odlehčovací kapsy mezi držákem ráfku a brzdovým kotoučem

### 2.2.4 Kolové šrouby

Ráfek je k náboji připevněn pomocí kolových šroubů. Ocelové kolové šrouby M6 jsou do náboje lisované. Reakci při dotahování zachytává společně s lisovaným spojem tvarový zámek na náboji (obrázek 2.9).



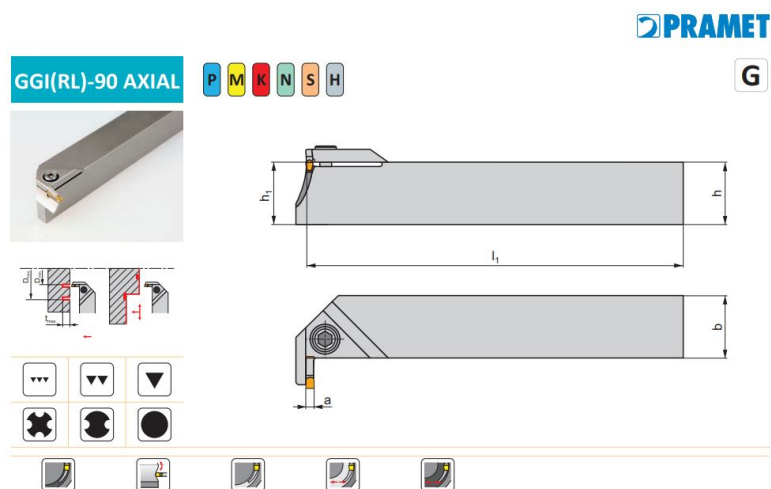
Obrázek 2.9: Tvarový zámek kolového šroubu



Obrázek 2.10: Tvarový zámek kolového šroubu

Za účelem snížení hmotnosti jsem se rozhodl pro umístění tvarového zámku na opačnou stranu úchytů límce kola (obrázek 2.10).

Při prvotním návrhu mi tato změna, co se týče vyrobitelnosti, nepřišla jako velká komplikace vzhledem k tomu, že byl potenciál náboj odlehčit o dalších 10 gramů. Při návrhu výrobního postupu jsem si však uvědomil, že by bylo potřeba koupit nový nástroj, kterým laboratoře Ústavu obrábění, projektování a metrologie nedisponuje.



Obrázek 2.11: Nůž pro axiální zapichování, převzato z [14]

Zřejmě by nebyl velký problém tento nástroj pořídit, ale v budoucích sezónách se bude náboj nejspíše obrábět v externí firmě, která by tímto nástrojem nemusela disponovat. Snažil jsem se tak předejít potenciálním budoucím problémům a zvolil jsem původní řešení.



## 2.3 Těsnění převodovky

Výkon z elektromotoru je přenášán pomocí planetové převodovky na náboj kola. Planetová převodovka se nachází v olejové lázni, tudíž je nutné řešit způsob jejího těsnění. Ztráta oleje při jakékoliv dynamické disciplíně znamená diskvalifikaci z této disciplíny a tím tak ztrácí cenné body.



Obrázek 2.12: Uspořádání těsnění na monopostu FSE.12

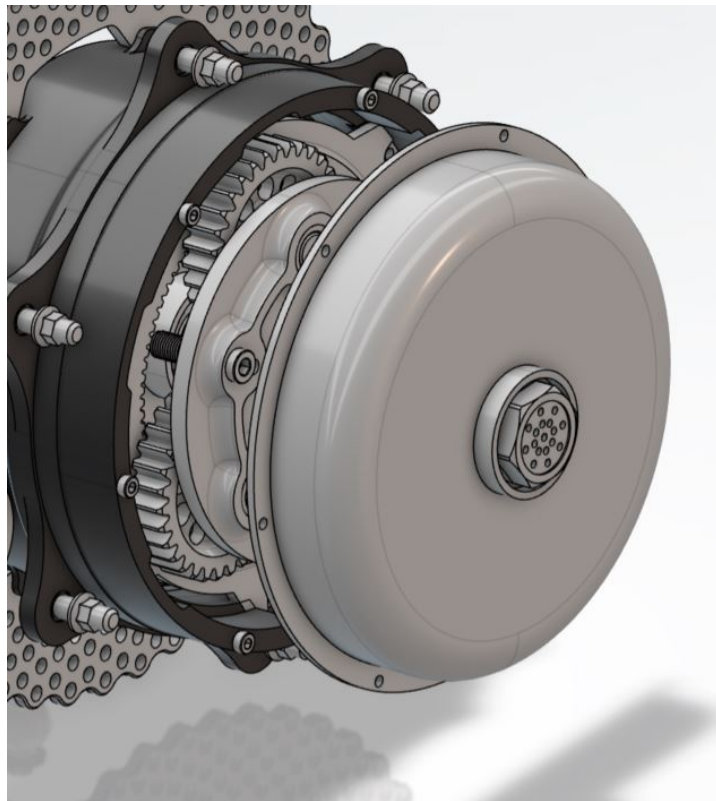
### 2.3.1 Těsnění na vnější straně

Vnější strana převodovky je zaslepena pokličkou. Sestava je vidět na obrázku 2.13.

Na předešlém monopostu FSE.12 byla použita poklička, která byla vyrobena aditivní technologií plastového 3D tisku. Následně byla pomocí 6ti šroubů M3x10 připevněna k náboji. Těsnění média bylo dosaženo pomocí těsnícího silikonu.

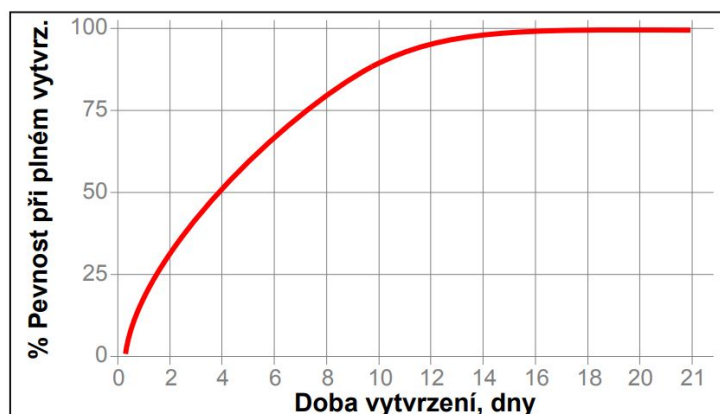
#### Nevýhody stávajícího řešení

Hlavní nevýhodou tohoto řešení je dle mého názoru použití silikonu jako těsnícího prvku. Těsnící vlastnosti silikonu jsou dostačující, ale pro naše použití je nevhodný



Obrázek 2.13: Poklička na vnější straně převodovky

z několika důvodů. Nejčastěji používáme těsnící silikon SI 5910 od firmy Loctite. Na obrázku 2.14 níže je vidět doba vytvrzení tohoto silikonu. K plnému vytvrzení (při 25°) dochází až po 14 dnech [15]. Pro naše použití obvykle stačilo vytvrzení po 24 hodinách, ale i to je příliš dlouhá doba, neboť převodovky musely být často servisované těsně před testováním, či závody.



Obrázek 2.14: Obrázek těsnícího silikonu SI 5910, převzato z [15]

Další nevýhodou použití silikonu je nutnost jeho odstraňování při servisování. Silikon se musí odstranit mechanicky, což je časově náročné, pracné a může dojít

k poškození těsnicí plochy a tím i k dalším netěsnostem.

### Navrhované změny, výběr těsnění

Při navrhování bylo mým hlavním cílem přijít s řešením, při kterém se nemusí používat silikon. Počítal jsem s následujícími pracovními podmínkami:

Otáčky	1800 ot/min
Teplota média	90 C°
Těsněné médium	převodový olej
Znečištění	střední - znečištění od okolí při jízdě
Maximální vnější průměr	143 mm, omezení kvůli nasazení kola

Při hledání různých možných řešení pro tento problém jsem narazil na řešení týmu WHZ racing 2.13. Jako těsnicí prvek je v tomto případě použit o-kroužek. Zároveň je vidět, že je zde použito větší množství přitlačných šroubů. Takovéto řešení by mohlo být vhodné i pro náš monopost. Bohužel ale nebylo možné tento způsob těsnění aplikovat, jelikož je náš zástavbový prostor moc malý na drážku pro o-kroužek. Muselo by dojít k poměrně velkému zvětšení těsnicí plochy, ale to není vzhledem k rozměrům korunového kola převodovky možné. Přejít na změnu za použití tohoto těsnění by bylo možné až při návrhu nové převodovky, což pro letošní sezónu není z kapacitních důvodů možné.



Obrázek 2.15: Těsnění vnější strany převodovky týmu WHZ racing, převzato z [16]

Dalším možným řešením by mohlo být použití papírového těsnění, které se používá například při těsnění olejových vík motoru. Výměna takového těsnění by nebyla tak pracná, jako v případě silikonu. Volbu tohoto těsnění jsem konzultoval s firmou Ruml těsnění [17], se kterou máme dobré zkušenosti a již jsme s nimi jakožto tým v minulosti spolupracovali. Po konzultaci s produktovým specialistou mi bylo doporučeno těsnění z materiálu Silikon 60°Sh FDA a Klingersil C4324. Při výrobě ale firma zjistila, že vzhledem k tenké stěně mezi dírou pro šrouby a vnějším průměrem těsnění by mohlo docházet k únikům oleje (obrázek 2.16).



Obrázek 2.16: Tenká stěna těsnění, fotografie od firmy Ruml těsnění

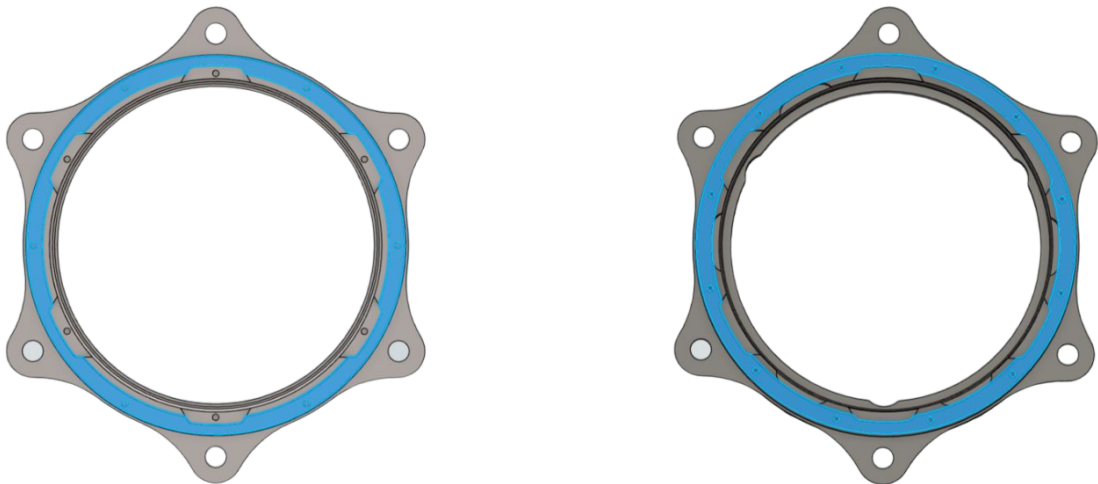
Ale i přes tuto skutečnost jsem se rozhodl pro vyzkoušení tohoto řešení, jelikož v tomto řešení vidím potenciál. Při měření teploty a tlaku oleje převodovky, které provedl kolega Vít Veselý, jsme vyzkoušeli těsnění z materiálu Silikon 60°Sh FDA (obrázek 2.18).



Obrázek 2.17: Testování těsnění z materiálu Silikon 60°Sh FDA

Bohužel k prosakování oleje došlo již při statickém testu. K úniku oleje nedošlo kolem šroubů, ale v místě, kde se nachází výřez pro korunové kolo. Z obrázku je také vidět, že je těsnění kolem šroubů zdeformované dobře, kdežto ve větší vzdálenosti od šroubů je přítlak zřejmě nedostatečný. K únikům oleje nedocházelo po celém obvodu, ale jen v některých místech. To mohlo být zapříčiněno rozdílným dotažením šroubů. Dále je také nutné brát v potaz, že těsnění bylo přitlačováno plexisklem, které má menší tuhost než kovový prstenec pokličky, který bude použit na monopostu.

V návaznosti na toto měření jsem se rozhodl pro zvětšení těsnící plochy. Toho jsem docílil lehkou změnou geometrie na korunovém kole, jehož největší průměr jsem zmenšil o 2,6 mm. Tím jsem docílil tlustší stěny výřezu pro korunové kolo na těsnění. Dále jsem posunul roztečnou kružnici pro šrouby směrem ke středu náboje. Tím jsem zamezil vzniku tenké stěny na těsnění. V neposlední řadě jsem se rozhodl pro navýšení počtu šroubů na 12, abych docílil lepšího rozložení přítlaku na těsnění.



Obrázek 2.18: Porovnání změn na pravé části náboje, vlevo původní návrh, vpravo nový návrh

### 2.3.2 Těsnění na vnitřní straně

V obrázku 2.12 výše je vidět, jakým způsobem byla převodová skříň utěsněna. Na levé části je použito hřídelové těsnění a distanční kroužek s o-kroužkem. Problémů tohoto řešení je hned několik.

#### Nevýhody stávajícího řešení

Hřídelové těsnění se nachází mezi kolovými ložisky, tudíž není olejem mazáno levé ložisko. Zároveň bylo použito těsnění typu SKF 42340, které slouží k těsnění plastických maziv, proto je pro těsnění olejové lázně nevhodné [18]. Dalším problémem byl špatný povrch pod hřídelovým těsněním, což v minulosti nejspíše přispělo k únikům oleje a netěsnostem. Příčina špatného povrchu byla nejspíše kombinace špatně nastavených parametrů při soustružení a pórovitost materiálu těhlice, která se vyráběla aditivní technologií sintrování hliníku. Na dalším monopostu CTU.24 budou těhlice nejspíše odlévány, proto doufám v lepší kvalitu povrchu. V případě, že by toho ale nebylo docíleno, bylo by možné použít opravnou sadu na hřídele. Použití o-kroužku také není vhodné, jelikož o-kroužky jsou spíše vhodné pro statické aplikace. Nabízelo by se použití x-kroužku, ale po konzultaci s bývalými členy mi bylo doporučeno od tohoto řešení úplně odstoupit. Důvodem je špatná montáž kvůli nedostatku místa.

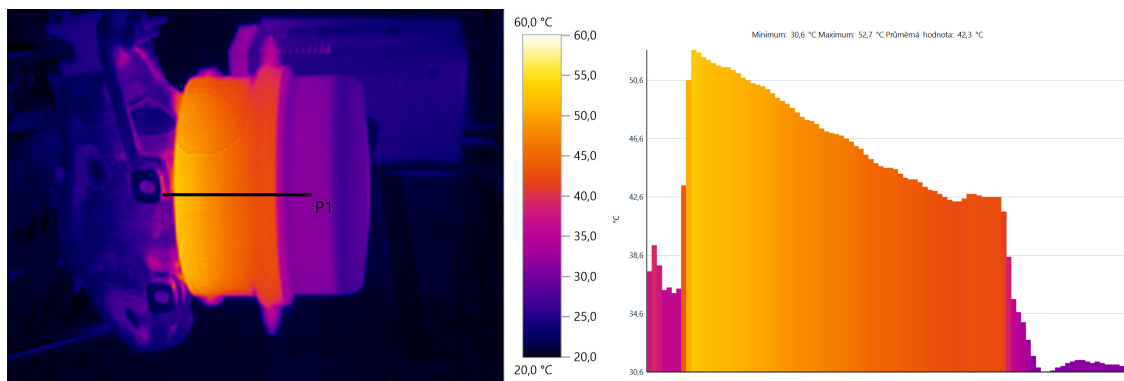
#### Navrhované změny, výběr těsnění

Při návrhu těsnění je důležité znát pracovní podmínky, jakým bude těsnění vystaveno. Pro levou stranu platí tyto podmínky:

Otáčky	1800 ot/min
Teplota média	90 C°
Těsněné médium	převodový olej
Znečištění	střední - prach od brzdových destiček
Průměr hřídele	min. 114 mm
Průměr díry	max. 130 mm

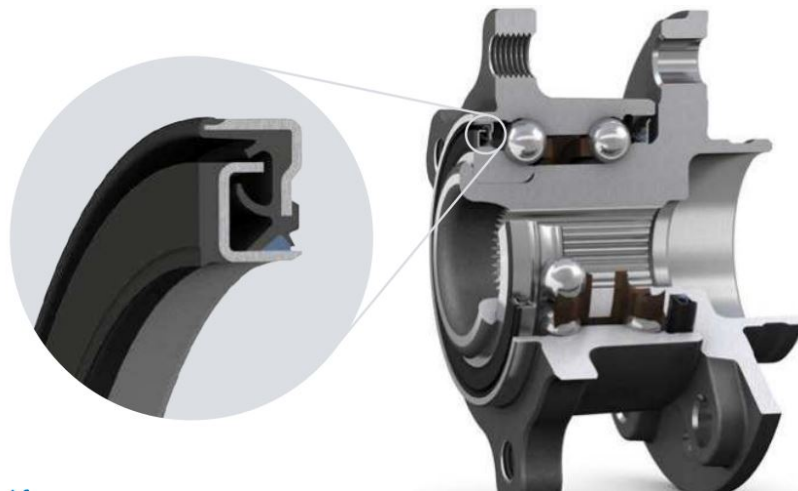
Maximální provozní otáčky byly vypočteny z maximálních otáček použitých elektromotorů a převodového poměru převodovky. Teplota oleje vychází z měření, které provedl můj kolega Bc. Vít Veselý[19]. Teplotu jsem uvažoval vyšší, a to z důvodu vyšší okolní teploty například při závodech v Chorvatsku, než při měření. Měření probíhalo v oblasti převodovky, ale je nutné také uvažovat teplotní rozložení po celém náboji, které je patrné z obrázku níže 2.19





Obrázek 2.19: Rozložení teploty na náboji při měření v laboratoři, převzato z archivu týmu eForce

Průměr hřídele vychází z minimálního opěrného průměru pro ložisko. Maximální průměr díry byl volen s ohledem na montáž kotouče a minimální tloušťku stěny náboje. Při výběru jsem se snažil zvolit takové těsnění, které by mělo nejmenší zástavbový prostor. Při výběru jsem uvažoval následující řešení:




Obrázek 2.20: Těsnící ložiskové jednotky náboje kola, převzato z [18]

Jedná se o kombinaci labyrintového a klasického těsnění s břitem. Výhodou takového řešení je jeho malá zástavba, odolnost vůči vnějšímu znečištění a v neposlední řadě to, že bylo vyvinuto speciálně pro těsnění kolových ložisek[20]. Po konzultaci s SKF specialistou mi bylo ale bohužel sděleno, že takováto těsnění jsou schopna zadržet jen plastické mazivo. Tudíž je toto těsnění pro moji aplikaci nevhodné.

Další možné řešení, které mi bylo rovněž doporučeno specialistou SKF, by mohlo být těsnění typu R01-AF3 (obrázek 2.21). Jedná se o pružinové těsnění s manžetami.

Výhodou tohoto řešení jsou celkově malé rozměry těsnění. V neposledí řadě

profil	popis	teplota	max.rychl.	max. tlak	materiál
 <p><b>R01-AF</b> <b>Jednočinné rotační hřídelové těsnění</b> Pružinové těsnění s manžetami s pevnou vnější částí pro osově otevřená uložení s upevněním pomocí upínací desky. Využívá se zejména pro válcovací stolice, velké převodové mechanismy v těžkém strojírenství, v loďařství a stavební inženýrství.</p>	-30 °C ... +110 °C	5 m/s	0,5 bar (7 psi)	PU	
	-20 °C ... +110 °C	5 m/s	0,5 bar (7 psi)	HPU	
	-50 °C ... +110 °C	5 m/s	0,5 bar (7 psi)	TPU	
	-20 °C ... +110 °C	6 m/s	0,5 bar (7 psi)	SPU	
	-30 °C ... +100 °C	5 m/s	0,5 bar (7 psi)	GPU	
	-30 °C ... +100 °C	10 m/s	0,5 bar (7 psi)	NBR	
	-25 °C ... +150 °C	10 m/s	0,5 bar (7 psi)	HNBR	
	-20 °C ... +200 °C	15 m/s	0,5 bar (7 psi)	FKM	
	-50 °C ... +150 °C	10 m/s	0,2 bar (3 psi)	EPDM**	
	-60 °C ... +200 °C	5 m/s	0,2 bar (3 psi)	MVQ	

Obrázek 2.21: Těsnění R01-AF, převzato z [21]

splňuje i moje požadavky. Nevýhodou by pak mohla být nutnost axiálního zajištění, ale vzhledem k malým rozměrům těsnění by to byl řešitelný problém. Těsnění by bylo však možné dostat v rozměrech 110x125x7 a materiálu NBR. Při takovéto konfiguraci se nacházím na limitu použitelnosti co se týče otáček a teploty. To je právě zapříčiněno malým průřezem těsnění a danou obvodovou rychlostí. Při zvětšení na těsnění na rozměry 115x130x7 by už nemuselo docházet k dobrému přestupu tepla. Tyto cenné informace jsem se dozvěděl při konzultacích s techniky SKF. Následně mi bylo pro moji aplikaci doporučeno těsnění s větším průřezem.

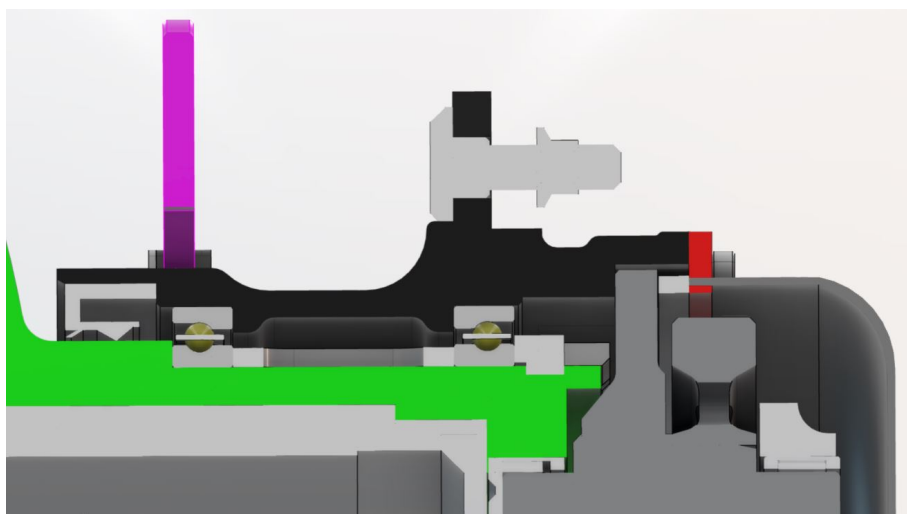
Na trhu je dostupné těsnění typu GP 115 x 130 x 12 z materiálu NBR od společnosti Gufero (obr. 2.22). Celková šířka těsnění je 12 mm, což by mělo zajistit dostatečný přestup tepla. Zároveň je těsnění robustnější a disponuje přídatnou prachovkou, která je schopna odolávat vnějšímu znečištění.



Obrázek 2.22: Těsnění GP 115 x 130 x 12, převzato z [22]

I za cenu většího zástavbového prostoru jsem se rozhodl pro toto těsnění. Prioritou při tomto návrhu je totiž zajištění správné funkce těsnění. Dle konzultace s techniky SKF a katalogu firmy Rubena, která vyrábí těsnění podle stejné normy DIN 3760 [23], splňuje toto těsnění všechny požadavky. Na obrázku 2.23 je vidět finální návrh zástavbového prostoru na pro monopost CTU.24





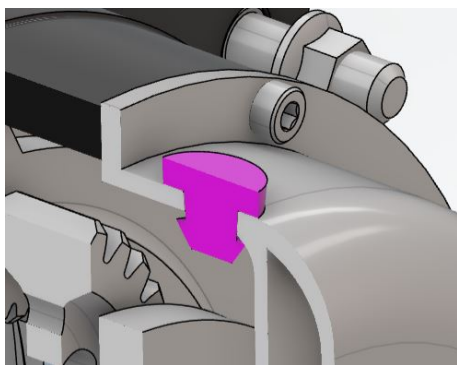
Obrázek 2.23: Návrh uspořádání těsnění pro monopost CTU.24

### 2.3.3 Servisovatelnost

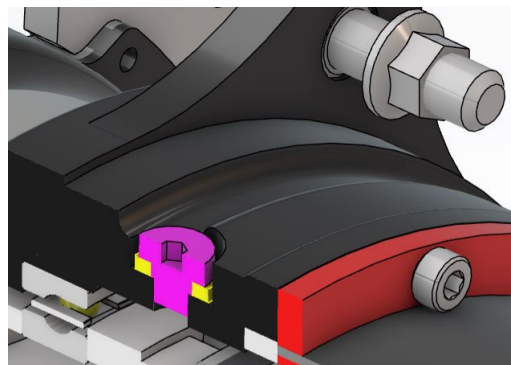
Jak bylo zmíněno v úvodu této kapitoly, servisovatelnost je jednou z věcí, na kterou jsem se při návrhu zaměřil. Změnou použití silikonu za řezané těsnění jsem docílil zkrácení doby a náročnosti servisování. Dále v případě nutnosti výměny těsnícího gufera není nutné vylišovávat ložiska z náboje.

Dále jsem se zaměřil na výměnu a doplňování převodového oleje. Pro výměnu oleje byla na monopostu FSE.12 použita plastová zátka (obrázek 2.24). Byla umístěna v pokličce. K jejímu utěsnění se opět používal silikon.

Důvod, proč se chci vyhnout použití silikonu, jsem již popsal dříve. Pro jednoduchost při servisování jsem se rozhodl použít šroubovací ocelové záslepky 2.25. Toto řešení, společně s žíhanou měděnou podložkou, se osvědčilo na monopostech týmu CTU CarTech, pomocí kterého byl těsněn olej v diferenciálu.



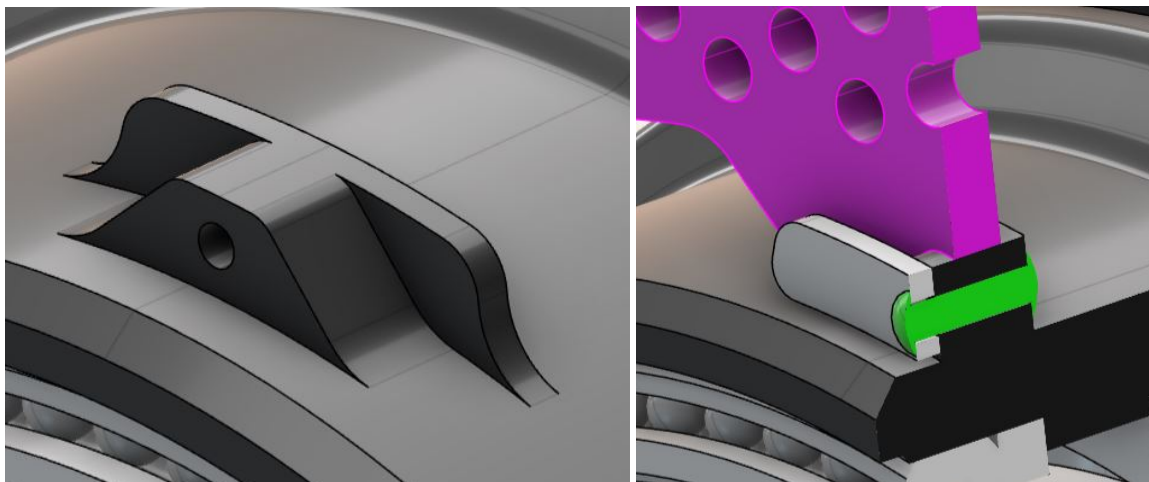
Obrázek 2.24: Plastová zátka na monopostu FSE.12



Obrázek 2.25: Šroubovaná zátka na monopostu CTU.24

## 2.4 Uložení brzdového kotouče

Brzdný moment je přenášen z náboje na kotouč pomocí frézovaných úchytů v náboji. Je to jedna z částí náboje na kterou jsem se zaměřil. Uložení na monopostu FSE.12 je možné vidět na obrázku 2.26 a 2.27.



Obrázek 2.26: Pohled na konstrukci

Obrázek 2.27: Řez uložením

Brzdový kotouč se nasazuje na náboj před lisováním náboje na těhlici. Nasazení kotouče na náboj po montáži na monopost není možné, jelikož jeho vnitřní průměr je menší než průměr náboje, přes který by bylo možné kotouč sundat. Případná výměna kotoučů by tak byla časově náročná. Jedná se o nepraktické řešení, ale vzhledem k velmi omezenému zástavbovému prostoru je to jediné možné řešení.

Vzhledem k této skutečnosti by bylo vhodné, aby nebylo potřeba brzdové kotouče během sezóny měnit. Jelikož se během sezóny najede malý počet kilometrů, nebyl v minulosti problém s opotřebením samotných brzdových ploch kotouče. Problémové však bylo právě uchycení kotouče k náboji, kde docházelo k opotřebení - vymačkání kontaktních ploch a následného zvětšování radiální vůle kotouče, což je nepřijatelné.

Při návrhu je tedy nutné prověřit kontaktní tlak na těchto plochách a popřípadě kontaktní plochy zvětšit.

### 2.4.1 Výpočet kontaktního tlaku pro konstrukci na monopostu FSE.12

Největší dosažený brzdný moment na kole:

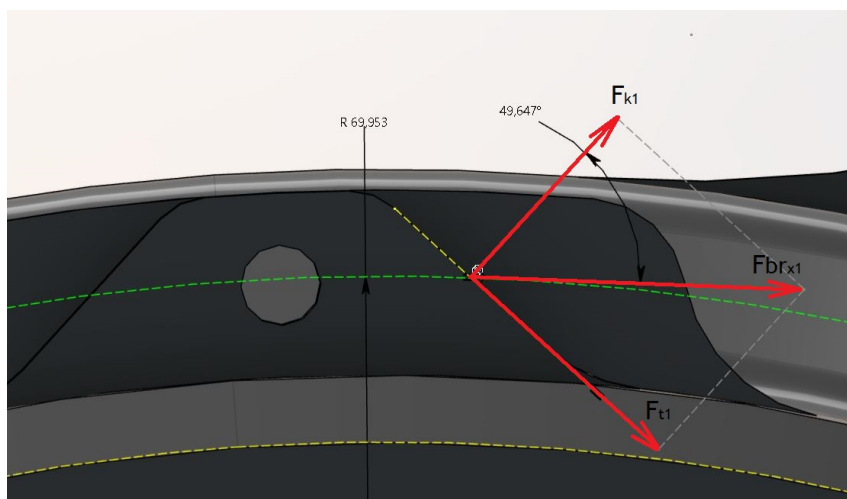
$$M_{br} = F_{x_{br}} \cdot r_{pneu} = 3700 \cdot 0,2 = 740 \text{ Nm} \quad (2.1)$$

Kde síla  $F_{x_{br}}$  ve směru x vychází z tabulky 2.2,  $r_{pneu}$  vychází z parametru monopostu FSE.12.

Síla ve směru x působící na jednu plochu úchyty kotouče:

$$F_{br_{x1}} = \frac{M_{br}}{r_{dr1} \cdot i_1} = \frac{740}{0,069953 \cdot 6} = 1715,438 \text{ N} \quad (2.2)$$

Síla  $F_{br_{x1}}$  musí být pro další výpočet rozložena do kolmého a tečného směru na plochu úchyty kotouče.  $i_1$  je počet úchyťů.



Obrázek 2.28: Rozklad síly na plochu úchyty kotouče

Dle obrázku 2.28 platí:

$$F_{k1} = F_{br_{x1}} \cdot \cos \alpha_1 = 1662,05 \cdot \cos 49,647 = 1110,737 \text{ N} \quad (2.3)$$

Kde úhel  $\alpha_1$  vychází z obrázku 2.28. Výsledný kontaktní tlak na jednu plochu úchyty kotouče, v případě že jsou v kontaktu všechny plochy úchyty kotouče:

$$p_{kont1} = \frac{F_{k1}}{A_{kont1}} = \frac{1110,737}{21,084} = 52,68 \text{ MPa} \quad (2.4)$$

Dle [24] a [13] je dovolený tlak pro slitinu hliníku EN AW 7075 T6 35 MPa.

Úchyty tedy dle mého výpočtu na otláčení nevyhovují.

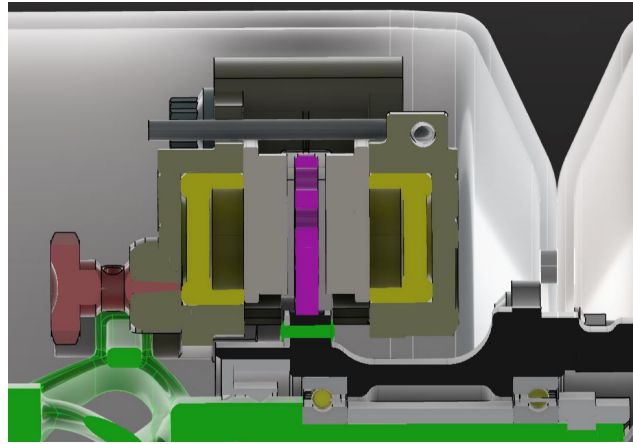
## 2.4.2 Navrhované změny

Možností, jak uchytit brzdový kotouč k náboji je hned několik. Jednou z možností, která je používána na motocyklech a často i na monopostech Formula Student

je použití plovoucích čepů jako úchyty brzdového kotouče (obrázek 2.29). Oproti pevnému uchycení má toto řešení lepší brzdou účinnost.



Obrázek 2.29: Použití plovoucích čepů, převzato z [25]



Obrázek 2.30: Zástavbový prostor kolem brzdového třmenu

Obdobné řešení bylo použito na posledním monopostu týmu CTU Cartech FS.15 a byly s ním dobré zkušenosti. Bohužel toto řešení není možné použít vzhledem k malému zástavbovému prostoru kolem brzdového třmenu (obrázek 2.30). Plovoucí čepy jsou oproti současnému řešení větší, tudíž by muselo dojít k zvětšení vnitřního průměru brzdového kotouče, což není možné vzhledem k pozici brzdových destiček.

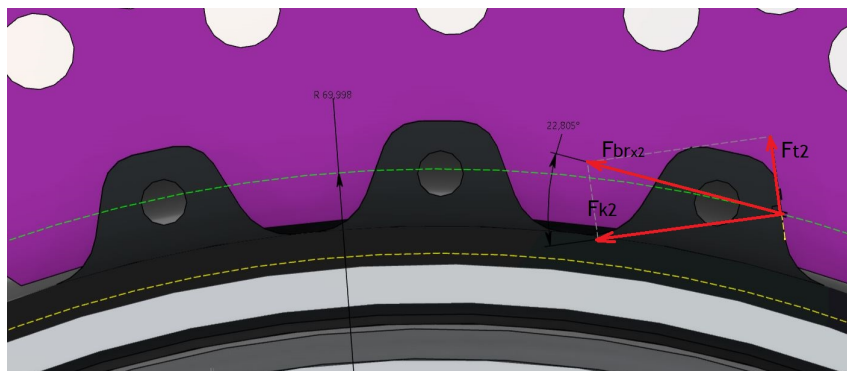
Rozhodl jsem se tedy pro změny geometrie současných úchytů kotouče. Při konstrukci jsem se inspiroval konstrukcí brzdové soustavy na monopostech Formule 1. Příklad konstrukce je možné vidět na obrázku 2.31.



Obrázek 2.31: Konstrukce brzdového kotouče na vozidle F1, převzato z [26]

Na monopostech Formule 1 jsou určitě vyšší brzdné momenty než na monopostech Formula Student. Zkusil jsem však navrhnout podobnou geometrii úchytu kotouče, pouze s menším počtem ploch.

Na obrázku níže je možné vidět návrh nové geometrie úchytu kotouče. Pro výpočet kontaktního tlaku se opět provede rozklad brzdné síly.



Obrázek 2.32: Návrh nové geometrie úchytu kotouče, rozklad sil

Síla ve směru x působící na jednu plochu úchytu kotouče:

$$F_{br_{x2}} = \frac{M_{br}}{r_{dr2} \cdot i_2} = \frac{740}{0,06998 \cdot 18} = 571,6 \text{ N} \quad (2.5)$$

Rozklad síly  $F_{br_{x2}}$  do kolmého a tečného směru na plochu úchytu kotouče:

$$F_{k2} = F_{br_{x2}} \cdot \cos \alpha_2 = 571,6 \cdot \cos 22,805^\circ = 526,9 \text{ N} \quad (2.6)$$

Výsledný kontaktní tlak na jednu plochu úchytu kotouče, v případě že je v kontaktu všech 18 ploch úchytu kotouče:

$$p_{kont2} = \frac{F_{k2}}{A_{kont2}} = \frac{526,9102}{82,28} = 6,4 \text{ MPa} \quad (2.7)$$

Kde plocha  $A_{kont2}$  je průmětem plochy úchytu do roviny, která je kolmá na sílu  $F_{br_{x2}}$ .

Jestliže je uvažovaný dovolený tlak 35 MPa, tak nový návrh s rezervou vyhovuje.

### 2.4.3 Kontrolní MKP výpočet

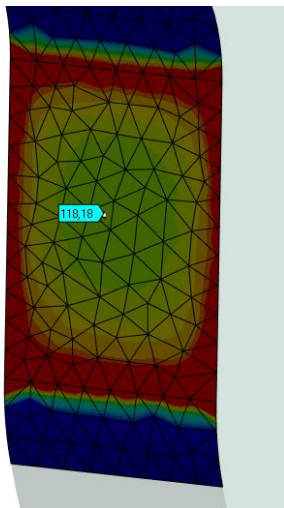
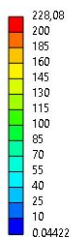
Pro porovnání jsme provedl i výpočet kontaktního tlaku pro obě varianty. Výpočet jsem provedl v MKP modelu celé sestavy. Nastavení simulace je obdobné, jako v kapitole 2.6. Pro tento výpočet jsem však zanedbal lisování ložisek, jelikož kvůli přesahu lisování a přesnému geometrickému dosednutí náboje a kotouče vznikala v místě kontaktu náboj-kotouč nerealistická napětí.



Síť byla nastavena na velikost 0,5 mm. Elementy na náboji jsou tetrahedrony, na kotouči je typ multizone.

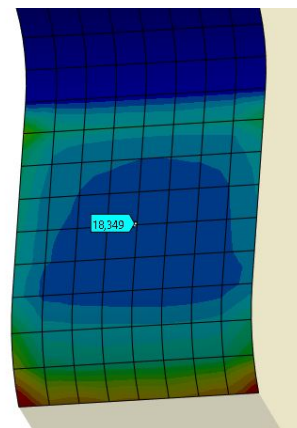
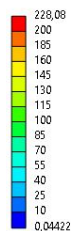
Nejvyšší napětí vychází na úchytech, které jsou nejbližší promítnutým brzdovým destičkám. Výsledky simulací jsou zobrazeny na obrázcích 2.33 a 2.34.

A: v09\_base  
Pressure  
Type: Pressure  
Unit: MPa  
Time: 2 s  
Max: 451,5  
Min: -135,29  
Deformation Scale Factor: 1.0 (True Scale)  
17.03.2024 13:55



Obrázek 2.33: Kontaktní tlak na úchyty kotouče, původní geometrie

A: v09\_05  
Pressure  
Type: Pressure  
Unit: MPa  
Time: 2 s  
Max: 247,19  
Min: -96,736  
Deformation Scale Factor: 1.0 (True Scale)  
17.03.2024 13:54

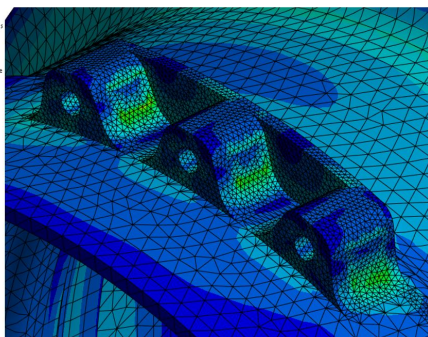
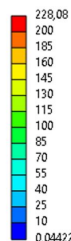


Obrázek 2.34: Kontaktní tlak na úchyty kotouče, nová geometrie

Ze simulace je patrné, že změnou geometrie a navýšením počtu úchyťů dojde k lepšímu rozložení napětí. Dále také podle simulace vycházejí vyšší tlaky, než podle analytického výpočtu. To může být zapříčiněno tím, že ke největším deformacím zřejmě dochází v místě, kde je promítnutá geometrie brzdových destiček. Dochází tudíž k nerovnoměrnému rozložení tlaku na úchyty kotouče, podobně jak by to mohlo být v realitě.

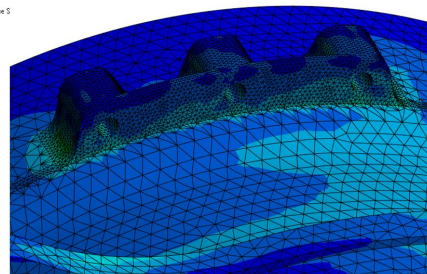
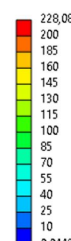
Na následujících obrázcích 2.35 a 2.36 je vidět vznikající napětí na úchytech kotouče. Jedná se o stejnou simulaci, ale je zobrazeno Von-Misses napětí.

A: v09\_05  
Equivalent Stress  
Type: Equivalent (von-Mises) Stress  
Unit: MPa  
Maximum Over Time s  
Max: 226,99  
Min: 0,046534  
Deformation Scale Factor: 1.0 (True Scale)  
17.03.2024 14:14



Obrázek 2.35: Von-Misses napětí na úchyty kotouče

A: v09\_05  
Equivalent Stress  
Type: Equivalent (von-Mises) Stress  
Unit: MPa  
Maximum Over Time s  
Max: 226,99  
Min: 0,046534  
Deformation Scale Factor: 1.0 (True Scale)  
17.03.2024 14:14



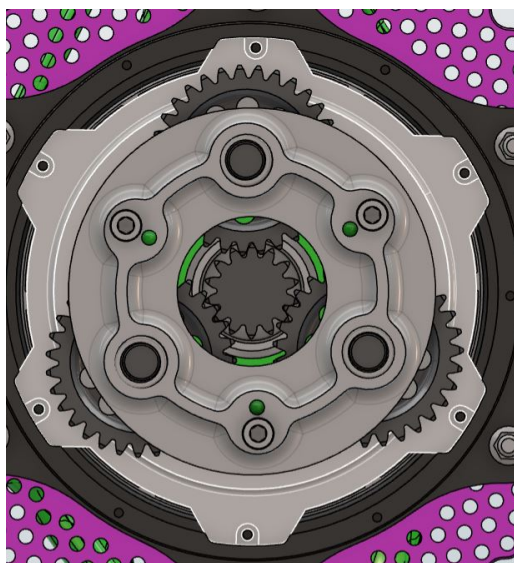
Obrázek 2.36: Von-Misses napětí na úchyty kotouče

Napětí v simulaci dle přiložené škály nepřesahuje uvažovanou mez kluzu ma-

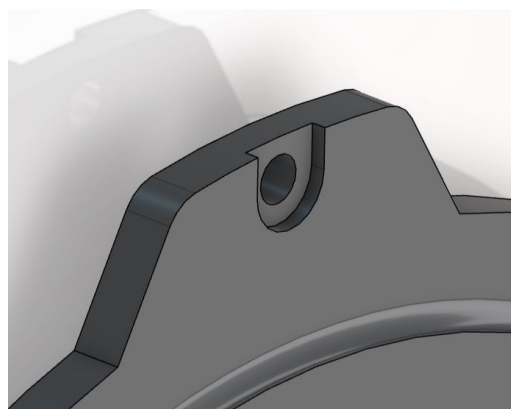
terialu EN AW 7075 360 MPa. Nový návrh považují za vhodný.

## 2.5 Uložení korunového kola

Přenos kroutícího momentu od motoru na náboj je realizován pomocí korunového kola. Pro přenos kroutícího momentu jsou na korunovém kole vytvořeny výstupky (obrázek 2.37 a 2.38), které zapadají do drážek v náboji. Korunové kolo je pak axiálně zajištěno pomocí šroubů v těchto drážkách.



Obrázek 2.37: Korunové kolo



Obrázek 2.38: Výstupek korunového kola

Stejně jako tomu bylo u uložení brzdového kotouče, na kontaktní ploše mezi korunovým kolem a nábojem docházelo k plastickým deformacím materiálu náboje, což mělo za důsledek zvětšení radiální vůle uložení korunového kola. Obdobně jako u uložení brzdového kotouče provedu kontrolní výpočet kontaktního tlaku.

### 2.5.1 Výpočet kontaktního tlaku pro konstrukci na monopostu FSE.12

Největší uvažovaný kroutící moment na kole:

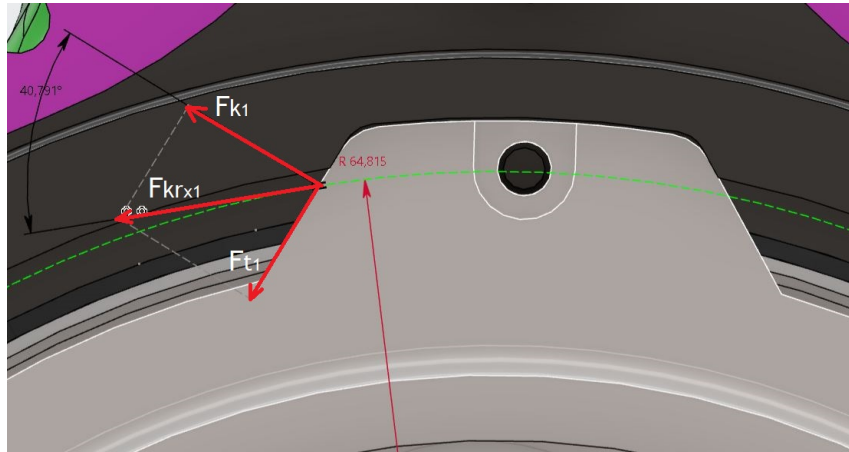
$$M_{kr} = 350 \text{ Nm} \quad (2.8)$$

Kde hodnota  $M_{kr}$  vychází z maximálního kroutícího momentu motoru a převodového poměru planetové převodovky. Do momentu byla zahrnuta i bezpečnostní rezerva.

Síla ve směru  $x$  působící na jednu plochu úchyty korunového kola (dle obrázku 2.39):

$$F_{kr_{x1}} = \frac{M_{kr}}{r_{kr1} \cdot i_1} = \frac{350}{0,064815 \cdot 6} = 900 \text{ N} \quad (2.9)$$

Kde  $r_{kr1}$  je poloměr plochy úchytu korunového kola a  $i_1$  je počet ploch výstupků.



Obrázek 2.39: Rozklad síly na plochu výstupků korunového kola

Pro sílu kolmou na plochu úchytu korunového kola platí:

$$F_{k1} = F_{kr_{x1}} \cdot \cos(\alpha) = 900 \cdot \cos(40,791^\circ) = 681,39 \text{ N} \quad (2.10)$$

Kde  $\alpha$  vychází z geometrie korunového kola dle obrázku 2.39.

Pro kontaktní tlak na jednu plochu úchytu korunového kola platí:

$$p_{kont1} = \frac{F_{k1}}{A_{kont1}} = \frac{681,39}{16,48} = 41,36 \text{ MPa} \quad (2.11)$$

Kde  $A_{kont1}$  je plocha úchytu výstupku korunového kola, která vychází z geometrie konstrukce.

Jak jsem se již zmínil v kapitole 2.4, dovolený tlak pro slitinu EN AW 7075 T6 uvažuji 35 MPa. Výsledný kontaktní tlak  $p_{kont1}$  je vyšší než dovolený tlak, tudíž konstrukce korunového kola na otláčení nevyhovuje.

## 2.5.2 Navrhované změny

Za účelem snížení kontaktního tlaku na výstupcích korunového kola jsem se rozhodl pouze pro zvětšení plochy úchytu výstupků, a to zvětšením tloušťky výstupků korunového kola. Z důvodů těsnění, které popíši v kapitole 2.3.1, mohlo dojít ke zmenšení největšího průměru výstupků o 2,6 mm. Dále jsem z korunového kola odstranil díry pro šrouby, které měly sloužit k axiálnímu zajištění kotouče. V praxi se totiž ukázalo, že se tyto šrouby neustále povolovaly, a to vzhledem k tomu, že se jednalo o šrouby



M3 a nebylo možné je pojistit proti povolení. Axialní zajištění korunového kola bude zajištěno pomocí hliníkové distační podložky, která bude mezi korunovým kolem a pokličkou náboje.

Pro kontrolu nové konstrukce provedu opět výpočet kontaktního tlaku.

Jelikož nedošlo ke změně průměru roztečné kružnice nebo úhlu  $\alpha$ , působící síla bude stejná. Pro kontaktní tlak pak tedy bude platit:

$$p_{kont_2} = \frac{F_{k_1}}{A_{kont_2}} = \frac{681,39}{20,493} = 33,25 \text{ MPa} \quad (2.12)$$

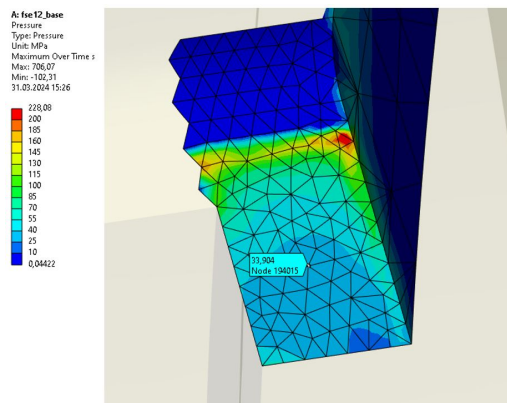
Kde  $A_{kont_2}$  je plocha upraveného úchyty výstupku korunového kola.

Vypočtený tlak je nižší, než tlak dovolený. Nový návrh považuji za dostatečný.

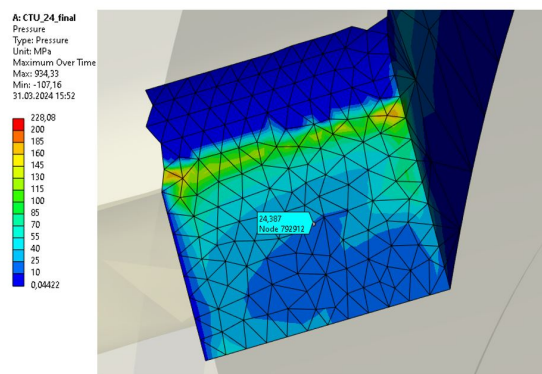
### 2.5.3 Kontrolní MKP výpočet

Pro porovnání jsem provedl i numerický MKP výpočet obou konstrukcí. Výpočet jsem opět provedl v rámci výpočtu celé sestavy. Nastavení simulace je stejné, jako v kapitole 2.6. Síť v místě kontaktu byla na obou plochách nastavena na 0,5mm. Elementy na obou tělesech jsou tetrahedrony. Přenos kroutícího momentu byl simulován pomocí funkce moment na zjednodušený model korunového kola, a to bez jeho ozubení.

Výsledky MKP výpočtů jsou vidět na následujících obrázcích 2.40 a 2.41.



Obrázek 2.40: Kontaktní tlak na FSE.12



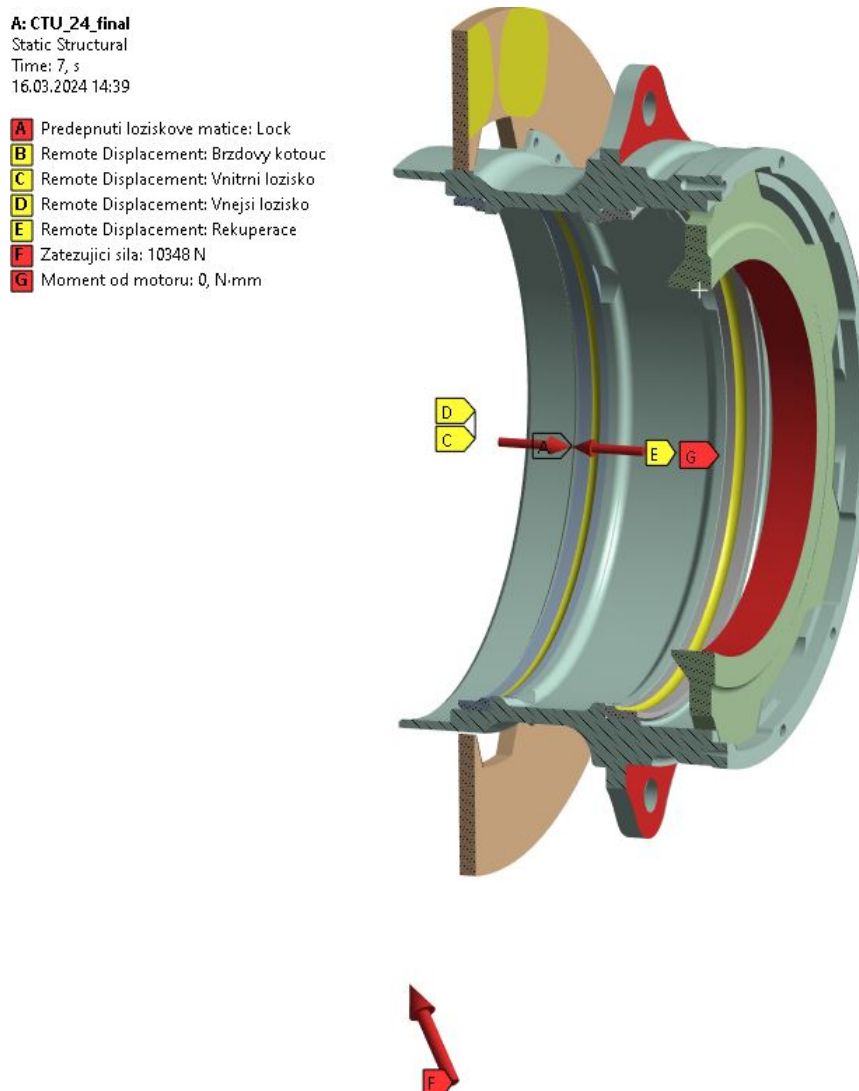
Obrázek 2.41: Kontaktní tlak na CTU.24

Z výsledků je patrné, že nový návrh konstrukce korunového kola vykazuje nižší kontaktní tlak. Došlo také k lepšímu rozložení tlaku na ploše výstupku. Dále je v obrázcích vidět, že na hraně výstupku je větší tlak, než na ploše výstupku. Tento skok by mohl být zapříčiněn tečnou složkou síly, kterou jsem při analytickém výpočtu neuvažoval. Plastické deformace na náboji, který byl použit na monopostu FSE.12,

se však vyskytují převážně v místech, kde je na obrázcích ze simulace označený kontaktní tlak. Jelikož v těchto místech došlo ke snížení tlaku, považují tento návrh, společně s přihlédnutím k analytickému výpočtu, za dostatečný.

## 2.6 Kontrolní MKP výpočet sestavy

Kontrolní MKP výpočet byl proveden v programu Ansys 2023 R2. Výpočet proběhl pro všechny uvažované stavy vozidla dle tabulky 2.2. Na obrázku 2.42 je zobrazen řez výpočtovým modelem sestavy.



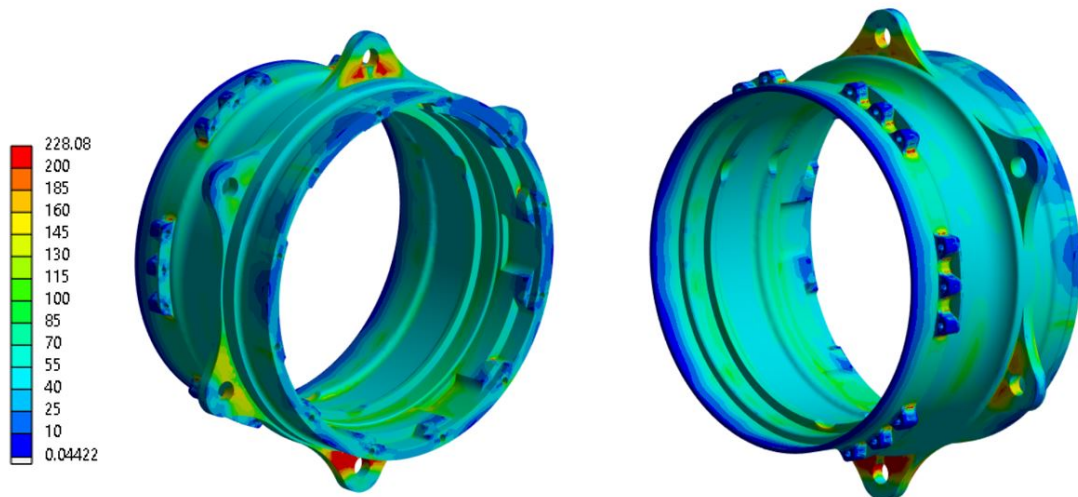
Obrázek 2.42: Výpočtový model sestavy v programu Ansys 2023 R2

### 2.6.1 Okrajové podmínky

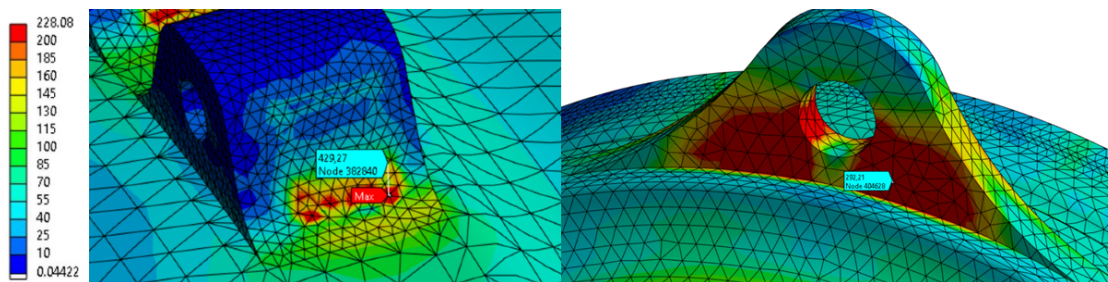
Zatěžující síla  $F$  byla na náboj aplikována pomocí prvku remote point. Chování tohoto prvku je nastaveno na deformable a byl aplikován na plochu náboje, která je v kontaktu s ráfkem. Mezi ložisky a nábojem je definován frikční kontakt s koeficientem 0,2. Lisování ložisek je modelováno pomocí přesahu v nastavení frikčního kontaktu. Předpětí od ložiskové matice je simulováno pomocí elementu typu beam, na který je pomocí funkce bolt preload aplikována příčná síla 8200 N. Ložiskům je zakázán pohyb pomocí funkcí remote displacement, čímž je celý model ukotven v prostoru. Mezi kotoučem a nábojem je definovaný opět frikční kontakt s koeficientem 0,2. Pro případ brzdění je ve směru osy  $x$  a rotace kolem osy  $y$  zakázán pohyb náboje pomocí funkce remote displacement. Stejné nastavení okrajových podmínek je aplikováno na korunové kolo. Moment od motoru je simulován pomocí funkce moment.

### 2.6.2 Výsledky MKP výpočtu

Na obrázku 2.43 je zobrazeno napětí Von-Misses na náboji. Je z něj patrné, že k největšímu namáhání dochází na úchytech ráfku na úchytech kotouče.



Obrázek 2.43: Napětí Von-Misses na náboji



Obrázek 2.44: Napětí Von-Misses na náboji

Na obrázku 2.44 jsou zobrazena kriticky namáhaná místa na náboji. Na levém obrázku je možné vidět namáhání na úchyty kotouče. Dle mého názoru je toto namáhání však nereálné. Je v simulaci způsobeno simulováním lisování ložisek. Ve výpočtovém modelu je totiž zanedbána kvůli konvergenci výpočtu nepatrná vůle mezi kotoučem a nábojem. V kroku 1 simulace, kde dojde k simulaci lisování ložisek, se náboj deformuje a dochází tak i k předepínání kotouče. Ve skutečnosti však bude zajištěno uložení s vůlí, proto toto namáhání ve výpočtovém modelu nebude uvažovat. Napětí bez lisování ložiska je možné vidět na obrázku 2.35 a 2.36.

K největšímu namáhání tedy dochází na úchytech ráfku, které je možné vidět opět na obrázku 2.44. Největší napětí  $\sigma_{max}$  tedy budu uvažovat 292,21 MPa. Pro bezpečnost k mezi kluzu pak bude platit:

$$k_m = \frac{\sigma_{kluz}}{\sigma_{max}} = \frac{360}{292,21} = 1,23 \quad (2.13)$$

Kde  $\sigma_k$  byla určena v kapitole 1.3.2.

Bezpečnost 1,23 vůči uvažované mezi kluzu považuji za dostatečnou.

## 3 Výroba

V této kapitole bude popsána technologičnost konstrukce náboje. Dále zde popíšu mnou navržený výrobní postup náboje a přípravků k jeho upínání.

### 3.1 Zvolená technologie výroby

Jak jsem se již zmínil v kapitole 1.3.2, většina kolových nábojů pro závodní účely je vyráběna třískovým obráběním. Mnou navržené náboje pro monopost CTU.24 budou vyráběny stejnou technologií. S tím bylo počítáno již od začátku návrhu, proto tomu byl také díl přizpůsoben. Návrh výrobního postupu pro obrábění musel být také přizpůsoben tomu, aby bylo možné náboj vyrobit v laboratořích Ústavu obrábění, projektování a metrologie.

### 3.2 Technologičnost konstrukce

Při návrhu výrobního postupu bylo důležité, aby byly splněny všechny konstrukční požadavky, které jsem navrhl. Při tvorbě výkresové dokumentace jsem mnou vybrané délkové a geometrické konzultace probíral s vedoucím mé práce. V případě nemožného, či velmi složitého dodržení těchto tolerancí jsem upravoval konstrukci tak, aby bylo možné náboj vyrobit. Výkresová dokumentace náboje je přílohou této práce (Příloha 1).

#### 3.2.1 Plocha pro ložiska

Dle výkresové dokumentace je nutné dodržet vzájemnou souosost děr pro ložiska. Toho jsem se rozhodl docílit tak, že budou obě plochy obráběny na jedno upnutí vnitřním upichovacím nožem. V opačném případě by mohlo dojít k případnému vyosení při přeupnutí. Při obrábění tímto způsobem bude docíleno i celkového házení ploch, na která dosedají ložiska v axiálním směru.

### 3.2.2 Uchycení kotouče a korunového kola

Kontury uchycení kotouče a korunového kola budou vyrobeny frézováním. Vzhledem k jejich funkci je nutné, aby osa frézy byla rovnoběžná k ose náboje, respektive k ose ploch pro ložiska. Pro dosažení této souososti jsem navrhl upínací přípravek, o kterém budu psát níže.

Vzhledem ke konstrukci a jejím požadavkům jsem rozdělil výrobní postup na následující operace:

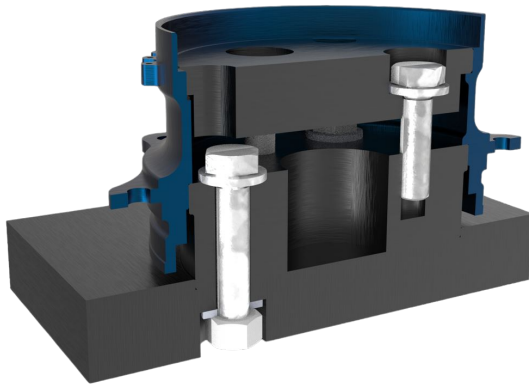
- Řezání polotovaru
- Hrubování na frézce
- Soustružení
- Upíchnutí náboje od polotovaru
- Frézování levé strany náboje
- Frézování pravé strany náboje
- Frézování kontury pro výpustný šroub

### 3.3 Návrh upínacích přípravků

Vzhledem k poměrně tenkostěnné konstrukci náboje musel být pro upnutí do frézky vyroben upínací přípravek. V případě, že by byl náboj upnut do čelistí, mohlo by dojít k nepřiměřeným deformacím náboje. Jedna z možných řešení by bylo použít soustružených měkkých čelistí, ale rozhodl jsem se vydat cestou výroby jiného upínacího přípravku, jelikož na ten jsem měl k dispozici materiál od týmu eForce Prague Formula.

Navržený přípravek je zobrazen na obrázku 3.1, a jeho realizace pak na obrázku 3.2

Přípravek se skládá ze tří částí, které jsou spojené pomocí šroubů M12. Spodní deska je připevněna na stůl frézky pomocí upínek. Na straně desky byla vyfrézovaná rovná plocha, díky které se pomocí úchylkoměru deska ustaví tak, aby byla v souladu s osami frézky. Do této desky se připevní válcový kus, o který je za axiální ložiskové plochy opřen náboj. Průměr válcového kusu je o 0,01 mm menší než průměr ložiskových ploch na náboji. Tím je docíleno poměrně přesné uložení náboje a bude tak zajištěna požadovaná souosost a kolmost obráběných kontur. Ze shora je pak náboj zaklopen horním kusem, který slouží k tuhému připevnění náboje při obrábění. V horním válcovém kusu přípravku jsou výřezy kvůli obrábění servisních kapes pro



Obrázek 3.1: Návrh upínacího přípravku pro frézování náboje



Obrázek 3.2: Vyrobený přípravek se zkušebním výtiskem náboje

ložiska. Přípravek je možné použít pro obě operace frézování, obrobek je možné po demontáži horní části přípravku jednoduše otočit. V základní desce jsou vyvrtány dvě díry pro kolíky, které slouží k ustavení rotační polohy náboje mezi operací frézování pravé a frézování levé strany.

### 3.4 Výrobní postup

Náboje byly vyráběny na strojích Ústavu obrábění, projektování a metrologie. Jednalo se soustruh Okuma Genos L200E-MY a 3-osou frézku Haas VF-2.

#### 3.4.1 Volba polotovaru

Průměr polotovaru byl zvolen na základě dostupnosti na trhu. Největší průměr obrobku je 180 mm a nejbližší vyšší průměr polotovaru je 200 mm. Délka obrobku je 82,90 mm. Pro upnutí do sklíčidla uvažuji přídavek 15 mm. Po operaci soustružení bude upínací část obrobku oddělena od zbytku obrobku pomocí řezání. Pro řezání upínací plochy a samotné řezání polotovaru uvažuji přídavek 7 mm. Celkovou délku polotovaru tedy volím po zaokrouhlení na 105 mm.

#### 3.4.2 Řezání polotovaru

Polotovar byl řezán na pásové pile Pilous ARG 300 plus S. A. F7 v halových laboratořích Ústavu obrábění, projektování a metrologie. Vzhledem k celkové délce tyče bylo nutné použít přídavný válečkový dopravník.





Obrázek 3.3: Řezání polotovaru na pásové pile

### 3.4.3 Hrubování na frézce

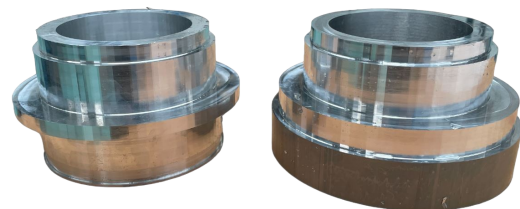
Prvním úsekem muselo být vrtání polotovaru, a to z důvodu vnitřního soustružení. Provádět tuto operaci je jednodušší na frézce, než na soustruhu. Další nutností bylo obrobit zakusovací drážku pro čelist na soustruhu. Po konzultaci s vedoucím práce jsem se rozhodl celý polotovar předhrubovat na frézce, aby došlo k rotaci co nejmenší hmoty při operaci soustružení.

Hrubování se skládalo ze dvou operací, z hrubování horní a spodní strany. Při obou operacích byl polotovar upnut do sklíčidla, které bylo připevněné ke stolu frézky. Způsob upnutí je možné vidět na obrázku 3.4.

Díl po operaci 10 je možné vidět na obrázku 3.5 vpravo, na levé straně je vidět polotovar po operaci 20. Detaily strategií jsou zobrazeny v tabulce 3.1 a 3.2.



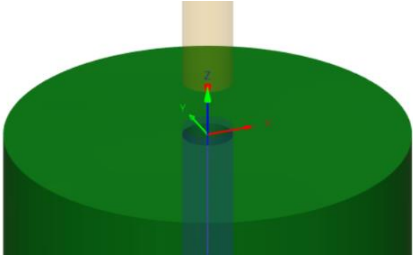
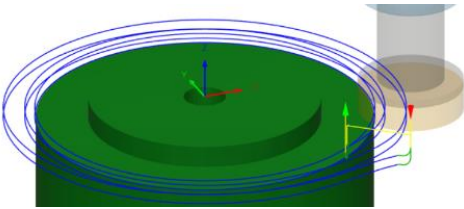
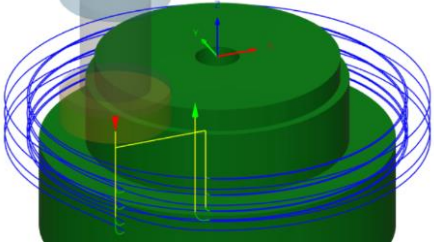
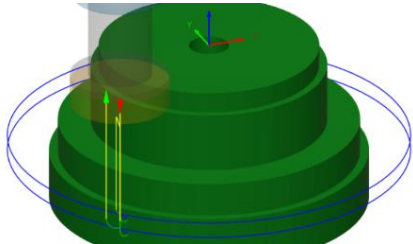
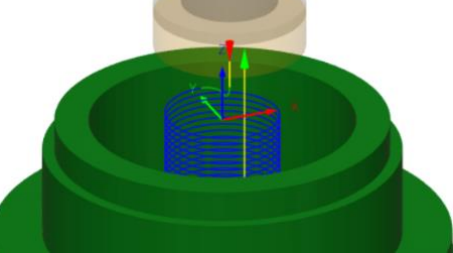
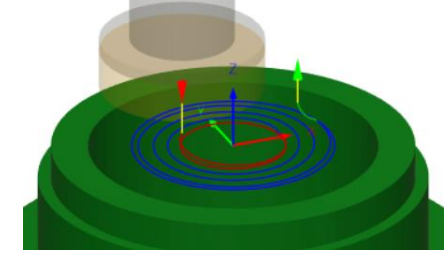
Obrázek 3.4: Upnutí polotovaru do sklíčidla



Obrázek 3.5: Obrobek po hrubování



Tabulka 3.1: Operace 10

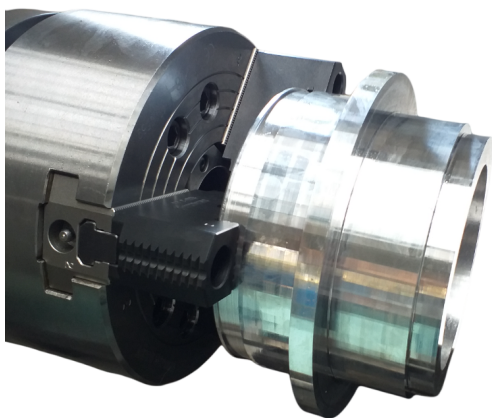
Úsek	Nástroje	Řezné podmínky	Dráha nástroje
Vrtání díry D25	T1	$v_c = 260\text{m/min}$ $a_p = 25\text{ mm}$ $f_n = 0,07$	
Hrubování vnější kontury 1	T2	$v_c = 400\text{m/min}$ $a_p = 10\text{ mm}$ $f_z = 0,05$	
Hrubování vnější kontury 2	T2	$v_c = 400\text{m/min}$ $a_p = 10\text{ mm}$ $f_z = 0,05$	
Hrubování vnější kontury 3	T2	$v_c = 400\text{m/min}$ $a_p = 10\text{ mm}$ $f_z = 0,05$	
Hrubování vnitřní kontury	T2	$v_c = 400\text{m/min}$ $a_p = 1,5\text{ mm}$ $f_z = 0,04$	
Zarovnání horní plochy	T2	$v_c = 400\text{m/min}$ $a_p = 1\text{ mm}$ $f_z = 0,04$	

Tabulka 3.2: Operace 20

Úsek	Nástroje	Řezné podmínky	Dráha nástroje
Vrtání díry D25	T1	$v_c = 260\text{m/min}$ $a_p = 25\text{mm}$ $f_n = 0,07\text{mm/ot}$	
Hrubování vnější kontury	T2	$v_c = 400\text{m/min}$ $a_p = 10\text{mm}$ $f_z = 0,05\text{mm}$	
Zarovnění horní plochy	T2	$v_c = 400\text{m/min}$ $a_p = 0,1\text{mm}$ $f_z = 0,04\text{mm}$	
Frézování vnější drážky pro upnutí do sklíčidla na soustruhu	T3	$v_c = 200\text{m/min}$ $a_p = 1\text{mm}$ $f_z = 0,035\text{mm}$	
Zkosení horní hrany	T4	$v_c = 200\text{m/min}$ $a_p = 1\text{mm}$ $f_z = 0,03\text{mm}$	
Obrobení drážky na jemno	T5	$v_c = 200\text{m/min}$ $a_p = 1\text{mm}$ $f_z = 0,035\text{mm}$	

### 3.4.4 Obrábění na soustruhu

Další operací bylo soustružení na soustruhu Okuma Genos L200E-MY. Během operací hrubování byla do obrobku vytvořena zakusovací drážka pro upnutí do sklíčidla. Obrobek byl upnut dle obrázku 3.6. Pro další operace frézování byl v radiálním směru u držáků brzdového kotouče a ráfku zvolen přídavek 0,1 mm. Detailnější informace o operaci 30 soustružení jsou zobrazeny v tabulce 3.3.

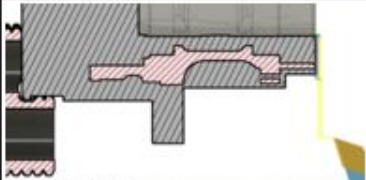
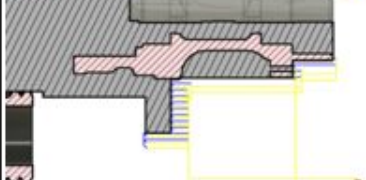


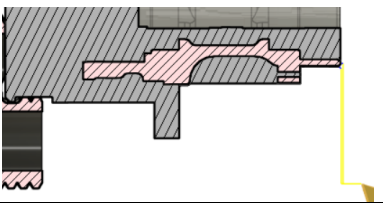
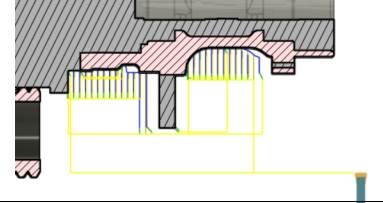
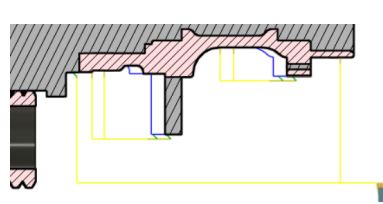

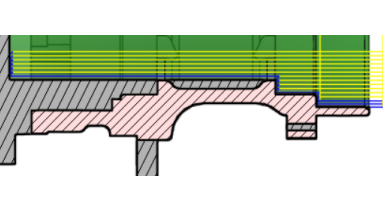
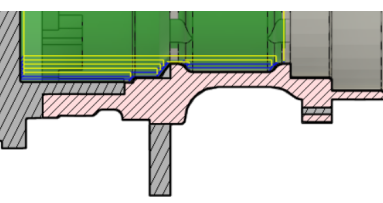
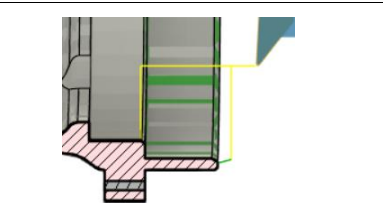
Obrázek 3.6: Upnutí obrobku do sklíčidla

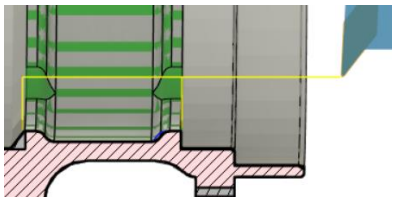
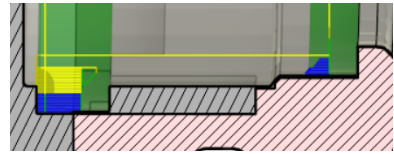
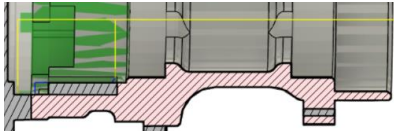
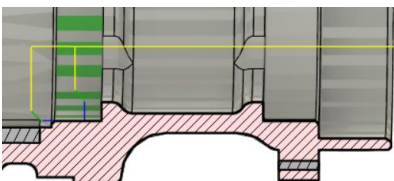
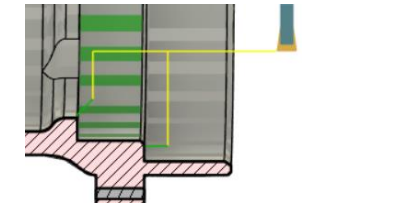
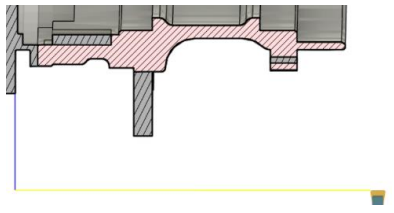


Obrázek 3.7: Obrobek po soustružení

Tabulka 3.3: Operace 30

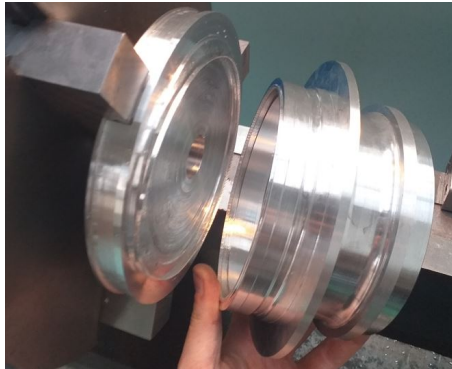
Úsek	Nástroje	Řezné podmínky	Dráha nástroje
Zarovnění čela	T6	$v_c = 200\text{m/min}$ $a_p = 1\text{mm}$ $f = 0,05\text{mm/ot}$	
Hrubování vnější kontury 1	T6	$v_c = 200\text{m/min}$ $a_p = 2\text{mm}$ $f = 0,3\text{mm/ot}$	

Úsek	Nástroje	Řezné podmínky	Dráha nástroje
Sražení hrany	T6	$v_c = 200\text{m/min}$ $a_p = 2\text{mm}$ $f = 0,03\text{mm/ot}$	
Hrubování vnější kontury 3	T7	$v_c = 200\text{m/min}$ $f = 0,08\text{mm/ot}$	
Soustružení vnitřní kontury na jemno	T7	$v_c = 200\text{m/min}$ $f = 0,03\text{mm/ot}$	
Hrubování vnitřní kontury 1	T8	$v_c = 200\text{m/min}$ $a_p = 1\text{mm}$ $f = 0,3\text{mm/ot}$	
Hrubobání vnitřní kontury 2	T8	$v_c = 200\text{m/min}$ $a_p = 1,5\text{mm}$ $f = 0,3\text{mm/ot}$	
Hrubování vnitřní kontury 3	T8	$v_c = 200\text{m/min}$ $a_p = 1\text{mm}$ $f = 0,15\text{mm/ot}$	
Soustružení vnitřní kontury na jemno – plocha pro gufero	T8	$v_c = 200\text{m/min}$ $f = 0,05\text{mm/ot}$	

Úsek	Nástroje	Řezné podmínky	Dráha nástroje
Soustružení vnitřní kontury na jemno – drážka mezi ložisky	T8	$v_c = 200\text{m/min}$ $f=0,05\text{mm/ot}$	
Hrubování vnitřní kontury upichovacím nožem	T9	$v_c = 30\text{ m/min}$ $a_p=0,2\text{ mm}$ $f=0,05\text{mm/ot}$	
Soustružení vnitřní kontury na jemno – kontura za ložisky	T9	$v_c = 30\text{ m/min}$ $f=0,03\text{mm/ot}$	
Soustružení vnitřní kontury na jemno – vnitřní ložisko	T9	$v_c = 30\text{ m/min}$ $f=0,03\text{mm/ot}$	
Soustružení vnitřní kontury na jemno – vnější ložisko	T9	$v_c = 30\text{ m/min}$ $f=0,03\text{mm/ot}$	
Upíchnutí drážky pro následné dělení obrobku	T7	$v_c = 200\text{m/min}$ $f=0,08\text{mm/ot}$	

### 3.4.5 Upíchnutí náboje od polotovaru

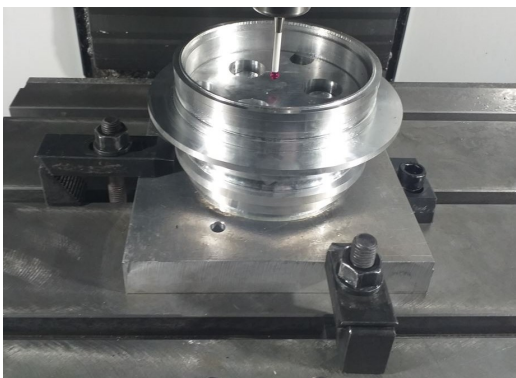
Vzhledem k větší hmotnosti obrobku a nemožnosti jeho zachycení ve stroji jsem se po konzultaci s vedoucím práce rozhodl díl během soustružení na CNC stroji neupíchnovat, ale oddělit obrobek od upínací plochy až po operaci soustružení. K oddělení došlo na konvenčním soustruhu. Upíchnutí je zobrazeno na obrázku 3.8.



Obrázek 3.8: Dělení obrobku po soustružení

### 3.4.6 Operace frézování

Posledními operacemi bylo frézování. Nejdříve došlo k frézování kontury levé a pak pravé strany. Obě operace byly provedeny na frézce Haas VF-2. Obrobek byl upnutý do upínacího přípravku, který byl připevněn k stolu frézky pomocí upínek. Upnutí pro operaci 50 je zobrazeno na obrázku 3.9. Pro následující operaci 60 je upnutí zobrazeno na obrázku 3.10. K upnutí byl použit stejný upínací přípravek, k ustavení polohy byl použit kolíček, který zajistí natočení obrobku, a to přes díry pro kolové šrouby.



Obrázek 3.9: Upnutí obrobku pro operaci 50

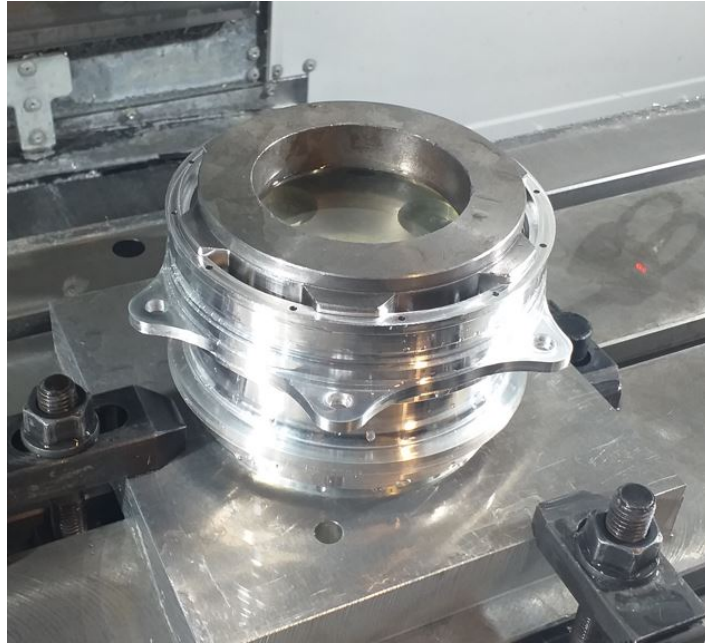


Obrázek 3.10: Upnutí obrobku pro operaci 60

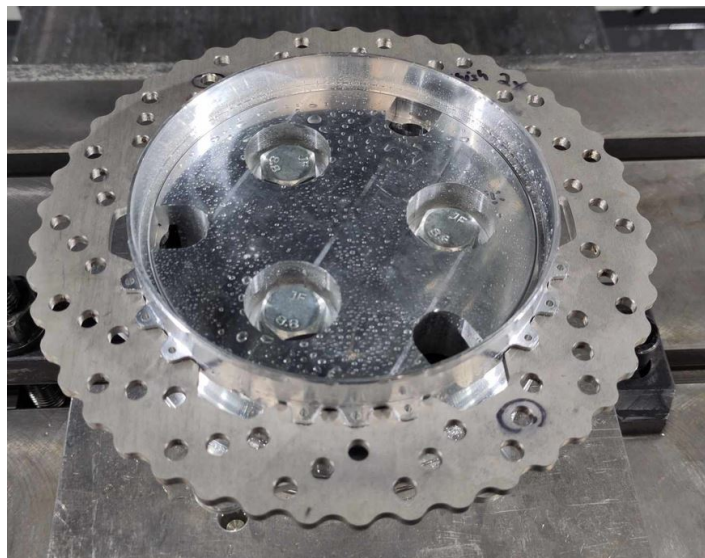
Detailní informace o operaci 50 a 60 jsou zobrazeny v tabulkách 3.4 a 3.5. Obrobek po operaci 50 a 60 je možné vidět na obrázku 3.11 a 3.12. Na obrázcích je možné



vidět zkoušení smontovatelnosti náboje s ostatními díly kolové skupiny. Jelikož jsem měl tyto díly k dispozici, bylo možné upravovat patřičné rozměry a tolerance náboje podle toho, aby bylo docíleno co nejmenší provozní vůle pro všechny rozměry.

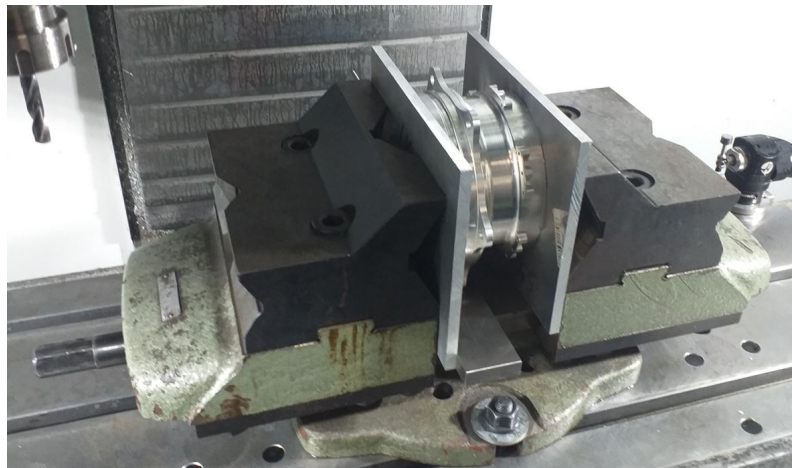


Obrázek 3.11: Obrobek po operaci 50

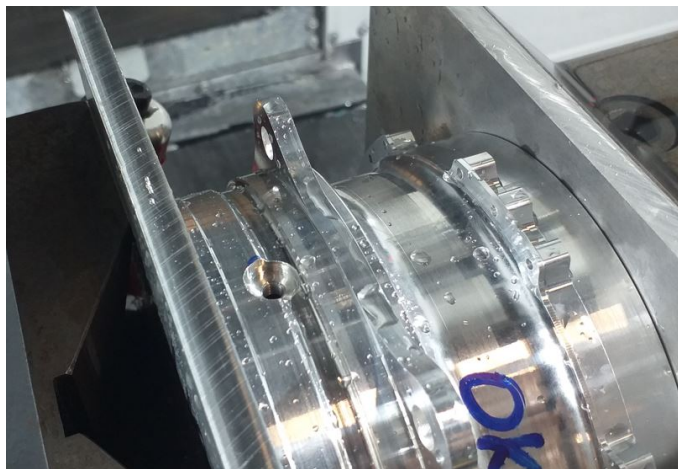


Obrázek 3.12: Obrobek po operaci 60

Poslední operací bylo frézování kontury pro výpustný šroub. Pro opnutí bylo zamýšleno použít opět mnou navržený přípravek, ale nakonec bylo zvoleno upnutí do svěráku, které je zobrazeno na obrázku 3.13. Výsledek operace je možné vidět na obrázku 3.14.



Obrázek 3.13: Upnutí pro operaci 70

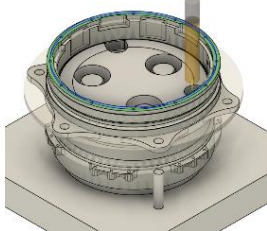
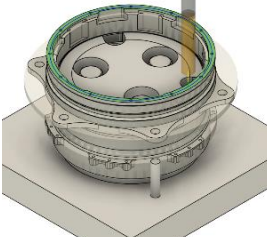
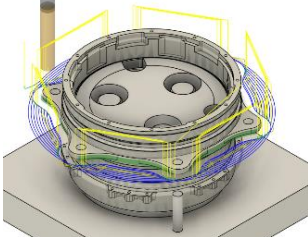
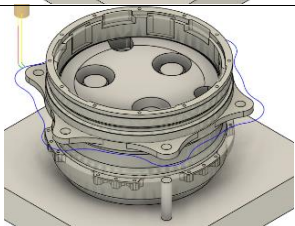
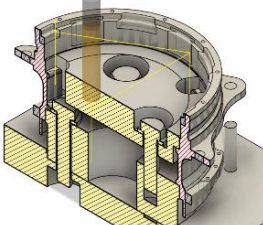
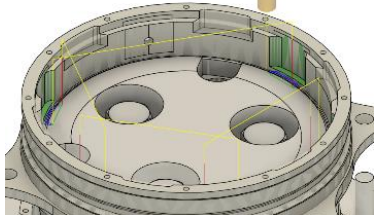
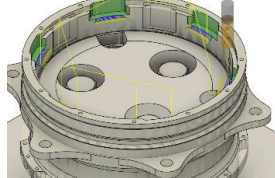


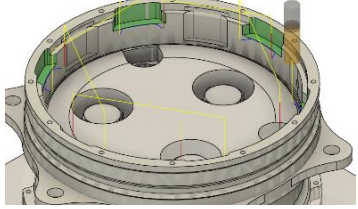
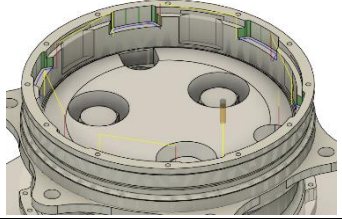
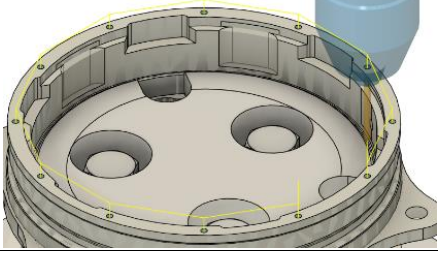
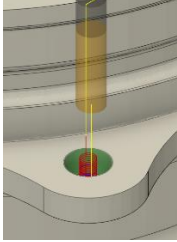
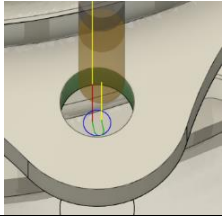
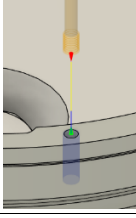
Obrázek 3.14: Obrobek po operaci 70

Detailní informace o operaci 70 jsou zobrazeny v tabulce 3.6.

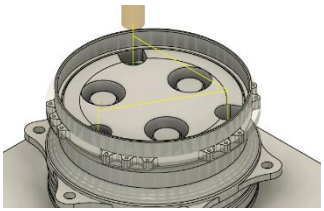
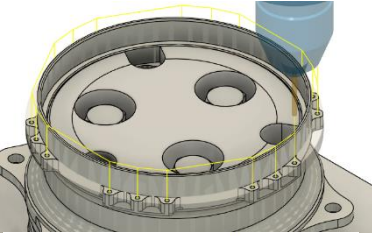
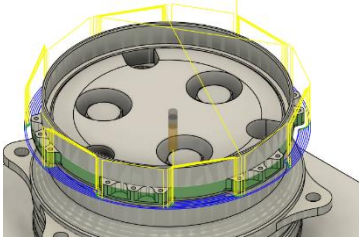
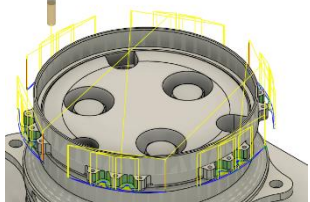
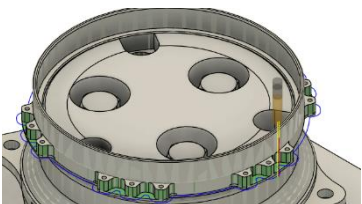


Tabulka 3.4: Operace 50

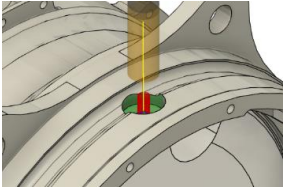
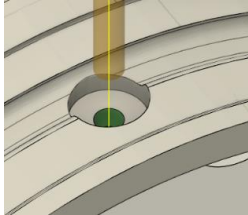
Úsek	Nástroje	Řezné podmínky	Dráha nástroje
Hrubování čela	T10	$v_c = 200\text{m/min}$ $a_p = 1\text{mm}$ $f_z = 0,05\text{mm}$	
Dokončení čela	T10	$v_c = 200\text{m/min}$ $a_p = 0,1\text{mm}$ $f_z = 0,035\text{mm}$	
Hrubování kontury držáků	T10	$v_c = 200\text{m/min}$ $a_p = 2\text{mm}$ $f_z = 0,05\text{mm}$	
Dokončení kontury držáků	T10	$v_c = 200\text{m/min}$ $a_p = 0,1\text{mm}$ $f_z = 0,035\text{mm}$	
Frézování montážních ploch pro ložiska	T10	$v_c = 200\text{m/min}$ $f_n = 0,05\text{mm}$	
Frézování odlehčovacích kapes	T5	$v_c = 200\text{m/min}$ $a_p = 0,8\text{mm}$ $f_z = 0,05\text{mm}$	
Hrubování kapes pro korunové kolo	T5	$v_c = 200\text{m/min}$ $a_p = 1\text{mm}$ $f_z = 0,05\text{mm}$	

Úsek	Nástroje	Řezné podmínky	Dráha nástroje
Dokončení kapes pro korunové kolo v axiálním směru	T5	$v_c = 200\text{m/min}$ $f_z = 0,01\text{mm}$	
Dokončení kapes pro korunové kolo	T11	$v_c = 150\text{m/min}$ $f_z = 0,01\text{mm}$	
Vrtání děr pro závit M3	T12	$v_c = 140\text{m/min}$ $f_n = 0,035\text{mm}$	
Hrubování děr pro kolové šrouby	T13	$v_c = 200\text{m/min}$ $f_z = 0,035\text{mm}$	
Dokončení děr pro šrouby	T13	$v_c = 200\text{m/min}$ $f_z = 0,01\text{mm}$	
Závitování M3	T14	$v_c = 0,1\text{m/min}$	

Tabulka 3.5: Operace 60

Úsek	Nástroje	Řezné podmínky	Dráha nástroje
Frézování montážních ploch pro ložiska	T10	$v_c = 200\text{m/min}$ $f_n = 0,05\text{mm}$	
Vrtání děr D2,4	T12	$v_c = 140\text{m/min}$ $f_z = 0,02\text{mm}$	
Hrubování kontury držáků 1	T15	$v_c = 150\text{m/min}$ $a_p = 1\text{mm}$ $f_z = 0,03\text{mm}$	
Hrubování kontury držáků 2	T15	$v_c = 150\text{m/min}$ $a_p = 1\text{mm}$ $f_z = 0,03\text{mm}$	
Dokončování kontury držáků	T15	$v_c = 150\text{m/min}$ $f_n = 0,01\text{mm}$	

Tabulka 3.6: Operace 70

Úsek	Nástroje	Řezné podmínky	Dráha nástroje
Frézování kapsy pro zátku	T5	$v_c = 150\text{m/min}$ $f_n = 0,03\text{mm}$	
Vrtání díry pro M5 závit	T16	$v_c = 140\text{m/min}$ $f_z = 0,02\text{mm}$	

## 3.5 Použité stroje

### 3.5.1 Pásová pila Pilous ARG 300 plus S. A. F7

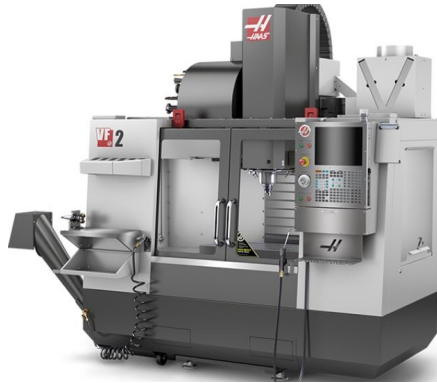


Obrázek 3.15: Pásová pila Pilous ARG 300 plus S. A. F7, převzato z [27]

Tabulka 3.7: Technické údaje pásové pily PILOUS ARG 300 plus S. A. F., převzato z [27]

<b>Motory:</b>	
Hlavní motor pásové pily	2,2 kW
Motor čerpadla pásové pily	0,05 kW
Motor hydraulického agregátu	0,55 kW
<b>Rozměry:</b>	
Rozměry pásové pily (min.)	1740 x 950 x 1560 mm
Rozměry pásové pily (max.)	2190 x 1870 x 2050 mm
Pracovní výška svěráku pily	910 mm
Hmotnost pásové pily	690 kg
<b>Pás:</b>	
Rozměry pilového pásu	3150x 27 x 0,9 mm
Rychlost pilového pásu	15—90 m/min
<b>Kapalina:</b>	
Nádrž chladící kapaliny	cca 15 l
Olej v hydraulickém systému pily	cca 25 l

### 3.5.2 CNC frézka HAAS VF-2



Obrázek 3.16: CNC frézka HAAS VF-2, převzato z [28]

Tabulka 3.8: Technické údaje stroje HAAS VF-2, převzato z [28]

<b>Dráhy pojezdů:</b>	
Osa X, Y, Z	762, 406, 508 mm
<b>Vřeteno:</b>	
Max. výkon	22,4 kW
Max. rychlost	8100 ot/min
Max. moment	122 Nm
<b>Rozměry stolu:</b>	
Délka	914 mm
Šířka	365 mm
Max. zatížení stolu	1391 kg
<b>Rychlosti posuvů:</b>	
Max. obrábění	16,5 m/min
Rychloposuv	25,4 m/min
<b>Zásobník nástrojů:</b>	
Kapacita	20
Max. průměr nástroje	89 mm
Max. hmotnost nástroje	5,4 kg
<b>Rozměry:</b>	
Rozměry	2490 mm x 2320 mm x 2570 mm
Hmotnost	3590 kg

### 3.5.3 Okuma GENOS L200E-MY



Obrázek 3.17: Soustruh Okuma GENOS L200E-MY, převzato z [29]

Tabulka 3.9: Technické údaje o stroji Okuma GENOS L200E-MY, převzato z [29]

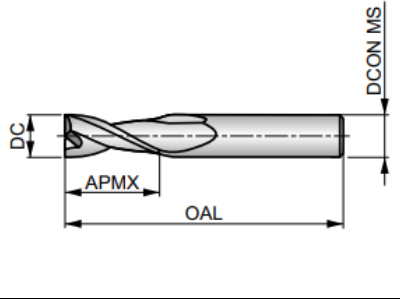
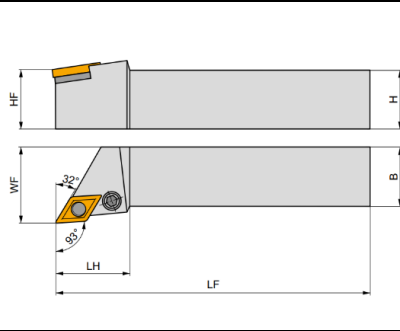
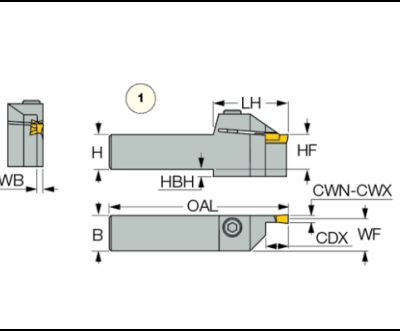
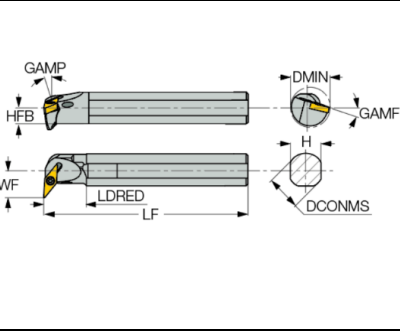
<b>Dráhy pojezdů</b>	
Osa X	762 mm
Osa Y	406 mm
Osa Z	508 mm
<b>Vřeteno</b>	
Max. Výkon	22.4 kW
Max. rychlost	8100 rpm
Max. krouticí moment	122.0 Nm
Mazání ložisek	Vzduch/olej
Chlazení	Kapalinou
<b>Zásobník nástrojů</b>	
Carousel	
Kapacita	20
Max. průměr nástroje (plný)	89 mm
Max. hmotnost nástroje	5.4 kg
Nástroj k nástroji (prům.)	4.2 s
<b>Ostatní</b>	
Objem chladicí kapaliny	208l
Pož. Tlak vzduchu	6,9bar
Hmotnost	3539kg
Rozměry	249 cm x 232 cm x 254 cm

### 3.6 Použité nástroje

Tabulka 3.10: Použité nástroje při obrábění, informace a obrázky převzaty z [30], [29], [30], [31], [32], [33], [34], [35],[35], [36], [37]

Nástroj	Popis		Obrázek
T1	Název	803D-25-75-S32	
	Průměr D	25 mm	
	Délka L	170 mm	
	Vysunutí držáku l <sub>1</sub>	110 mm	
	Břítů	2	
	Délka držáku l <sub>2</sub>	60 mm	
	Max hloubka řezu	75 mm	
	Břítová destička	SCET 070308-UD	
T2	Název	63A05R-S90LN16-C	
	Průměr	63 mm	
	Délka	121 mm	
	Vysunutí z držáku	22 mm	
	Břítů	5	
	Rádus rohu	0,8	
	Max hloubka řezu	16 mm	
	Držák	HSK.63 A-FMH2.22.100	
T3	Název	Frézy pro drážky T 310205	
	Průměr	18 mm	
	Délka	71 mm	
	Vysunutí z držáku	25 mm	
	Břítů	4	
	Rádus rohu	0	
	Max hloubka řezu	5 mm	
	Držák	BT40 ER25	
T4	Název	S7404.0	
	Průměr	4 mm	
	Délka	50 mm	
	Vysunutí z držáku	30 mm	
	Břítů	2	
	Rádus rohu	0 mm	
	Max hloubka řezu	1 mm	
	Držák	BT40 ER25	



Nástroj	Popis		Obrázek
T5	Název	S6108.0	
	Průměr	8 mm	
	Délka L	64 mm	
	Vysunutí držáku	40 mm	
	Břítů	2	
	Rádus rohu	0 mm	
	Max hloubka řezu	20 mm	
	Držák	BT40 ER25	
T6	Název	PDJNR 2020 K 11	
	Destička	DNMG 150404E-NF	
	Délka nože LF	125 mm	
	Výška HF	20 mm	
	Šířka WF	25 mm	
	Délka LH	30 mm	
	Rádus destičky	0,4 mm	
	Šířka B, H	20 mm	
T7	Název	HELIR 2020-4T25	
	Destička	GRIP 4004Y	
	Délka nože OAL	140 mm	
	Výška HF	20 mm	
	Šířka WF	18,4 mm	
	Délka LH	42 mm	
	Rádus destičky	0,4 mm	
	Šířka B, H	20 mm	
T8	Název	ISCAR A20Q SVUNR-12	
	Destička	VNMM11T304	
	Délka nože LF	180 mm	
	Délka LDRED	38 mm	
	Šířka WF	16 mm	
	DMIN	26,5 mm	
	Rádus destičky	0,4 mm	
	Šířka H	18 mm	

Nástroj	Popis		Obrázek
T9	Název	GEHIR 16-20-3-T8	
	Destička	GEPI 3.00-0.20	
	Délka nože OAL	160	
	Výška HF	7,5 mm	
	Šířka WF	16,1 mm	
	Délka LDRED	40 mm	
	Rádus destičky	0,2 mm	
	Šířka DCONMS	16 mm	
T10	Název	S61016.0	
	Průměr	16 mm	
	Délka OAL	90 mm	
	Vysunutí držáku	70 mm	
	Břítů	2	
	Rádus rohu	0 mm	
	Max hloubka řezu	32 mm	
	Držák	BT40 ER25	
T11	Název	S6103.0XD3	
	Průměr	3 mm	
	Délka OAL	40 mm	
	Vysunutí držáku	20 mm	
	Břítů	2	
	Rádus rohu	0 mm	
	Max hloubka řezu	9 mm	
	Držák	BT40 ER25	
T12	Název	A9002.4	
	Průměr	2,4 mm	
	Délka OAL	57 mm	
	Vysunutí držáku	20 mm	
	Břítů	2	
	Rádus rohu	0 mm	
	Max hloubka řezu	30 mm	
	Držák	BT40 ER25	

Nástroj	Popis		Obrázek
T13	Název	S7156.0	
	Průměr	6 mm	
	Délka OAL	100 mm	
	Vysunutí držáku	60 mm	
	Břítů	2	
	Rádus rohu	0 mm	
	Max hloubka řezu	38 mm	
	Držák	BT40 ER25	
T14	Název	E397M3	
	Průměr	3	
	Délka OAL	56 mm	
	Vysunutí držáku	25 mm	
	Břítů		
	Rádus rohu	0 mm	
	Max hloubka řezu	18 mm	
	Držák	BT40 ER25	
T15	Název	S6105.0	
	Průměr	5 mm	
	Délka OAL	50 mm	
	Vysunutí držáku	30 mm	
	Břítů	2	
	Rádus rohu	0 mm	
	Max hloubka řezu	15 mm	
	Držák	BT40 ER25	
T16	Název	A9002.4	
	Průměr	4,2 mm	
	Délka OAL	75 mm	
	Vysunutí držáku	30 mm	
	Břítů	2	
	Rádus rohu	0 mm	
	Max hloubka řezu	43 mm	
	Držák	BT40 ER25	

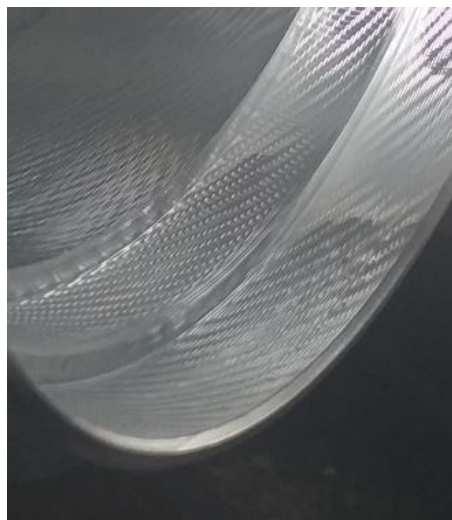
### 3.7 Zhodnocení výrobního postupu

Celkem bylo pro tým eForce Prague Formula vyrobeno 5 funkčních nábojů. 4 budou osazeny na nový monopost CTU.24 a jeden bude sloužit jako náhradní díl. Vzhledem k poměrné komplexnosti výrobního postupu byly vyrobeny 2 náboje, které nesplňovaly konstrukční požadavky.



Obrázek 3.18: Hotové náboje

Při výrobě nastalo samozřejmě několik problémů. Při soustružení nastal problém s vibracemi při obrábění vnitřním upichovacím nožem. Důsledkem byla špatná kvalita povrchu dílu (obrázek 3.19). Tento problém byl vyřešen snížením řezné rychlosti na 30 m/min a úpravou geometrie destičky nástroje.



Obrázek 3.19: Problém s kvalitou povrchu dílu při soustružení

Lehké problémy nastaly při upínání dílu do upínacího přípravku. Obrobky, které byly vyrobeny na dolním menším rozměru pro ložiskové plochy, bylo obtížné nasadit na válcovou část přípravku. To bylo nejspíše způsobeno špatným rozměrem válcové části přípravku. Pro nasazování některých dílů muselo tak být aplikováno na ložiskové plochy mazivo a díl byl nasazen za pomoci plastové paličky. Pro další výrobu bych navrhl větší vůli mezi obrobkem a přípravkem, jelikož k přesnému zaměření dílu docházelo pomocí sondy přístroje Haas VF-2, takže by větší vůle neměla vliv souosost mezi operacemi 50 a 60.

Celkově však hodnotím výrobní postup pro prototypovou výrobu za vhodný. Po výrobě prvního testovacího dílu, na kterém byly ověřeny či patřičně upraveny zvolené strategie obrábění, bylo možné vyrábět díly poměrně s vysokou produktivitou a kvalitní opakovatelností.

## Závěr

V této bakalářské práci jsem se zabýval návrhem a výrobou náboje kolové skupiny pro vozidlo typu Formula Student. Vyrobené díly byly osazeny na monopost CTU.24 týmu eForce Prague Formula pro sezónu 2024.

V teoretické části jsem popsal kolovou skupinu, stručně její díly a pak samotnou funkci náboje. Zaměřil jsem dále na konstrukční provedení náboje a jeho možná řešení, včetně technického řešení na motopostu FSE.12. V neposlední řadě jsem se zaměřil na výrobní postupy a technologie výroby náboje, a to jak pro osobní, tak závodní vozidla.

V praktické části jsem se věnoval nejprve konstrukčnímu návrhu. Návrh vycházel z předešlé konstrukce, ale zaměřil jsem na odstranění jeho nedostatků, optimalizaci hmotnosti a zjednodušení servisovatelnosti. Navržením výpustného šroubu pro olej a odstraněním používání silikonu se servisovatelnost značně zlepšila. Náboj byl odlehčen o 34g, což v kontextu celého monopostu znamená úsporu 136g neodpružené rotační hmotnosti. Dále jsem se věnoval analýze kontaktních tlaků na úchytech brzdového kotouče a korunového kola. Pomocí nově navržené geometrie pro oba prvky došlo ke snížení maximálních kontaktních tlaků. V případě brzdového kotouče došlo ke snížení o 87,8% a v případě korunového kola o 19,6%. Celý návrh je podložen analytickými výpočty a numerickými simulacemi v programu Ansys Mechanical.

Dále jsem provedl návrh výrobního postupu pro tento díl. V této části jsem se zaměřil na technologičnost konstrukce, od které se výroba odvíjela. Pro výrobu jsem navrhl upínací přípravky pro operace frézování a navrhl samostatný výrobní postup pro náboj. Následně byly díly podle tohoto postupu vyrobeny v laboratořích Ústavu technologie obrábění, projektování a metrologie.

I přes mnoho komplikací během výroby a návrhu je však výsledkem této bakalářské práce 5 kusů plně funkčních nábojů kolové skupiny. Většina dílů je osazena na monopost CTU.24 týmu eForce Prague Formula a budou využívány v reálném provozu.

## Bibliografie

- [1] Derek Seward. *Race Car Design*. 1. vydání. Bloomsbury Publishing, 2014. ISBN: 1137030143.
- [2] *FIA delays standard brake supplier plans for 2021*. URL: <https://f1i.com/news/355998-fia-delays-standard-brake-supplier-plans-for-2021.html> (cit. 01. 04. 2024).
- [3] František Vlk. *Podvozky motorových vozidel*. 1. vydání. Nakladatelství a vydavatelství Vlk, 2003. ISBN: 80-239-0026-9.
- [4] *Wheel bearings the different generations*. URL: <https://www.ntn-snr.com/wheel-bearings> (cit. 18. 04. 2024).
- [5] *X-Tracker*. URL: [https://cdn.skfmediahub.skf.com/api/public/0901d196809637d7/png\\_highpreview\\_800/0901d196809637d7\\_png\\_highpreview\\_800.png](https://cdn.skfmediahub.skf.com/api/public/0901d196809637d7/png_highpreview_800/0901d196809637d7_png_highpreview_800.png) (cit. 18. 04. 2024).
- [6] *Hub Unit Bearings*. URL: <https://www.nsk.com/content/dam/nsk/common/catalogs/ctrpPdf/automotive/e4201b.pdf> (cit. 18. 04. 2024).
- [7] *[EN] febi Wheel Hub Production*. 2022. URL: [https://www.youtube.com/watch?v=5wyd1AUhkPQ%5C&ab\\_channel=febi.bilstein](https://www.youtube.com/watch?v=5wyd1AUhkPQ%5C&ab_channel=febi.bilstein) (cit. 18. 04. 2024).
- [8] *Orbital forming of SKF's hub bearing units*. 2022. URL: <https://www.dynalook.com/conferences/11th-european-ls-dyna-conference/process-miscellaneous/orbital-forming-of-skfs-hub-bearing-units> (cit. 18. 04. 2024).
- [9] *The Way It Is/ Exploring how Metalore manufactures its fine racing products/ Part Two*. 2007. URL: [https://www.gordonkirby.com/categories/columns/theway/2007/the\\_way\\_it\\_is\\_no107.html](https://www.gordonkirby.com/categories/columns/theway/2007/the_way_it_is_no107.html) (cit. 18. 04. 2024).
- [10] *F1 hub coating*. 2011. URL: <https://www.f1technical.net/forum/viewtopic.php?t=9842> (cit. 18. 04. 2024).

- 
- [11] *Data sheet EN AW-7075 aluminium alloy — LEICHTMETALL*. URL: <https://www.leichtmetall.eu/app/uploads/leichtmetall-data-sheet-EN-AW-7075.pdf> (cit. 20.04.2024).
- [12] *Kruhové tyče - lisované*. URL: <https://www.alumeco.cz/technicke-informace/mechanicke-vlastnosti/kruhove-tyce-lisovane/?s=0> (cit. 30.04.2024).
- [13] Bc. Jan Vondráček. „Optimalizace konstrukce spojení náboje kola se středem pro vůz Formule Student“. Bakalářská práce. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2022. URL: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/103793> (cit. 13.03.2024).
- [14] *Těleso nože pro čelní soustružení, PRAMET, GGIR 2525 M 03R 039024*. URL: <https://katalog.mav.cz/detail.php?id=84727> (cit. 01.04.2024).
- [15] *Loctite SI 5910*. URL: [https://datasheets.tdx.henkel.com/LOCTITE-SI-5910-cs\\_CZ.pdf](https://datasheets.tdx.henkel.com/LOCTITE-SI-5910-cs_CZ.pdf) (cit. 06.03.2024).
- [16] *Formula Student Czech Republic*. URL: <https://www.facebook.com/FormulaStudentCzech/photos/5292179307485408>.
- [17] *Ruml těsnění*. 2024. URL: <https://www.ruml-tesneni.cz/> (cit. 12.03.2024).
- [18] SKF. *SKF 42340*. URL: <https://www.skf.com/au/products/industrial-seals/power-transmission-seals/radial-shaft-seals/productid-42340> (cit. 27.02.2024).
- [19] Vít Veselý. *Návrh a optimalizace planetové převodovky pro vůz Formula Student*. Bakalářská práce. Praha. URL: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/113802>.
- [20] *Ultimate sealing performance*. URL: [https://cdn.skfmediahub.skf.com/api/public/0901d1968059f1d4/pdf\\_preview\\_medium/0901d1968059f1d4\\_pdf\\_preview\\_medium.pdf%5C#cid-283756](https://cdn.skfmediahub.skf.com/api/public/0901d1968059f1d4/pdf_preview_medium/0901d1968059f1d4_pdf_preview_medium.pdf%5C#cid-283756) (cit. 29.02.2024).
- [21] *Dimer*. URL: [https://dimer.sk/tesneni/files/5072/cz/6-Tesneni\\_pro\\_H-P.pdf](https://dimer.sk/tesneni/files/5072/cz/6-Tesneni_pro_H-P.pdf) (cit. 12.03.2024).
- [22] *Gufero*. URL: [https://datasheets.tdx.henkel.com/LOCTITE-SI-5910-cs\\_CZ.pdf](https://datasheets.tdx.henkel.com/LOCTITE-SI-5910-cs_CZ.pdf) (cit. 12.03.2024).
- [23] *Těsnící prvky*. URL: [https://www.rubena.eu/underwood/download/files/tesnici-prvky\\_final\\_2023.pdf](https://www.rubena.eu/underwood/download/files/tesnici-prvky_final_2023.pdf) (cit. 06.03.2024).
-



- 
- [24] Bc. Martin Karas. „Konstrukce modulu řízeně přeladitelného hltiče vibrací“. Diplomová práce. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2022. URL: [https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/99563/F2-DP-2022-Karas-Martin-DP\\_1806\\_Martin\\_Karas\\_Konstrukce\\_modulu\\_rizene\\_preladitelneho\\_hltice\\_vibraci.pdf?sequence=-1%5C&isAllowed=y](https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/99563/F2-DP-2022-Karas-Martin-DP_1806_Martin_Karas_Konstrukce_modulu_rizene_preladitelneho_hltice_vibraci.pdf?sequence=-1%5C&isAllowed=y) (cit. 16. 03. 2024).
- [25] *Formula-student*. URL: [https://stahlbus.com/info/images/phocagallery/Automotive/formula-student/thumbs/phoca\\_thumb\\_1\\_edge4\\_stahlbus-4.jpg](https://stahlbus.com/info/images/phocagallery/Automotive/formula-student/thumbs/phoca_thumb_1_edge4_stahlbus-4.jpg) (cit. 17. 03. 2024).
- [26] *F1brakesystem*. URL: <https://www.autoracing1.com/wp-content/uploads/2018/f1/misc/f1brakesystem.jpg> (cit. 17. 03. 2024).
- [27] *Pásová pila PILOUS ARG 300 plus S.A.F.* URL: <https://www.legnex.cz/pasova-pila-pilous-arg-300-plus-s-a-f> (cit. 29. 04. 2024).
- [28] *HAAS VF-2*. URL: <https://www.haascnc.com/cs/machines/vertical-mills/vf-series/models/small/vf-2.html> (cit. 29. 04. 2024).
- [29] *Okuma GENOS L200E-MY*. URL: <https://premek.it/parco-macchine/okuma-genos-l200e-my/> (cit. 29. 04. 2024).
- [30] *OBRÁBĚNÍ OTVORŮ 2024 CZ*. 2024. URL: <https://5wyuco84ao39w9tsgkkmmx.blob.core.windows.net/cms/OBR%5C%C3%5C%81B%5C%C4%5C%9AN%5C%C3%5C%8D-OTVOR%5C%C5%5C%AE-2024-CZ.pdf> (cit. 30. 04. 2024).
- [31] *FRÉZOVÁNÍ 2021 – 2022*. 2021. URL: <https://5wyuco84ao39w9tsgkkmmx.blob.core.windows.net/cms/DORMER-PRAMET-Milling-Catalogue-2021-CZ.pdf> (cit. 30. 04. 2024).
- [32] *Frézy pro drážky T (drážkovací frézy), typ N, kód 310205, průměr 18 mm*. URL: [https://www.zps-fn.cz/cz/hledani/detail1/frezy-pro-drazky-t-\(drazkovaci-frezy\),-typ-n,-kod-310205,-prumer-18-mm/?gad\\_source=1%5C&gclid=CjwKCAjwrcKxBhBMEiwAIVF8rE9r10rLLrC0n-VVo\\_r2NCOV7oRbLcOK2YHJTWpmDXfVIwqxIo31aRoCrHUQAvD\\_BwE](https://www.zps-fn.cz/cz/hledani/detail1/frezy-pro-drazky-t-(drazkovaci-frezy),-typ-n,-kod-310205,-prumer-18-mm/?gad_source=1%5C&gclid=CjwKCAjwrcKxBhBMEiwAIVF8rE9r10rLLrC0n-VVo_r2NCOV7oRbLcOK2YHJTWpmDXfVIwqxIo31aRoCrHUQAvD_BwE) (cit. 30. 04. 2024).
- [33] *SOUSTRUŽENÍ 2021 – 2022*. 2021. URL: <https://5wyuco84ao39w9tsgkkmmx.blob.core.windows.net/cms/DORMER-PRAMET-Turning-Catalogue-2021-CZ.pdf> (cit. 30. 04. 2024).
- [34] *HELIR 2020-4T25*. URL: <https://www.iscar.com/Ecatalog/item.aspx?cat=2500514%5C&fnum=244%5C&mapp=TG%5C&app=1%5C&GFSTYP=M%5C&isoD=1%5C&lang=WZ> (cit. 30. 04. 2024).
-

- [35] *ISCAR A20Q SVUNR-12*. URL: <https://www.iscar.com/eCatalog/Item.aspx?cat=3601168%5C&fnum=4%5C&mapp=IS%5C&GFSTYP=M%5C&srch=1> (cit. 22. 05. 2024).
- [36] *GEHIR 16-20-3-T8*. URL: <https://www.iscar.com/eCatalog/item.aspx?cat=2801763%5C&fnum=1402%5C&mapp=TH%5C&app=208> (cit. 30. 04. 2024).
- [37] *ZÁVITOVÁNÍ-2024-CZ*. URL: <https://5wyuco84ao39w9tsgkkmmx.blob.core.windows.net/cms/Z%5C%C3%5C%81VITOV%5C%C3%5C%81N%5C%C3%5C%8D-2024-CZ.pdf> (cit. 30. 04. 2024).

## Seznam tabulek

1.1	Technické vlastnosti použitého materiálu EN AW 7075 T6, převzato z [12]	18
2.1	Popis silových účinků na vozidlo	19
2.2	Uvažované síly pro výpočet	21
2.3	Uvažované bezpečnostní koeficienty	21
3.1	Operace 10	50
3.2	Operace 20	51
3.3	Operace 30	52
3.4	Operace 50	58
3.5	Operace 60	60
3.6	Operace 70	61
3.7	Technické údaje pásové pily PILOUS ARG 300 plus S. A. F., převzato z [27]	62
3.8	Technické údaje stroje HAAS VF-2, převzato z [28]	63
3.9	Technické údaje o stroji Okuma GENOS L200E-MY, převzato z [29]	64
3.10	Použité nástroje při obrábění, informace a obrázky převzaty z [30], [29], [30], [31], [32], [33], [34], [35],[35], [36], [37]	65

## Seznam obrázků

1.1	Kolová skupina vozu F1, převzato z [2]	10
1.2	Konvenční kolová skupina, převzato z [3]	10
1.3	Základní principy uložení kola, převzato z [3]	12
1.4	Uložení předního kola automobilu Tatra 613, převzato z [3]	13
1.5	Uložení předního poháněného kola, převzato z [3]	13
1.6	Ložisková jednotka třetí generace, převzato z [5]	14

1.7	Řez ložiskovou jednotkou, převzato z [4]	14
1.8	Kolová skupina monopostu FSE.12	15
1.9	Kalení náboje, převzato z [7]	16
1.10	Polotovar a vyrobený kus náboje, převzato z [7]	16
1.11	Orbitální tváření konce náboje [8]	16
1.12	Prototypová výroba závodních dílů, převzato z [9]	17
2.1	Silový rozbor vozidla při průjezdu levotočivou zatáčkou, převzato z [13]	20
2.2	Zavedené silové účinky v místě kontaktu kola s vozovkou	21
2.3	Uspořádání ložisek na FSE.12	22
2.4	Uspořádání ložisek na CTU.24	22
2.5	Ložisková matice	23
2.6	Odlehčovací kapsa mezi drážkami pro korunové kolo	24
2.7	Vnější odlehčovací kapsa mezi ráfkem a pokličkou	24
2.8	Odlehčovací kapsy mezi držákem ráfku a brzdovým kotoučem	24
2.9	Tvarový zámek kolového šroubu	25
2.10	Tvarový zámek kolového šroubu	25
2.11	Nůž pro axiální zapichování, převzato z [14]	25
2.12	Uspořádání těsnění na monopostu FSE.12	26
2.13	Poklička na vnější straně převodovky	27
2.14	Obrázek těsnícího silikonu SI 5910, převzato z [15]	27
2.15	Těsnění vnější strany převodovky týmu WHZ racing, převzato z [16]	28
2.16	Tenká stěna těsnění, fotografie od firmy Ruml těsnění	29
2.17	Testování těsnění z materiálu Silikon 60°Sh FDA	29
2.18	Porovnání změn na pravé části náboje, vlevo původní návrh, vpravo nový návrh	30
2.19	Rozložení teploty na náboji při měření v laboratoři, převzato z archivu týmu eForce	32
2.20	Těsnící ložiskové jednotky náboje kola, převzato z [18]	32
2.21	Těsnění R01-AF, převzato z [21]	33
2.22	Těsnění GP 115 x 130 x 12, převzato z [22]	33
2.23	Návrh uspořádání těsnění pro monopost CTU.24	34
2.24	Plastová zátka na monopostu FSE.12	34
2.25	Šroubovaná zátka na monopostu CTU.24	34
2.26	Pohled na konstrukci	35
2.27	Řez uložením	35
2.28	Rozklad síly na plochu úchyty kotouče	36

2.29	Použití plovoucích čepů, převzato z [25] . . . . .	37
2.30	Zástavbový prostor kolem brzdového třmenu . . . . .	37
2.31	Konstrukce brzdového kotouče na vozidle F1, převzato z [26] . . . . .	37
2.32	Návrh nové geometrie úchyty kotouče, rozklad sil . . . . .	38
2.33	Kontaktní tlak na úchyty kotouče, původní geometrie . . . . .	39
2.34	Kontaktní tlak na úchyty kotouče, nová geometrie . . . . .	39
2.35	Von-Misses napětí na úchyty kotouče . . . . .	39
2.36	Von-Misses napětí na úchyty kotouče . . . . .	39
2.37	Korunové kolo . . . . .	40
2.38	Výstupek korunového kola . . . . .	40
2.39	Rozklad síly na plochu výstupků korunového kola . . . . .	41
2.40	Kontaktní tlak na FSE.12 . . . . .	42
2.41	Kontaktní tlak na CTU.24 . . . . .	42
2.42	Výpočtový model sestavy v programu Ansys 2023 R2 . . . . .	43
2.43	Napětí Von-Misses na náboji . . . . .	44
2.44	Napětí Von-Misses na náboji . . . . .	45
3.1	Návrh upínacího přípravku pro frézování náboje . . . . .	48
3.2	Vyrobený přípravek se zkušebními výtiskem náboje . . . . .	48
3.3	Řezání polotovaru na pásové pile . . . . .	49
3.4	Upnutí polotovaru do sklíčidla . . . . .	49
3.5	Obrobek po hrubování . . . . .	49
3.6	Upnutí obrobku do sklíčidla . . . . .	52
3.7	Obrobek po soustružení . . . . .	52
3.8	Dělení obrobku po soustružení . . . . .	55
3.9	Upnutí obrobku pro operaci 50 . . . . .	55
3.10	Upnutí obrobku pro operaci 60 . . . . .	55
3.11	Obrobek po operaci 50 . . . . .	56
3.12	Obrobek po operaci 60 . . . . .	56
3.13	Upnutí pro operaci 70 . . . . .	57
3.14	Obrobek po operaci 70 . . . . .	57
3.15	Pásová pila Pilous ARG 300 plus S. A. F7, převzato z [27] . . . . .	62
3.16	CNC frézka HAAS VF-2, převzato z [28] . . . . .	63
3.17	Soustruh Okuma GENOS L200E-MY, převzato z [29] . . . . .	64
3.18	Hotové náboje . . . . .	69
3.19	Problém s kvalitou povrchu dílu při soustružení . . . . .	69

## Seznam použitého SW

- Visual Studio Code
- 3D Experience
- Ansys 2023 R2
- Photoroom
- Microsoft Malování
- KeyShot 11
- Fusion 360
- iLovePDF
- GitHub Copilot

## Seznam příloh

- Příloha 1: Výkres náboje