

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

Ústav mechaniky, biomechaniky a mechatroniky



DIPLOMOVÁ PRÁCE

Návrh kompozitového diferenciálu

Vedoucí práce: Ing. Ctirad Novotný, Ph.D.

Bc. Vladislav Jiroud

2019

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Jiroud** Jméno: **Vladislav** Osobní číslo: **437247**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav mechaniky, biomechaniky a mechatroniky**
Studijní program: **Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Aplikovaná mechanika**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Návrh kompozitového diferenciálu

Název diplomové práce anglicky:

Composite differential design

Pokyny pro vypracování:

- 1) Rešerše literatury v oblasti návrhu kompozitních struktur
Návrh a tvorba geometrického modelu diferenciálu pro zadanou aplikaci
Definice skladby a okrajových podmínek diferenciálu
Výpočet tuhostí a pevnosti diferenciálu
Modifikace skladby a její vliv na tuhost
Shrnutí obdržených výsledků a závěr

Seznam doporučené literatury:

- Laš, V. (2008) Mechanika kompozitních materiálů. ZČU, Plzeň.
Barbero, R.J. (2008) Finite Element Analysis of Composite Materials. CRC Press, Boca Raton.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Ctirad Novotný, Ph.D., odbor pružnosti a pevnosti FS

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

Datum zadání diplomové práce: **25.04.2019**

Termín odevzdání diplomové práce: **16.08.2019**

Platnost zadání diplomové práce: _____


Ing. Ctirad Novotný, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce



prof. Ing. Milan Růžička, CSc.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry


prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

30. 8. 2019
Datum převzetí zadání


Podpis studenta

Anotační list

Jméno autora: Bc. Vladislav Jiroud

Fakulta: Fakulta strojní

Zadávací ústav: Ústav mechaniky, biomechaniky a mechatroniky

Studijní program: Strojní inženýrství

Studijní obor: Aplikovaná mechanika

Rok: 2019

Název diplomové práce: Návrh kompozitového diferenciálu

Název diplomové práce anglicky: Design of the composite differential

Vedoucí práce: Ing. Ctirad Novotný, Ph.D.

Bibliografické údaje: **Počet stran:** 105

Počet obrázků: 98

Počet tabulek: 11

Klíčová slova: Kompozit, kompozitový diferenciál, MKP analýza

Key words: Composite, composite differential, FEM analysis

Anotace: Diplomová práce se zabývá návrhem kompozitního diferenciálu. Hlavním účelem této práce je minimalizovat hmotnost při zachování tuhosti diferenciálu. Byly vytvořeny čtyři verze 3D modelu podle původní ocelovo-litinové verze a původní verze převodovky a z nich vybrána finální varianta. Byl navrhnut hlavní nosný úhel ve skladbě kompozitové skříně. Poté byla vytvořena MKP analýza původní verze a dílčích kompozitových verzí. Výsledky analýz kompozitových variant byly porovnány s původní ocelovo-litinovou verzí.

Abstract: Presented theses deals with design of composite differential. 3D model was created into an already designed transition case according to cast iron. Then a FEM model was done and calculation of the current version and it was compared with FEM calculation of designed version. The aim of this work is to minimize weight of differential while maintaining stiffness.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval zcela samostatně a použil jsem pouze podklady uvedené v příloženém seznamu.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č.121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne 14. 8. 2019

.....

Podpis

Poděkování

Rád bych tímto poděkoval Ing. Ctiradu Novotnému, Ph.D. za odborné vedení diplomové práce, za pomoc při vytváření MKP modelů a za vstřícnost při jakýchkoli dotazech. Také bych chtěl poděkovat Prof. Ing. Milanu Růžičkovi, CSc. za pomoc při tvorbě návrhů variant kompozitního diferenciálu. Dále bych chtěl poděkovat grantovému programu delta TAČR za finanční podporu při tvorbě této práce.

Obsah

| | |
|---|----|
| 1. Úvod..... | 1 |
| 1.1. Co je to diferenciál? | 2 |
| 2. O projektu, předchozí práce | 4 |
| 2.1. Hybridní hřídele..... | 6 |
| 2.2. Horní víko..... | 7 |
| 2.3. Dolní víko | 8 |
| 3. Cíle práce a metodika řešení | 9 |
| 3.1. Cíle práce | 9 |
| 3.2. Metodika řešení | 9 |
| 4. Kompozitní materiály | 11 |
| 4.1. Rozdělení kompozitních materiálů | 11 |
| 4.2. Vláknové kompozity..... | 12 |
| 4.2.1. Mikromechanika vláknových kompozitů | 14 |
| 4.2.2. Makromechanika kompozitů..... | 15 |
| Klasická laminační teorie..... | 17 |
| 4.2.3. Pevnost | 19 |
| 5. Přehled běžných typů spojů kompozitů | 22 |
| 5.1. Lepené spoje | 22 |
| 5.2. Svarové spoje..... | 22 |
| 5.3. Nalisovaný spoj | 23 |
| 5.4. Spoje s pomocným elementem | 23 |
| 5.5. Spoje s využitím tvaru spojovaných dílů..... | 23 |
| 6. Technologie výroby zkušebního vzorku skříně diferenciálu | 24 |
| 6.1. Pultruze..... | 24 |
| 6.2. Ruční laminace a prosycení | 24 |
| 6.3. Ruční kladení prepregu a autokláv | 25 |
| 6.4. Technologie navíjení vláken..... | 26 |
| 6.5. Zvolená technologie: Technologie navíjení vláken..... | 26 |
| 7. Zatížení převodovky a diferenciálu | 27 |
| 7.1. Zatížení v rámci převodovky | 27 |
| 7.2. Zatížení diferenciálu | 28 |
| 7.2.1. Zatížení diferenciálu od vnitřního ozubení | 28 |

| | | |
|--------|--|----|
| 7.2.2. | Zatížení diferenciálu od korunového kola..... | 30 |
| 8. | Návrh kompozitního diferenciálu | 31 |
| 8.1. | Původní verze | 31 |
| 8.2. | Verze I (Lepená)..... | 32 |
| 8.3. | Verze II (Navíjená)..... | 34 |
| 8.4. | Verze III (Celonavíjená)..... | 35 |
| 8.5. | Verze IV (Integrované kolo s krytem)..... | 37 |
| 8.5.1. | Výběr finální verze..... | 38 |
| 8.6. | Návrh kompozitní skříně | 38 |
| 8.7. | Návrh kovových částí | 40 |
| 8.7.1. | Zadní vložka | 40 |
| 8.7.2. | Vložka pod satelit (čep)..... | 41 |
| 8.7.3. | Závitová vložka | 41 |
| 8.7.4. | Korunové kolo..... | 42 |
| 8.7.5. | Spoj korunové kolo skříně diferenciálu | 43 |
| | Kontrola na otláčení | 44 |
| | Kontrola na střih | 45 |
| | Kontrola na vytržení | 47 |
| 9. | Analýza tuhosti a pevnosti diferenciálu | 49 |
| 9.1. | Teorie analýzy diferenciálu | 49 |
| 9.1.1. | Teorie analýzy kovové verze..... | 49 |
| 9.1.2. | Teorie analýzy kompozitní verze | 49 |
| 9.2. | Tuhostní analýza původní kovové verze | 52 |
| 9.2.1. | Materiál a vytvoření sestavy..... | 52 |
| 9.2.2. | Kinematické a silové okrajové podmínky | 53 |
| 9.2.3. | Sítování | 55 |
| 9.2.4. | Výsledky..... | 56 |
| 9.3. | Návrhové výpočty pro volbu orientace vláken a tuhostní analýza | 59 |
| 9.3.1. | Volba materiálu | 59 |
| 9.3.2. | Vytvoření vrstev a následné dělení skříně..... | 59 |
| 9.3.3. | Přiřazení vlastností a orientace vláken | 62 |
| 9.3.4. | Vytvoření sestavy | 63 |
| 9.3.5. | Přiřazení kinematických a silových okrajových podmínek..... | 64 |
| 9.3.6. | Sítování | 66 |
| 9.3.7. | Výsledky..... | 68 |

| | | |
|--------|--|----|
| 9.4. | Tuhostní a pevnostní analýza kompozitní skříně s detailní orientací..... | 70 |
| 9.4.1. | Volba materiálu a vytvoření vrstev a následné dělení skříně..... | 70 |
| 9.4.2. | Přiřazení vlastností a orientace vláken | 70 |
| 9.4.3. | Vytvoření sestavy | 71 |
| 9.4.4. | Přiřazení kinematických a silových okrajových podmínek..... | 72 |
| 9.4.5. | Síťování | 74 |
| 9.4.6. | Výsledky tuhosti a porovnání s kovovou verzí | 76 |
| 9.4.7. | Pevnostní kontrola..... | 79 |
| 10. | Závěr..... | 80 |
| 11. | Citovaná literatura | 83 |
| 12. | Seznam obrázků | 84 |
| 13. | Seznam grafů..... | 86 |
| 14. | Seznam tabulek | 86 |
| 15. | Seznam příloh..... | 86 |

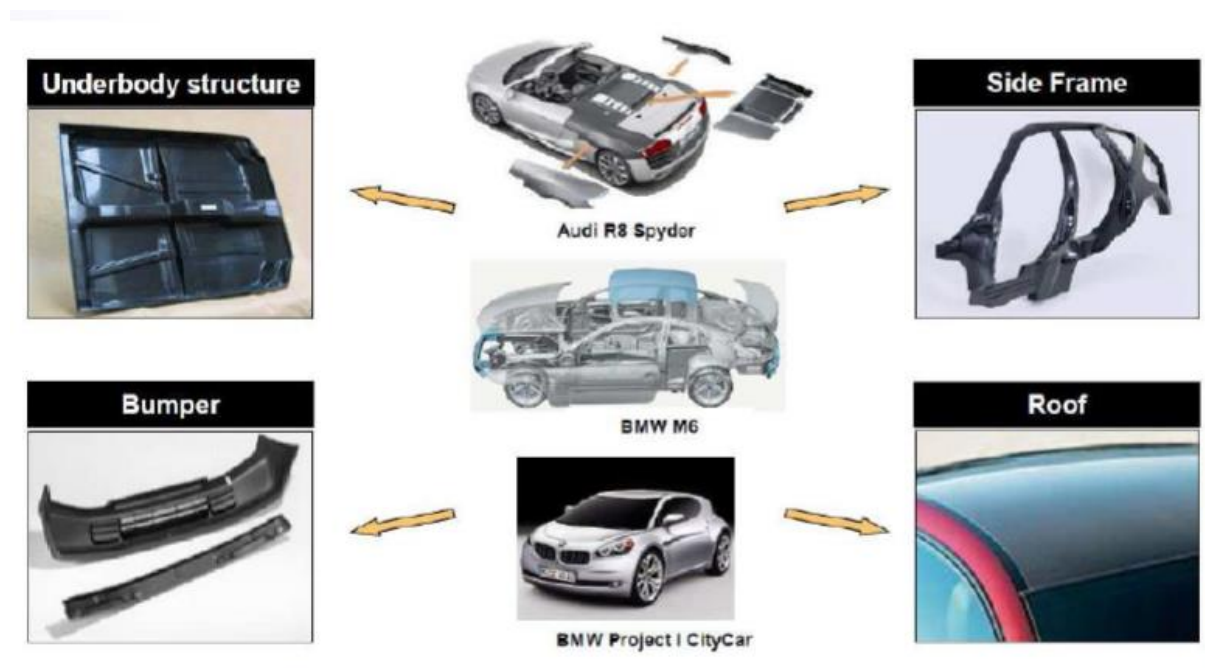
Seznam použitých zkratek a symbolů

| | | |
|---------------|----------------------|---|
| HS | | High strength (Kompozitové vlákno s vysokou pevností) |
| HM | | High modulus (Kompozitové vlákno s vysokým modulem pružnosti) |
| T700 12K | | Kompozitové vlákno Toray typ T700 svazek obsahuje 12 000 vláken |
| P | | Pastorku |
| K | | Ozubené kolo |
| ε | [-] | poměrná deformace |
| E | [MPa] | Youngův modul pružnosti |
| $V_{f,m}$ | [-] | Objemové procento |
| ν | [-] | Poissonovo číslo |
| G | [MPa] | Modul pružnosti ve smyku |
| m | [kg] | hmotnost |
| ρ | [kgm ⁻³] | hustota |
| σ | [MPa] | napětí |
| τ | [MPa] | smykové napětí |
| p | [MPa] | tlak |
| k | [-] | bezpečnost |
| F | [N] | síla |
| V | [l] | objem |
| S | [mm ²] | plocha |
| d | [mm] | vnitřní průměr |
| D | [mm] | vnější průměr |
| L | [mm] | délka |
| φ | [°] | úhel orientace |
| M_k | [Nm] | krouticí moment |
| z_P | [-] | počet zubů na pastorku |
| z_K | [-] | počet zubů na ozubeném kole |

1. Úvod

Konstrukce elektromobilů v posledních letech šla dopředu mílovými kroky. Za příklad si můžeme vzít, že každá společnost vyrábějící automobily má vlastní řadu hybridního automobilu a někdy i přímo elektromobilu. Dále se můžeme podívat i na sportovní auto Tesla, která posouvá tuto technologii ještě dál.

Zásadní konstrukční otázkou elektromobilů je jejich co největší odlehčení, protože baterie v jejich útrokách, aby se jejich dojezd alespoň vzdáleně přiblížil dojezdu standartního automobilu, je maximální redukce hmotnosti. Proto se v těchto dopravních prostředcích hojně používá kompozitních materiálů a konkrétně uhlíkové kompozity. Můžeme se s nimi setkat například v součástech odpružení, uložení baterií, v částech podvozku, ale i jako karosérie vozidla.



Obrázek 1.1 Přehled použití vláknových kompozitů u elektromobilů [1]

V této diplomové práci budu navazovat na předchozí práci mých kolegů [2], [3] a [4], kteří se snažili rozšířit použití uhlíkového kompozitu u elektromobilů. Témata jejich prací se zabývala přetvořením hliníkové převodovky na kompozitovou. Mou úlohou je vytvořit návrh kompozitové skříně diferenciálu do této převodovky.



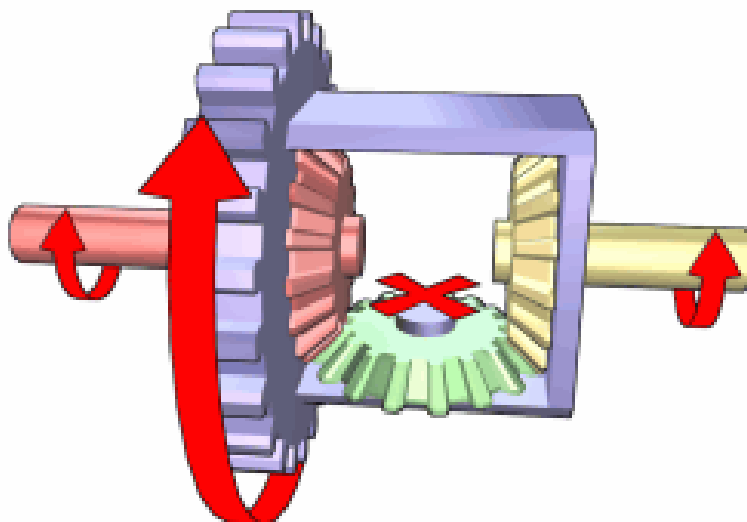
Obrázek 1.2 Příklad hybridní převodovky [1]

1.1. Co je to diferenciál?

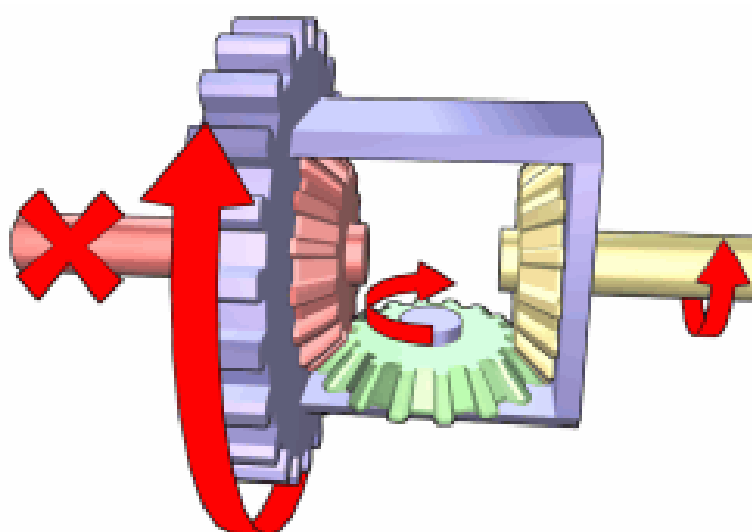
Diferenciál je mechanické zařízení pracující na principu planetové převodovky. Skládá se ze skříně s korunovým/talířovým kolem (fialové), planetových kol s hnanými hřídeli (červené a žluté) a satelitních kol (zelené) viz obrázky 1.3, 4. Funkcí diferenciálu je rozložení přenášeného kroučícího momentu (ze vstupní hnací hřídele) na dvě jiné hřídele (výstupní hnané hřídele) při změně poměru jejich otáček. Klasický diferenciál rozděljuje vstupní moment na dva stejně velké výstupní momenty, tedy v poměru 50:50 (%).

Typickou aplikací diferenciálu je pohon hnací nápravy automobilu, kde umožňuje různou rychlost otáčení kol na téže nápravě při průjezdu zatáčkou. Při průjezdu zatáčkou má kolo blíže ke středu otáčení menší obvodovou rychlost (kratší ujetá dráha a menší otáčky) a kolo dále od středu otáčení větší obvodovou rychlost (delší ujetá dráha a vyšší otáčky). Toto je dáno stejnou úhlovou rychlostí celého vozidla, kdy se kola dotýkají podkladu s různým poloměrem otáčení kolem společného bodu. Nutnost použití diferenciálu záleží na poloměru otáčení vozidla a na vzdálenosti kol od sebe a dále na technickém omezení konstrukce.

Diferenciál se nepoužívá na hnacích nápravách drážních vozidel. U drážních vozidel je rozdíl obvodových rychlostí kol vyřešen pomocí kuželového tvaru kola. Při průjezdu obloukem se vnější kolo na nápravě odvaluje po větším průměru než kolo na vnitřní kolejnici.



Obrázek 1.3 Diferenciál s blokací na hnané hřídeli [5]



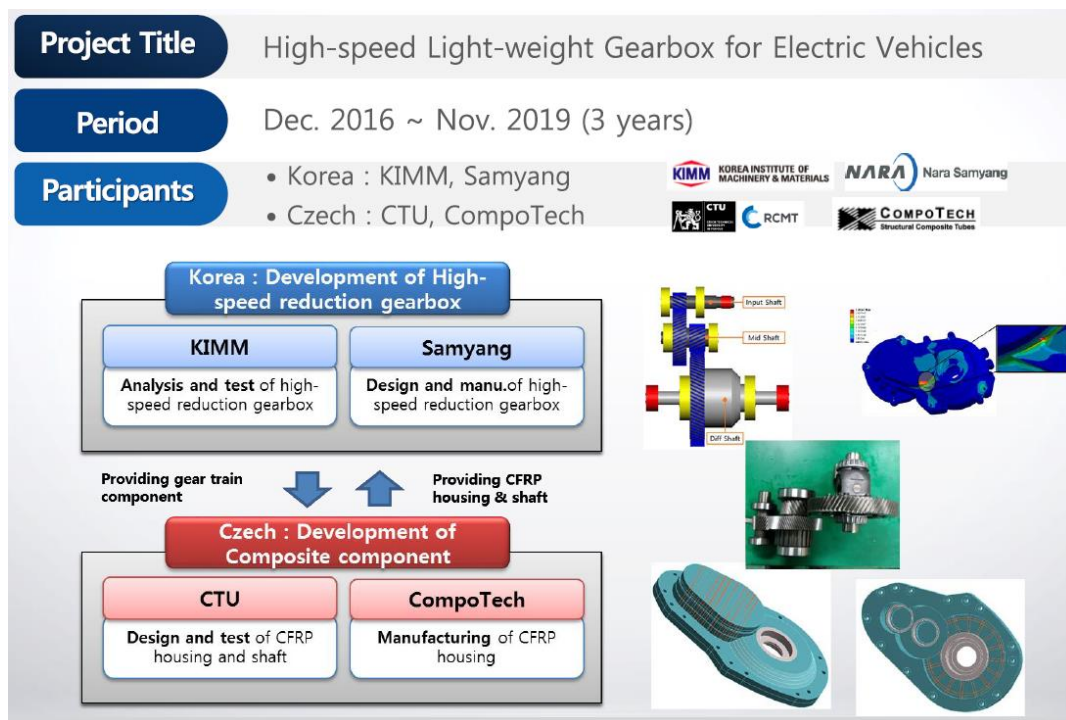
Obrázek 1.4 Diferenciál bez blokace na hnané hřídeli [5]

2. O projektu, předchozí práce

Tato diplomová práce řeší dílčí problém v návrhu kompozitní převodovky elektrického vozidla v rámci společného projektu (Vysoko rychlostní ultralehká převodovka do elektromobilů TF03000050) společností KIMM, Samyang, Compotech a ČVUT. Projekt je zaštitěn grantovým Programem delta TAČR. Celý projekt byl iniciován Korejskou firmou KIMM, která vyrábí elektromobily ve spolupráci s firmou Samyang, která se specializuje na výrobu ozubení.

Návrh kompozitní verze byl zaměřen na tyto části převodovky:

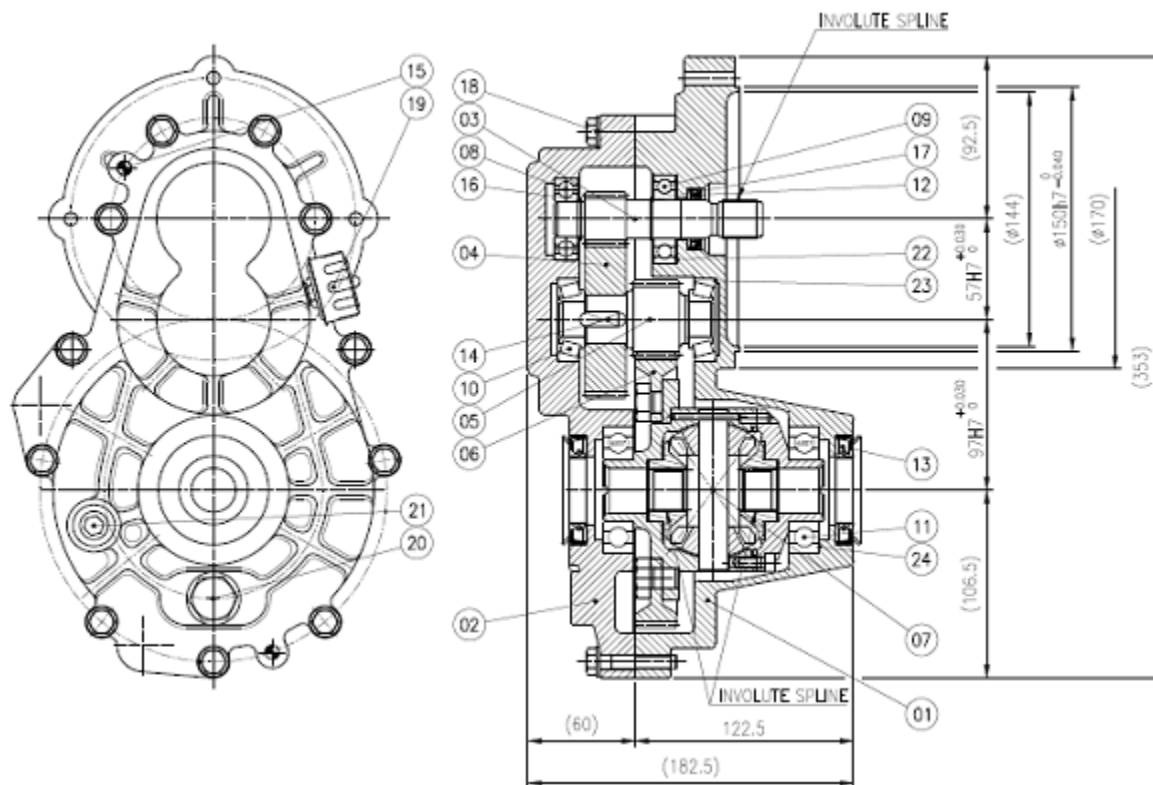
- horní a dolní víko převodovky
- návrh hybridních hřídeli
- návrh diferenciálu



Obrázek 2.1 Úvod do projektu [3]

Na obrázku 2.2 lze vidět sestavný výkres původní kovové verze převodovky, která je vzorem pro návrh hybridní verze. V zadání projektu je podmínka redukce hmotnosti alespoň 20 %, proto je hlavní snaha o co největší odlehčení a toho vycházející náhrada kovových částí kompozitními.

Dále jsou stručně popsány jednotlivé části kompozitní převodovky z předcházejících etap řešení projektu.



Obrázek 2.2 Sestavný výkres původní kovové verze převodovky

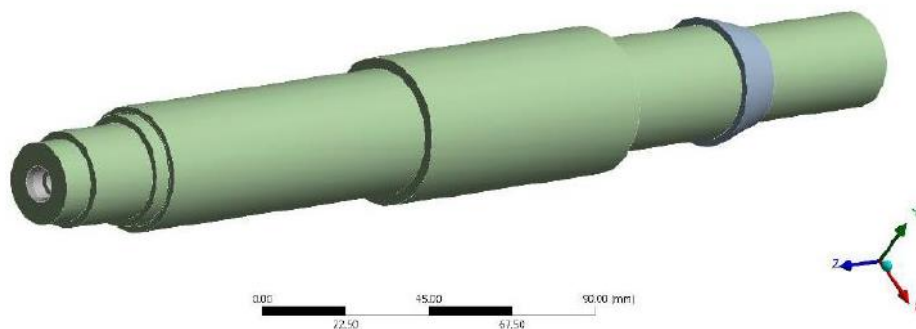


Obrázek 2.3 Fotka komponentů původní kovové verze převodovky [3]

2.1. Hybridní hřídele

Toto téma zpracoval ve své diplomové práci Bc. Miroslav Kropík [4]. Tato práce se zaměřila na problémy spojené s navrhováním kompozitních dílů. Problematika je ukázána na specifickém problému hřídele převodovky elektromobilu. Nejprve byla provedena analýza kovové výstupní hřídele a následně analýza odlehčené varianty s uhlíkovými vlákny.

Na obrázku 2.4 lze vidět Model V1 hybridní hřídele a na obrázku 2.5 vyrobené vzorky firmou Compotech.



Obrázek 2.4 Model hybridní hřídele [3]



Obrázek 2.5 Vyrobené vzorky hybridních hřidelí [3]

2.2. Horní víko

Návrhem a výpočtem tohoto víka se zabýval Ing. Ctirad Novotný, Ph.D. [3]. Na obrázcích 2.6, 7 je hybridní návrh horního víka, kde místa loží pro ložiska a zátky jsou vyztužena kovem. Z hlediska návrhu diferenciálu je nejzajímavější oblast kužele, který je vytvořen tak, aby se do něho volně vešel diferenciál.



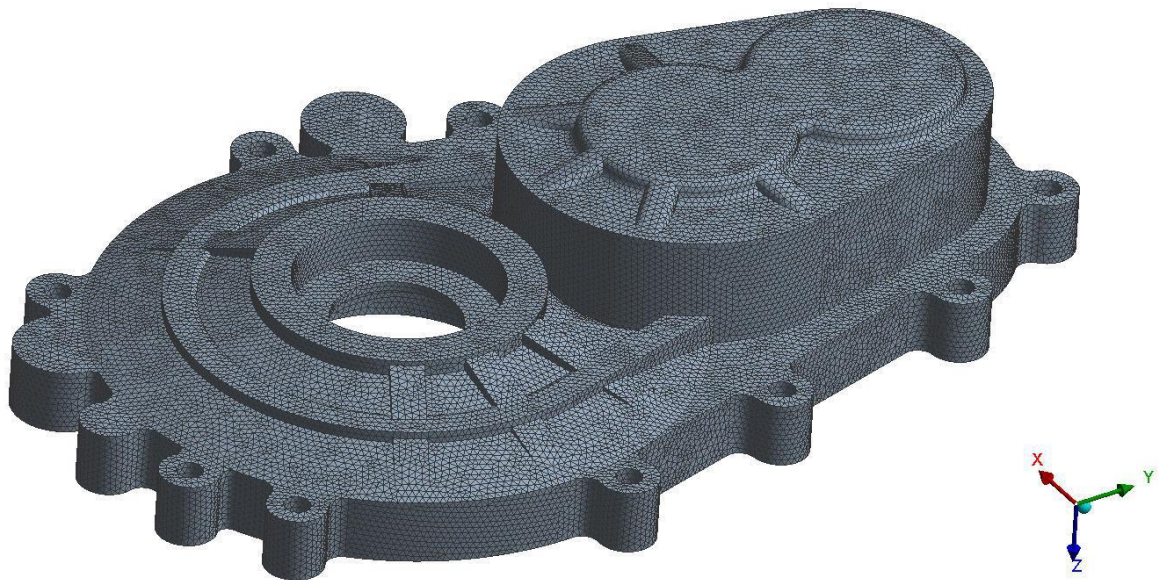
Obrázek 2.6 MKP síť horního víka [3]



Obrázek 2.7 Fotka vyrobených vzorků horního víka [3]

2.3. Dolní víko

Návrhem a výpočtem tohoto víka se zabýval ve své diplomové práci Ing. Ondřej Šedivý [2]. Místa loží pro ložiska a zátky jsou vyztužena kovem, viz obrázek 2.9.



Obrázek 2.8 MKP síť dolního víka [3]



Obrázek 2.9 Fotka vyrobených vzorků dolního víka [3]

3. Cíle práce a metodika řešení

3.1. Cíle práce

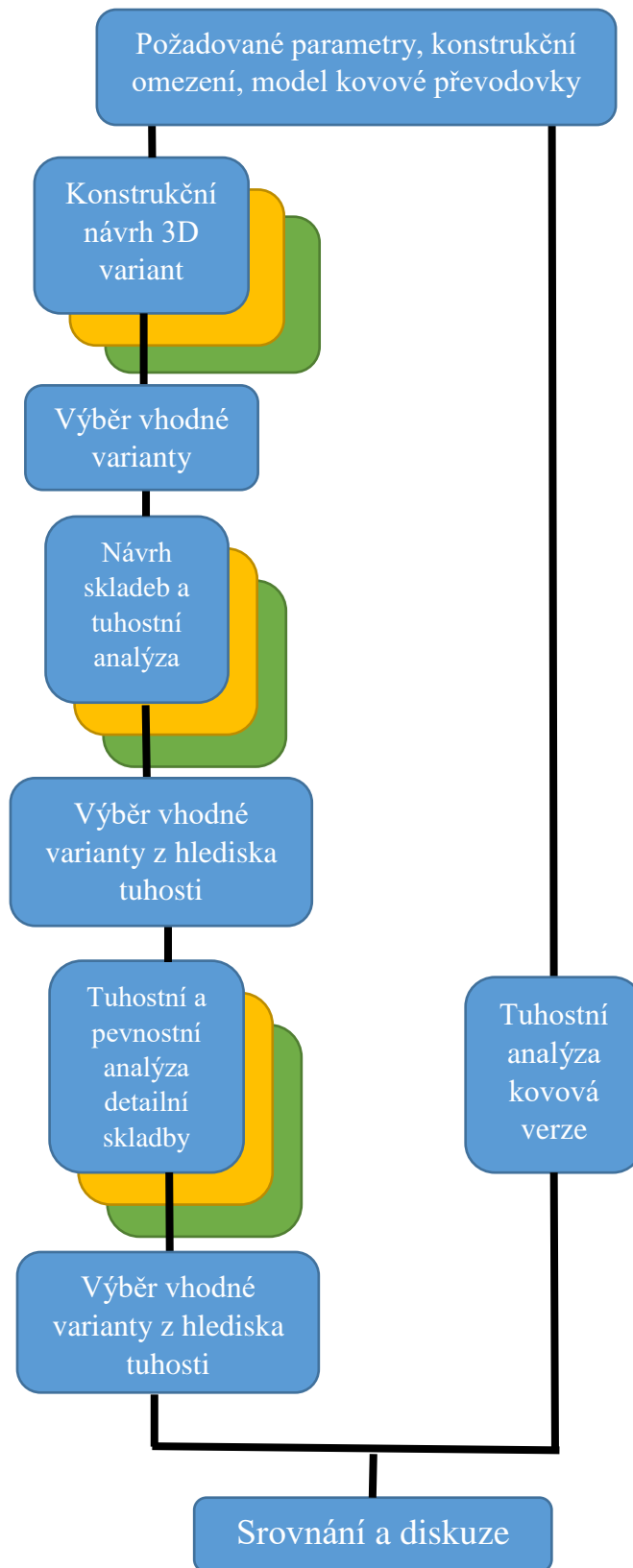
Hlavním cílem této práce je dosáhnout co největšího odlehčení původní kovové verze diferenciálu při zachování tuhosti a zastavitelnosti. Toho bude docíleno záměnou kovových částí kompozitními v co největší míře. Pro splnění tohoto cíle bude nutné splnit následující podmínky:

- Požadované parametry
 - Přenesení vstupního momentu na převodovce je 60 Nm (po zpřevodování 742 Nm, viz kapitola 7.2.)
 - Zachování tuhosti kompozitové skříně vzhledem ke kovové verzi
- Konstrukční omezení
 - Použití uhlíkového kompozitu (návrh kovového diferenciálu se od kompozitního liší možnostmi výroby a tím, že kov je izotropní materiál)
 - Zastavitelnost do předpřipraveného kužele v horním víku převodovky
 - Kovové vložky pod vnitřní ozubení a vnější ložiska

3.2. Metodika řešení

Pro dosažení výše zmíněného cíle byla zvolena následující metodika řešení:

- Vytvoření rešeršní části vlastností kompozitů a možností spojování ocelových součástí s kompozitními (kapitoly 4., 5.)
- Zvolení technologie výroby (kapitola 6.)
- Vypočítání zatížení diferenciálu (kapitola 7.2.)
- Návrh geometrických modelů kompozitové verze a výběr finální verze (kapitola 8.)
- Návrh skladby kompozitové konstrukce (kapitola 9.3)
- Návrh detailní skladby a tuhostní a pevnostní analýza této verze (kapitola 9.4)
- Tuhostní analýza původní kovové součásti pro srovnání (kapitola 9.2)
- Porovnání s kovovou verzí (kapitola 10.)



Obrázek 3.1 Schéma postupu prací

4. Kompozitní materiály

Kompozitní materiály jsou v současné době nenahraditelné v mnohých konstrukcích využívajících jejich kvalit, jako je například vysoká pevnost v tahu a nízká hmotnost. Pro uhlíkové kompozity jsou to mnohé aplikace v automobilovém průmyslu, ale i letecké konstrukce, trupy jacht, větrných elektráren, jízdní kola či díly na motocykly, sportovní náčiní a také stále se rozšiřující uplatnění ve stavebnictví.

Podstatou kompozitního materiálu je spojení dvou (nebo i více) odlišných materiálů (fází), které mají z hlediska makrostruktury vzájemně rozdílné chemické a tedy i fyzikální a mechanické vlastnosti.

První z těchto složek je nazývána výztuží, u vláknových kompozitů je jí vlákno, není spojitá a má vyšší tuhost a pevnost. Výztuž je obklopena druhou, spojitou složkou, pojivem neboli matricí, která je poddajnější. Jako výztuž je možné použít i několik různých druhů materiálů najednou. Tyto kompozity se pak nazývají hybridní.

Matrice musí zajistit vzájemné propojení výztuže a její ochranu. Musí být poddajnější, aby její poměrné prodloužení bylo větší, než je mezní prodloužení výztuže. Tomu dobře vyhovují kovové a polymerní matrice. Pro dokonalé spojení matrice a výztuže je též třeba, aby matrice pokud možno co nejlépe smáčela výztuž.

Vlastnosti kompozitů jsou určeny vlastnostmi svých materiálových složek, jejich objemovým podílem a geometrií vyztužení.

4.1. Rozdělení kompozitních materiálů

- kompozity se dělí dle velikosti výztuže na:
 - makrokompozity - velikosti řádově v mm až cm
 - mikrokompozity - řádově v mm
 - nanokompozity - řádově v nm
- dle tvaru výztuže na:
 - vláknové (kontinuální či diskontinuální vlákna)

Vláknové kompozity jsou vyztuženy vlákny, tj. útvary, jejichž délkové rozměry jsou mnohem větší než průřezové.

– částicové (izometrický či anizometrický tvar)

Částice je útvar bez převažujícího rozměru. Hlavní funkcí částice je zvýšení tuhosti kompozitů, izometrické částice, ale nezvyšují tahovou pevnost. Také odolnost proti lomu je nižší u částicových než u vláknových kompozitů. Hlavní význam částic je zlepšení vlastností matrice, např. změna elektrické a tepelné vodivosti, zlepšení odolnosti vůči opotřebení, snížení koeficientu tření atd.

4.2. Vláknové kompozity

Jak bylo psáno výše vláknové kompozity lze rozdělit na kontinuální a diskontinuální, tedy vyztužené dlouhými či krátkými vlákny.

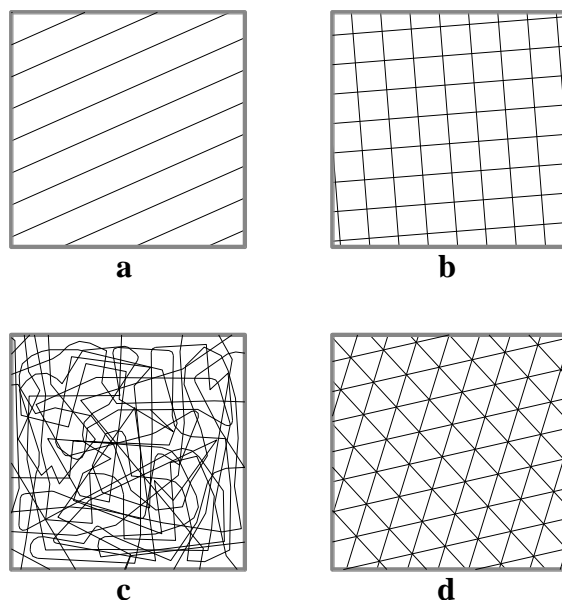
Při vyztužování pomocí krátkých vláken se většinou snažíme o nahodilou orientaci. Krátká vlákna se vyrábějí sekáním pramenců (tzv. rovingů) nebo mletím křehkých vláken, jejich délka se pohybuje až do 20 mm, ale při výrobě se většinou zkrátí.

V této práci jsou předmětem součásti, kde se používají kontinuální vlákna. Jejich užití umožňuje volit orientaci a průběh vláken dle požadavků konstrukce, čehož lze využít, když známe zatížení vyráběné součásti. Jedná se většinou o uhlíková vlákna, která mají výbornou pevnost i podélnou tuhost viz Tabulka 4.1 Materiálové vlastnosti vláken

Tabulka 4.1 Materiálové vlastnosti vláken [6]

| Typ vlákna | Sklo | Aramid | HS - uhlík | T700 12K | HM - uhlík |
|--|--------|---------|------------|----------|------------|
| Modul pružnosti v podélném směru E_L (MPa) | 74 000 | 130 000 | 230 000 | 230 000 | 390 000 |
| Modul pružnosti v příčném směru E_{TT} (MPa) | 74 000 | 5 400 | 15 000 | 14 900 | 6 000 |
| Modulu pružnosti ve smyku G_{LT} (MPa) | 30 000 | 12 000 | 50 000 | 50 000 | 20 000 |
| Pevnost v tahu σ_L (MPa) | 2 100 | 3 000 | 5 000 | 4 900 | 3 800 |
| Hustota ρ (kgm ⁻³) | 2 500 | 1 500 | 1 600 | 1 800 | 1 700 |

Vlákna se a dělí na jednovrstvé a vícevrstvé kompozity. Orientace vláken ve vrstvách se většinou liší, může být jednoosá (a), dvouosá (b), prostorová (c) a víceosá v rovině (d) (viz Obrázek 4.1):



Obrázek 4.1 Možnosti orientace vláken [6]

U vláknových kompozitů se většinou jako matrice používají polymerní typy pryskyřic tj. epoxidové, polyesterové, fenolové a polyamidové. Hlavní nevýhodou pryskyřic je jejich špatná recyklovatelnost. Obvyklé vlastnosti pryskyřic uvádí tabulka 4.2.

Tabulka 4.2 Materiálové vlastnosti matric [6]

| Druh pryskyřice | Epoxidové | Polyesterové | Fenolové | Polyamidové |
|---|------------------|---------------------|-----------------|--------------------|
| Modul pružnosti E_m (MPa) | 4 500 | 4 000 | 3 000 | 4 000 - 19000 |
| Poissonova konstanta ν_m (-) | 0.4 | 0.4 | 0.4 | 0.35 |
| Modulu pružnosti ve smyku G_m (MPa) | 1 600 | 1 400 | 1 100 | 1 100 |
| Pevnost v tahu σ_{pm} (MPa) | 130 | 80 | 70 | 70 |
| Hustota ρ (kgm ⁻³) | 1 200 | 1 200 | 1 300 | 1 400 |
| Maximální teplota T_{max} (°C) | 90 -200 | 60 - 100 | 120 - 200 | 250 - 300 |

4.2.1. Mikromechanika vláknových kompozitů

Základními technickými vlastnostmi vlákna a matice jsou Youngův modul pružnosti (E) Modul pružnosti ve smyku (G), Poissonovo číslo (ν), napětí (σ_{max}) a deformace (ε_{max}) při mezi pevnosti. Tyto vlastnosti lze při prvotním návrhu odhadnout pomocí následujících rovnic použitím známých vlastností jednotlivých složek a objemovým procentem (V) vlákna (f) nebo matice (m). Podélné charakteristiky indexujeme číslem 1 [7].

Pro zjištění Youngova modulu pružnosti neboli modulu pružnosti v tahu ve směru vlákna použijeme následující rovnici tzv. směšovacího pravidla:

$$E_1 = E_f \cdot V_f + E_m V_m \quad (4.1)$$

V_f = Objemové procento vlákna v kompozitu. To je odvozeno z výroby kompozitu.

Abychom zjistili maximální napětí při mezi pevnosti, použijeme na podobném principu jako nahoře fungující rovnici:

$$(\sigma_1)_{max} = \sigma_{fmax} \cdot V_f \quad (4.2)$$

Z toho odvodíme maximální poměrnou deformaci:

$$(\varepsilon_1)_{max} = \frac{(\sigma_1)_{max}}{E} \quad (4.3)$$

Také potřebujeme znát příčné vlastnosti kompozitu. Vlastnosti příčného směru značíme a indexujeme číslem 2.

Příčné vlastnosti kompozitu určíme dle vztahů:

$$\frac{1}{E_2} = \frac{V_f}{E_f} + \frac{V_m}{E_m} \quad (4.4)$$

$$(\varepsilon_2)_{max} = (\varepsilon_m)_{max} \left(1 - V_f^{\frac{1}{3}}\right) \quad (4.5)$$

$$(\sigma_2)_{max} = (\varepsilon_2)_{max} \cdot E_2 \quad (4.6)$$

Poissonovo číslo se také počítá užitím směšovacího pravidla:

$$\nu_{12} = \nu_f V_f + \nu_m V_m \quad (4.7)$$

Modul pružnosti ve smyku:

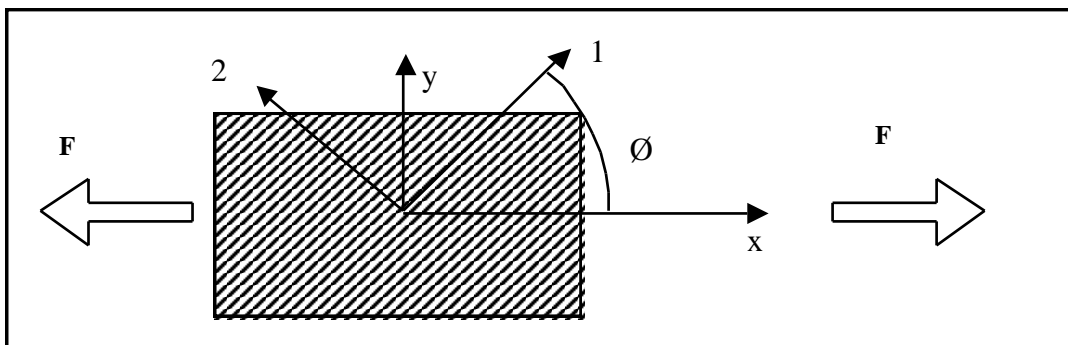
$$\frac{1}{G_{12}} = \frac{V_f}{G_f} + \frac{V_m}{G_m} \quad (4.8)$$

4.2.2. Makromechanika kompozitů

Poté co známe, jak funguje interakce vlákna s maticí, tak je ještě důležité vědět, jak na sebe působí více vláken v kompozitu při zatížení a jaká je závislost mezi napětím a relativními deformacemi. Zde se zaměříme na tzv. rovinně ortotropní laminát. Tuhost popisuje takzvaná tuhostní matice, která se odvozuje přes transformační matici a Hookeův zákon [7].

Transformační matice

Tato matice nám popisuje transformaci síly v lamině, když síla působí mimo osu laminy. Orientace ukazuje Obrázek 4.2.



Obrázek 4.2 Orientace laminy vůči síle

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} m^2 & n^2 & 2mn \\ n^2 & m^2 & -2mn \\ -mn & mn & m^2 - n^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} \Rightarrow \{\sigma\}_1 = [T_\sigma] \{\sigma\}_x \quad (4.9)$$

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} m^2 & n^2 & 2mn \\ n^2 & m^2 & -2mn \\ -mn & mn & m^2 - n^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \Rightarrow \{\varepsilon\}_1 = [T_\varepsilon]\{\varepsilon\}_x \quad (4.10)$$

Kde $m = \cos \varnothing$, $n = \sin \varnothing$

Konstitutivní vztah

Hookeův zákon rovinně ortotropní laminy a prvky tuhostní matice $[Q]$ popisuje vztah

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & Q_{16} \\ Q_{21} & Q_{22} & Q_{26} \\ Q_{61} & Q_{62} & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} \Rightarrow \{\sigma\}_1 = [Q]\{\varepsilon\}_1 \quad (4.11)$$

Mezi prvky tuhostní matice a „technickými“ materiálovými parametry platí následující přepočtové vztahy:

$$Q_{11} = \frac{E_1}{(1 - \nu_{12}\nu_{21})}, \quad Q_{12} = \frac{\nu_{12}E_1}{(1 - \nu_{12}\nu_{21})} = \frac{\nu_{21}E_2}{(1 - \nu_{12}\nu_{21})} = Q_{21}, \quad Q_{22} = \frac{E_2}{(1 - \nu_{12}\nu_{21})}$$

$$Q_{66} = G_{12}$$

Inverzní matice

Inverzí vztahu (4.11) dostaneme následující rovnici s prvky matice poddajnosti $[S]$

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{16} \\ S_{21} & S_{22} & S_{26} \\ S_{61} & S_{62} & S_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & \frac{-\nu_{21}}{E_2} & 0 \\ \frac{-\nu_{21}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

S tím, že:
$$\frac{\nu_{21}}{E_2} = \frac{\nu_{12}}{E_1}$$

Transformační a tuhostní matice se kombinují, aby daly dohromady vztahy pro napětí při zátěži libovolné orientace vůči hlavním směrům (1,2) v kompozitové lamině.

$$\{\sigma\}_x = [T_\sigma]^{-1}\{\sigma\}_1 = [T_\sigma]^{-1}[Q]\{\varepsilon\}_1 = [T_\sigma]^{-1}[Q][T_\varepsilon]\{\varepsilon\}_x = [\bar{Q}]\{\varepsilon\}_x \quad (4.13)$$

nebo

$$\{\varepsilon\}_x = [T_\varepsilon]^{-1}[\varepsilon]_1 = [T_\varepsilon]^{-1}[S]\{\sigma\}_1 = [T_\varepsilon]^{-1}[S][T_\sigma]\{\sigma\}_x = [\bar{S}]\{\sigma\}_x \quad (4.14)$$

Klasická laminační teorie

Při výpočtech kompozitu složeného z více lamin se používá klasická laminační teorie [8]. Tato teorie pracuje s předpoklady:

- Každá lamela je ortotropní a kvazihomogenní.
- Tloušťka lamely je ve srovnání s délkou a šířkou velice malá.
- Z důvodu předchozího předpokladu můžeme uvažovat rovinnou napjatost.
- Lamely jsou k sobě připojeny dokonale a nedochází ke smýkání desek, funkce posunutí jsou tedy spojité funkce.
- Příčné zkosení je rovno nule. To znamená, že kolmice ke středové čáře zůstanou i po deformaci kolmé.
- Závislost mezi deformací a napětím je lineární.

$$\begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_z \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \quad (4.15)$$

Kde $\varepsilon_x, \varepsilon_y$ a γ_{xy} značí napětí na podélné ose a N zátěž na délku

$$\begin{aligned} A_{ij} &= \sum_{k=1}^n (Q_{ij})_k (h_k - h_{k-1}) \\ &= \sum_{k=1}^n (Q_{ij})_k t_k \end{aligned} \quad (4.16)$$

Kde h_k je z-ová souřadnice k-té vrstvy a t_k tloušťka laminy v k-té vrstvě

Toto platí pro symetrickou laminu, také platí:

$$A_{16} = A_{26} = 0$$

Za předpokladu, že:

$$\sigma_y \wedge \gamma_{xy} = 0$$

$$N_x = A_{11}\varepsilon_x + A_{12}\varepsilon_y + A_{16}\gamma_{xy} \neq 0$$

$$N_y = A_{12}\varepsilon_x + A_{22}\varepsilon_y + A_{26}\gamma_{xy} \neq 0 \quad (4.17)$$

$$N_z = A_{16}\varepsilon_x + A_{26}\varepsilon_y + A_{66}\gamma_{xy} \neq 0$$

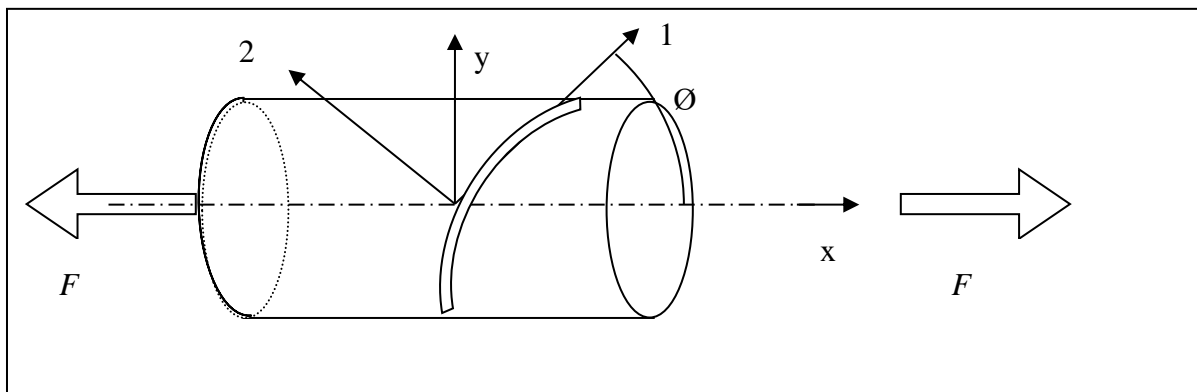
Proto tedy zátěž na délku, Poissonovo číslo a Modul pružnosti v tahu se spočítají následovně:

$$N_x = A_{11}\varepsilon_x - \frac{A_{12}^2}{A_{22}}\varepsilon_x \quad (4.18)$$

$$\vartheta_{xy} = -\frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_x} = \frac{A_{12}}{A_{22}} \quad (4.19)$$

$$E_x = \frac{N_x}{\varepsilon_x} = \frac{A_{11}A_{22} - A_{12}^2}{t \cdot A_{22}} \quad (4.20)$$

Tato teorie může být použita na vinutou trubku za použití souřadnicového systému, viz obrázek 4.3. Tato teorie může být zatížena nepřesnostmi. Jednak v důsledku odchylek skutečných a odhadovaných materiálových parametrů i rozdílné finální konfiguraci vláken oproti předpokladu v důsledku způsobu výroby takové trubky.



Obrázek 4.3 Orientace laminy na ovíjené trubce [6]

Pro korekci první nepřesnosti lze počítat s Tsaiovou modifikační teorií, která přidává konstantu do směšovacího pravidla, takže např. podélný modul lze přesněji odhadnout vztahem:

$$E_1 = k \cdot (E_f \cdot V_f + E_m V_m) \quad (4.21)$$

$$0.9 < k < 1$$

4.2.3. Pevnost

Materiál může být namáhán při jednoose i víceose. Pevnost klasických izotropních materiálů i při víceosém namáhání se posuzuje podle známých hypotéz pevnosti např. HMH - Huber-Mises-Henkey (také známé jako von Misesova hypotéza) - pro houževnaté materiály. Také u kompozitů musíme použít jedno z kritérií pro víceosé namáhání. Pro jednosměrové kompozity existuje také celá řada kritérií, viz např. [8].

Kritéria pevnosti při víceosém namáhání pro jednosměrové kompozity

lze rozdělit:

- Neinteraktivní kritéria

U těchto kritérií neexistuje vazba mezi složkami normálových napětí ani mezi normálovými a smykovými složkami napětí.

Jsou to například tato kritéria:

- Kritérium maximálního napětí
- Kritérium maximální deformace

- Interaktivní kritéria

- Hillovo kritérium pevnosti
- Tsai-Hillovo kritérium pevnosti
- Hoffmanovo kritérium pevnosti
- Tsai-Wu kritérium pevnosti

Hillovo kritérium pevnosti

Toto kritérium vycházelo z podmínky HMH pro izotropní materiál, která má tvar:

$$\frac{1}{2} \left[(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + (\sigma_{yy} - \sigma_{zz})^2 + (\sigma_{zz} - \sigma_{xx})^2 + 6(\sigma_{yz}^2 + \sigma_{zx}^2 + \sigma_{xy}^2) \right] \leq \sigma_k^2 \quad (4.22)$$

kde σ_k je mez kluzu izotropního materiálu.

Hill toto kritérium rozšířil pro ortotropní materiály a zavedl podmínku, při které dojde k porušení materiálu. S tím že σ_L , σ_T a σ_{LT} pro víceosé napětí jsou:

$$\sigma_L = \sigma_{xx} \cos^2\theta + \sigma_{yy} \sin^2\theta + 2\sigma_{xy} \sin\theta \cos\theta$$

$$\sigma_T = \sigma_{xx} \sin^2\theta + \sigma_{yy} \cos^2\theta - 2\sigma_{xy} \sin\theta \cos\theta$$

$$\sigma_{LT} = (\sigma_{yy} - \sigma_{xx})\sin\theta \cos\theta + \sigma_{xy} (\cos^2\theta - \sin^2\theta) \quad (4.23)$$

Podmínka má tvar,

$$A(\sigma_T - \sigma_{T'})^2 + B(\sigma_{T'} - \sigma_L)^2 + C(\sigma_L - \sigma_T)^2 + 2D\sigma_{TT'}^2 + 2E\sigma_{LT'}^2 + 2F\sigma_{LT}^2 \leq 1 \quad (4.24)$$

kde složky napětí jsou v hlavních směrech anizotropie L, T, T'. Parametry A, B, C, D, E a F jsou materiálové charakteristiky a jsou závislé na pevnostech materiálu ve směrech L, T, T' a na pevnostech ve smyku. Proto je možné vyjádřit vztah (4.24) pomocí pevnosti materiálu. Je třeba zdůraznit, že v Hillově podmínce pevnosti (4.24) je uvažována stejná pevnost materiálu v tahu a tlaku.

Za předpokladu stavu rovinné napjatosti (v rovině L, T), tj. když $\sigma_{T'} = \sigma_{LT'} = \sigma_{TT'} = 0$, je možno Hillovu podmínku pevnosti přepsat do tvaru:

$$\left(\frac{\sigma_L}{\sigma_{DL}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_T}{\sigma_{DT}}\right)^2 - \left(\frac{1}{\sigma_{DL}^2} + \frac{1}{\sigma_{DT}^2} - \frac{1}{\sigma_{DT'}^2}\right)\sigma_L\sigma_T + \left(\frac{\sigma_{LT}}{\sigma_{DLT}}\right)^2 \leq 1 \quad (4.25)$$

kde σ_D jsou meze pevnosti v příslušných směrech.

Tsai – Hillovo kritérium pevnosti

Hillovu podmínku pevnosti pro rovinnou úlohu (4.25) zjednodušil Tsai pro případ jednosměrových kompozitů. Uvažoval, že $\sigma_{DT} = \sigma'_{DT}$ a potom má podmínka tvar:

$$\left(\frac{\sigma_L}{\sigma_{DL}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_T}{\sigma_{DT}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{LT}}{\sigma_{DLT}}\right)^2 - \frac{\sigma_L \sigma_T}{\sigma_{DL}^2} \leq 1 \quad (4.26)$$

Je zřejmé, že vztah (4.26) vyjadřuje v souřadnicovém systému $O(\sigma_L, \sigma_T, \sigma_{LT})$ uzavřenou plochu. Podmínku (4.26) lze upravit tak, aby byla respektována rozdílná pevnost v tahu a tlaku viz Hoffmanovo kritérium pevnosti (4.27). Avšak nevýhodou tohoto zobecnění je, že plocha porušení pak není spojitá.

Hoffmanovo kritérium pevnosti

Hoffman zobecnil Hillovo kritérium tak, že zavedl rozdílná chování materiálu v tahu a tlaku. Pro rovinnou napjatost v rovině LT lze Hoffmanovu podmínku pevnosti zapsat jako:

$$\frac{\sigma_L^2}{\sigma_{DLt}\sigma_{DLc}} + \frac{\sigma_T^2}{\sigma_{DTt}\sigma_{DTc}} - \frac{\sigma_L \sigma_T}{\sigma_{DLt}\sigma_{DLc}} + \frac{\sigma_{DLc} - \sigma_{DLt}}{\sigma_{DLt}\sigma_{DLc}} \sigma_L + \frac{\sigma_{DTc} - \sigma_{DTt}}{\sigma_{DTt}\sigma_{DTc}} \sigma_T + \frac{\sigma_{LT}^2}{\sigma_{DLT}^2} \leq 1 \quad (4.27)$$

kde index c znamená v tlaku a index t znamená v tahu.

Rozsah práce neumožňuje podrobný popis kritérií a jejich porovnávání. Proto bude dále využíváno pouze jedno z těchto teorií, konkrétně Tsai - Hillovo kritérium pevnosti.

5. Přehled běžných typů spojů kompozitů

Hlavním faktorem, který limituje kompozitové vysoce namáhané součástí či konstrukce, jsou spoje mezi jednotlivými částmi konstrukce. V následujícím textu je jednoduchý přehled rozdělení spojů, používaných při aplikaci.

5.1. Lepené spoje

Spoje, které budou hlavně používány a zkoumány, jsou lepené spoje. V současnosti je to nejpoužívanější metoda pro spojování kovových a kompozitových součástí. Hlavními výhodami lepených spojů je především rovnoměrné rozložení zatížení na relativně velké spojované ploše, dále nevytváření vrubu, časová a finanční úspora, nevyvolávání koroze použitím pomocných kovových částí, minimální nárůst hmotnosti konstrukce a minimální potřeba zasahovat do vlastností spojovaných částí.

Nevýhodou je citlivost spoje na okolní prostředí, složitá předvídatelnost jeho životnosti a také nerozebíratelnost pro případnou kontrolu či opravu.

5.2. Svarové spoje

Kompozit a kov je možné v určitých případech kombinací teplotních, tlakových a metalurgických podmínek svařovat. Výhodou této metody je možnost dosažení velice pevného spoje, nízká časová náročnost, relativní jednoduchost a možnost automatizace, možnost vytvoření spoje bez přídavného materiálu, nepoškozování skladby a nenáročnost na povrchovou úpravu. Bohužel lze svařovat pouze některé typy kompozitních a kovových materiálů.

Další nevýhodou je, že vysoké teploty, které vznikají při svařování, mají za následek řadu nevýhod jako je například možnost delaminace, poškození nebo zkroucení vláken. Za jistých podmínek může potřeba vysokých teplot způsobit nevhodnost této technologie i pro kombinaci jinak svařitelných materiálů.

5.3. Nalisovaný spoj

Spoj nalisováním je definovaný jako nesnadně rozebíratelný. Jeho hlavní přednosti jsou spolehlivost a nízká cena, jen malé tepelné ovlivnění spojovaných součástí, nenavyšování hmotnosti konstrukce a nízká náročnost na typ materiálu.

5.4. Spoje s pomocným elementem

Při požadavku rozebíratelnosti spoje je pro přenos zatížení používáno nejčastěji pomocných elementů – především šroubů a nýtů. Jedná se o klasický způsob spojování, otvor pro spojovací prvek je do struktury materiálu vytvářen dodatečně, vrtáním apod. Tím ale vzniká slabé místo konstrukce přerušáním kontinuity vláken kompozitu.

Elementy pro přenos zatížení lze použít ve všech případech, kde není možné tepelně ovlivňovat konstrukci a nejsou zde dobře proveditelné povrchové úpravy daných částí. Velkým problémem jsou zde koncentrátoři napětí vzniklé zásahem do geometrie spojovaných součástí.

Rozložení napětí kolem šroubu v kompozitové součásti je více nerovnoměrné, než jak je tomu u kovové součásti s identickou geometrií, a těžko se zjišťuje pro daný případ. Problémem může být i např. přidávaná hmotnost do konstrukce ale i galvanická koroze.

Také tento typ spoje bude tématem této práce. Konkrétně jako kombinace s lepeným spojem při vlepení vložky do kompozitové skříně v místě kontaktní plochy satelitního, nebo planetového kola s kompozitovou skříní.

5.5. Spoje s využitím tvaru spojovaných dílů

Tyto spoje pro přenos zatížení využívají vhodně tvarovaných částí spojovaných dílů. V současnosti jsou používány především ve speciálních případech, nejsou zatím v průmyslu moc rozšířené či v některých aplikacích vůbec známé.

Takovýto typ spoje označujeme jako „integrováný spoj“ – jedná se o navíjení vláken kompozitového dílu přímo na určitou tvarově vhodnou část kovové součásti. Vyznačuje se zejména svou pevností, životností a spolehlivostí. Vlákná kompozitního materiálu v tomto spoji totiž nejsou nijak narušena.

6. Technologie výroby zkušebního vzorku skříně diferenciálu

. Existuje řada technologií, kterými lze v současnosti vyrábět kompozitní materiály s vláknovou výztuží a polymerní maticí. Většina kompozitních technologií využívá formu nebo trn ke konsolidaci a vytvrzení tekuté fáze (matrice, pryskyřice) a pevné fáze (vláken). V následujícím přehledu jsou rozebrány klady a zápory několika vybraných technologií

6.1. Pultruze

Pultruze neboli protahování je kontinuální proces. Svazek vláken je protahován formou – profilem zvoleného průřezu, je buď předem prosycen pryskyřicí, nebo při průchodu formou dochází k injektaci pryskyřice a ihned je vystaven působení tepla a tím vytvrzen obvykle ještě ve formě–profilu.

- Výhody:
 - vysoká produktivita výroby (ne kusově ale délkově – až stovky metrů)
 - poměrně velmi kvalitní vnější povrch
 - možno vyrábět různé průřezy (i otevřené a uzavřené)
 - vysoký objemový podíl v_f
- Nevýhody:
 - naprostá většina všech vláken pod úhlem 0° , tedy ve směru podélné osy profilu.

6.2. Ruční laminace a prosycení

Výrobek je zhotoven ručním kladením vláken či tkanin na trn. Na suchá vlákna či tkaninu je pomocí štětce, stříkáním nebo rukou nanášena matrice. Pak je výrobek vytvrzen.

- Výhody:
 - relativně nízké náklady na přípravky

- Nevýhody:
 - omezená tvarovatelnost tkanin
 - omezeno použitými vlákny a tkaninami
 - nutnost technologických přísad
 - velmi špatná regulace objemového podílu matrice
 - nižší kvalita povrchu a špatně dosažitelné přesné tloušťky

6.3. Ruční kladení prepregu a autokláv

Výrobek je zhotoven ručním kladením prepregů (tkanina předem prosycená pryskyřicí) na trn a pak vložen na vytvrzení do autoklávu. Vhodné pro tvarově jednoduché vysoce namáhané a tenkostěnné skořepiny, velkoplošné a tepelně zatěžované díly a součásti, kde není vyžadován kvalitní povrch z obou stran.

- Výhody:
 - vysoká kvalita materiálu
 - dobrá regulace objemového podílu matrice

- Nevýhody:
 - omezená tvarovatelnost prepregů okolo trnu
 - nutnost použití autoklávu jako nákladného výrobního prostředku (velmi vysoké náklady na vytvrzování)
 - omezeno použitými prepregy, poměrně velmi špatně dosažitelné přesné tloušťky (tloušťky produktů jsou násobkem možných tlouštěk dostupných typů tkanin a prepregu na trhu)
 - nutnost technologických přísad
 - skladování prepregů v chladicím boxu, omezená životnost
 - vysoká cena prepregů.

6.4. Technologie navíjení vláken

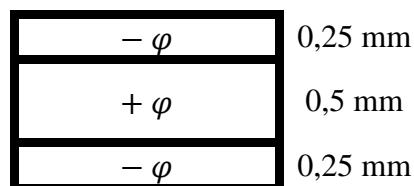
Tato technologie je založená na strojovém navíjení prosyceného svazku vláken dané „hutnosti“ („fiber tow“ tj. daného počtu mikrovláken) na dlouhý trn a to pod různým úhlem vůči podélné ose trnu. Po vytažení trnu získáváme trubku jako výchozí polotovár. Vlákná lze „navíjet“ i rovnoběžně s podélnou osou trubky např. jejich „zaháknutím“ za speciální jehličkové koncovky na obou koncích trubky, a tím orientovat výztuž (vrstvu kompozitu) v požadovaném podélném směru, aby mohlo být dosahováno vysoké ohybové nebo tahové tuhosti (tj. zatěžování ve směru vláken).

6.5. Zvolená technologie: Technologie navíjení vláken

Díky spolupráci s firmou Compotech byl definován způsob výroby skříně pomocí navíjení vláken, protože tato firma, která se právě na tuto technologii specializuje, je nejlepší v ČR a patří k nejlepším výrobcům navíjených nosníků na světě.

Z toho je vycházeno i pro návrh samotné skříně. Aby byla touto technologií vyrobitelná, musí být v průřezu kruhového tvaru a musí mít pozvolné změny průměrů.

Další výhodou je, že v této technologii je velmi snadná změna orientace navíjení vláken v průběhu výroby pro každou laminu (vrstva jednoho úhlu). Jednotlivé laminy, které mají tloušťku 0,25 mm, tvoří základní skladbu. Základní skladba má tloušťku 1 mm s orientací (- úhel ($t = 0,25$ mm), + úhel ($t = 0,5$ mm), - úhel ($t = 0,25$ mm)).



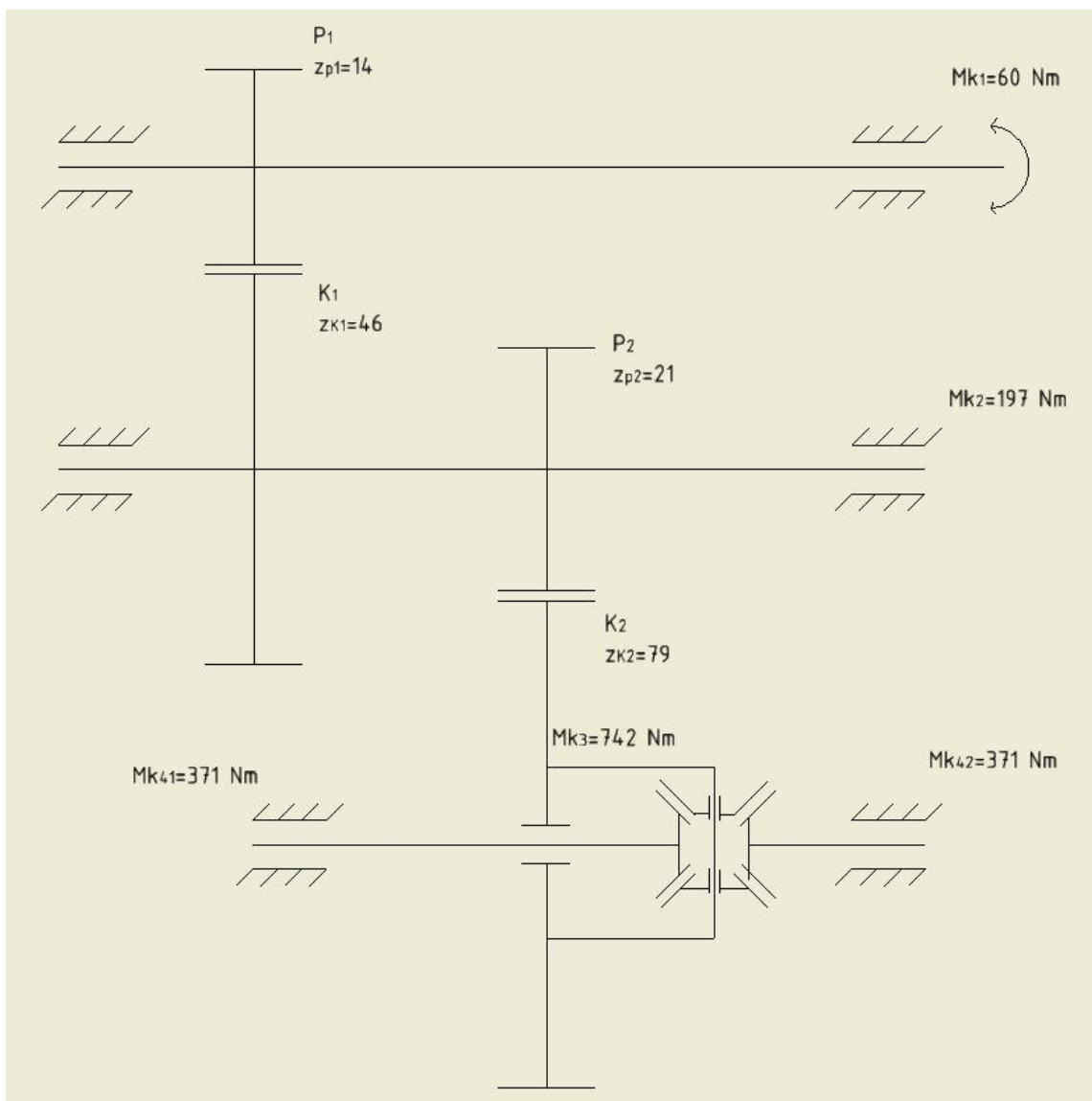
Obrázek 6.1 Ukázka skladby jedné základní skladby

7. Zatížení převodovky a diferenciálu

V této kapitole jsou zpracovány vstupní data pro analýzu původní a kompozitové varianty. Budu počítány síly v ozubení převodovky a ve vnitřním soukolí.

7.1. Zatížení v rámci převodovky

Jedná se o klasickou jednostupňovou převodovku s diferenciálem, což je u elektromobilů typické. Na obrázku 7.1 je schéma této převodovky s diferenciálem. Převodovka obsahuje dvě ozubená kola (K_1 , K_2) a dva pastorky (P_1 a P_2). Druhé ozubené kolo (K_2) je takzvaně korunové, to znamená ozubené kolo, na které navazuje diferenciál.



Obrázek 7.1 Schéma převodovky

V zadání je udáván vstupní moment do převodovky 60 Nm, který po zpřevodování bude mnohem větší a bude tvořit hlavní zatížení pro mnou počítaný diferenciál.

- Vstupní moment do převodovky $M = 60 Nm$
- Počet zubů na P_1 $z_{P1} = 14$
- Počet zubů na K_1 $z_{K1} = 46$
- Počet zubů na P_2 $z_{P2} = 21$
- Počet zubů na K_2 $z_{K2} = 79$
- *Vstupní moment na diferenciálu*
- $M_d = M \cdot i_{12} \cdot i_{23} = M \cdot \frac{z_{K1}}{z_{P1}} \cdot \frac{z_{K2}}{z_{P2}} = 60 \cdot \frac{46}{14} \cdot \frac{79}{21} = 742 Nm$ (7.1)

7.2. Zatížení diferenciálu

Diferenciál je zatížen dvěma typy zatížení. Zatížením od korunového kola a od vnitřního ozubení. Korunové kolo je zatíženo zpřevodovaným vstupním momentem, který způsobí rotaci skříně a tím i zatížení od vnitřního soukolí.

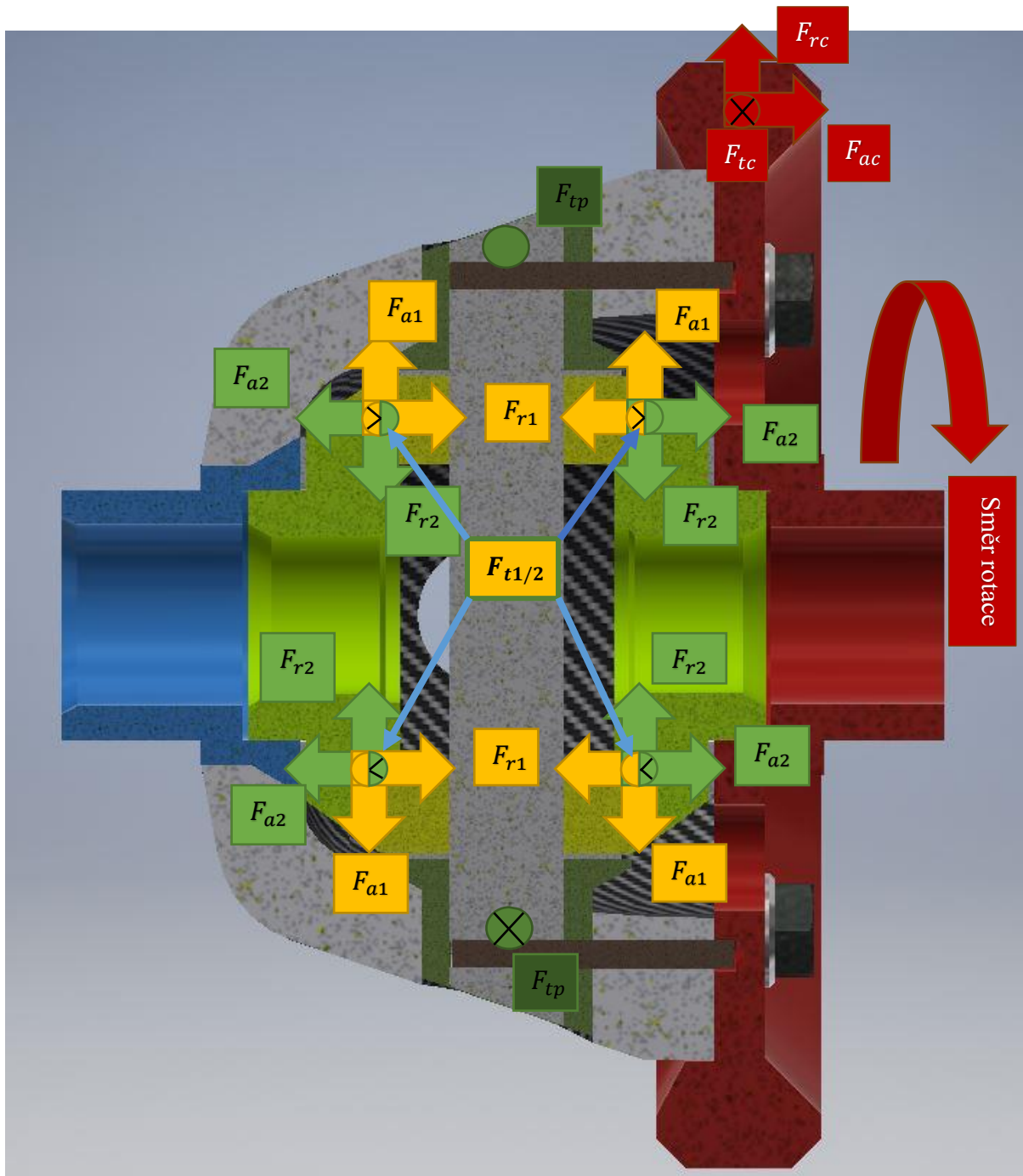
7.2.1. Zatížení diferenciálu od vnitřního ozubení

Na obrázku 7.2 je diagram silového působení v rámci vnitřního soukolí diferenciálu. Z něj je patrné, že tečná a radiální síla se všude hodnotou rovná, ale vždy ve dvojici mají opačný směr, z čehož vychází, že se síly radiální a tečné navzájem odečtou. Proto je potřeba vypočítat pouze síly axiální (a samozřejmě také sílu tečnou, protože ta je k výpočtu axiální potřeba), které budou směřovat do skříně. Další síla, která se bude počítat, je síla otláčení od čepu, která bude přes vložku tlačít do skříně.

- Vstupní moment na diferenciál $M = 742 Nm$
- Vzdálenost místa otláčení od čepu k ose skříně $r = 0,05 m$
- Výpočet tečné síly
- $F_{t1} = F_{t2} = \frac{\frac{M_d}{2}}{\frac{d_m}{2}} = \frac{742}{0,035} = 21200 N$ (7.2)

- Výpočet axiální síly
- $F_{a1} = \frac{F_t}{\cos \beta_m} (\sin \delta_i \cdot \tan \alpha_{mn} + \cos \delta_i \cdot \sin \beta_m)$ (7.3)
- $F_{a1} = \frac{21200}{\cos 20^\circ} (\sin 35,53^\circ \cdot \tan 18,88^\circ + \cos 35,53^\circ \cdot \sin 20^\circ) = 10763,2 N$

- $F_{a2} = \frac{21200}{\cos 20^\circ} (\sin 54,46^\circ \cdot \tan 18,88^\circ + \cos 54,46^\circ \cdot \sin 20^\circ) = 10763,3 \text{ N}$
- Výpočet síly od otláčení
- $F_{tp} = \frac{M_d}{2r} = \frac{742}{0,1} = 7420 \text{ N}$ (7.3)

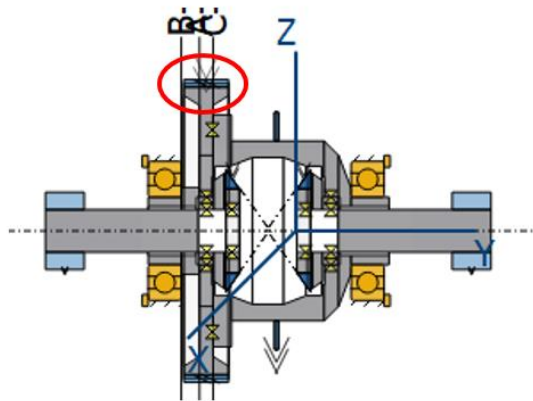


Obrázek 7.2 Silový diagram diferenciálu

7.2.2. Zatížení diferenciálu od korunového kola

Zatížení od korunového kola bylo zasláno společností KIMM, viz obrázek 7.3. Na tomto obrázku je síla v jednotlivých složkách a průměr, na kterém působí. Proto tyto síly mohou být jednoduše přepočítány pomocí rovnováhy dvouramenné páky na jakýkoli operační průměr, který bude potřeba.

체코 Diff Box 3차 검토(2)



| Item | Unit | Value |
|--------------------------|------|--------|
| Operating pitch diameter | mm | 153.26 |
| Axial force Y | N | -2255 |
| Shearing force X | N | 1998 |
| Shearing force Z | N | 4813 |

Helical gear force

Obrázek 7.3 Zatížení korunového kola poskytnuté firmou KIMM

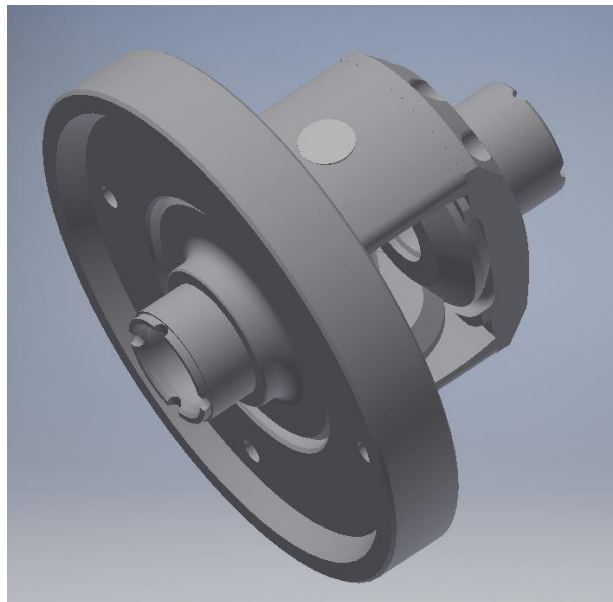
8. Návrh kompozitního diferenciálu

Nutnost odlehčení, jak bylo uvedeno v úvodu, je zcela zjevná, ale stvořit přesnou kopii kovové verze z kompozitu není možné, protože návrh kovové verze diferenciálu se liší od kompozitové verze. Kov je na rozdíl od uhlíkového kompozitu izotropní materiál a možnostmi výroby se velmi liší od uhlíkového kompozitu, jelikož kompozit se může obrábět, ale přeruší se tím kontinuita vláken a snižuje se tak jeho pevnost.

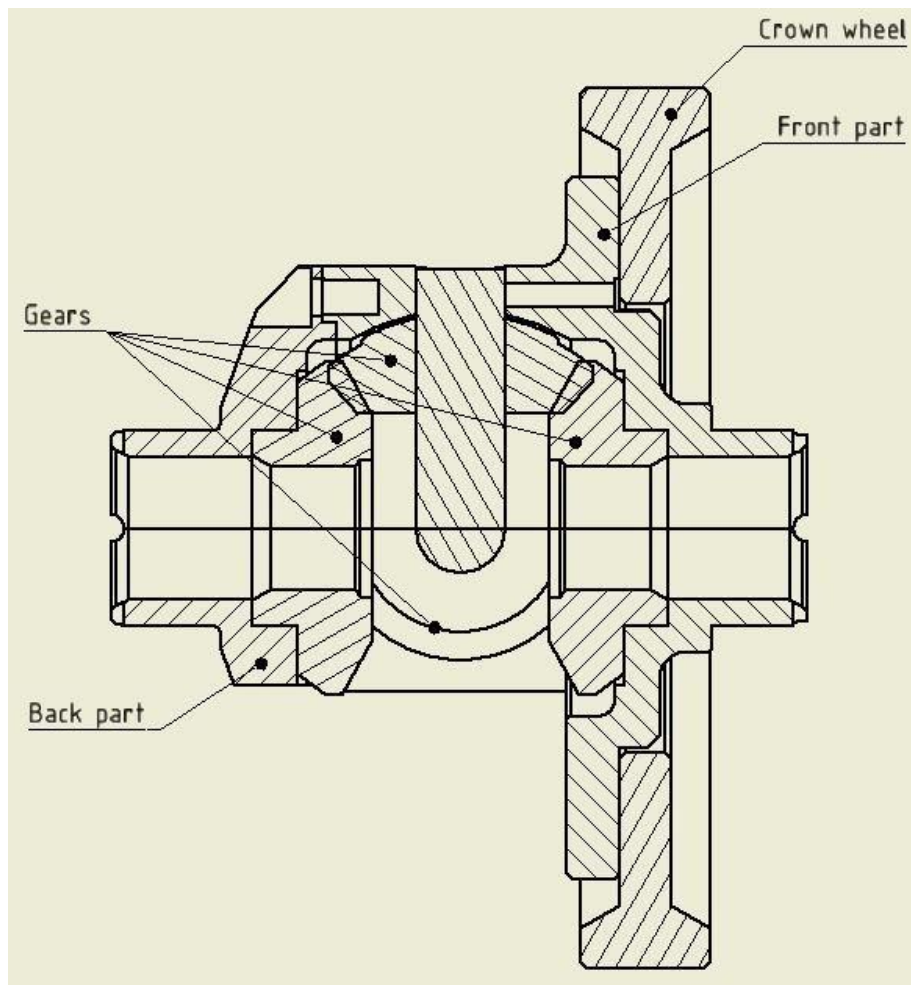
8.1. Původní verze

Model a výkres původní verze byl dodán korejskou stranou. Kromě kol a čepu, což je ve všech verzích stejné, se skládá ze tří částí korunového kola, přední a zadní části. Přední a zadní část je z litiny (GCD450) a korunové kolo je z ocele (SMC420), všechny tři části jsou smontovány pomocí šroubů. Plnění této verze je po odšroubování zadní části tedy zezadu.

- 100% kov (počítáno včetně kol)
- Hmotnost: 4 kg (počítáno včetně kol)



Obrázek 8.1 Model stávající verze



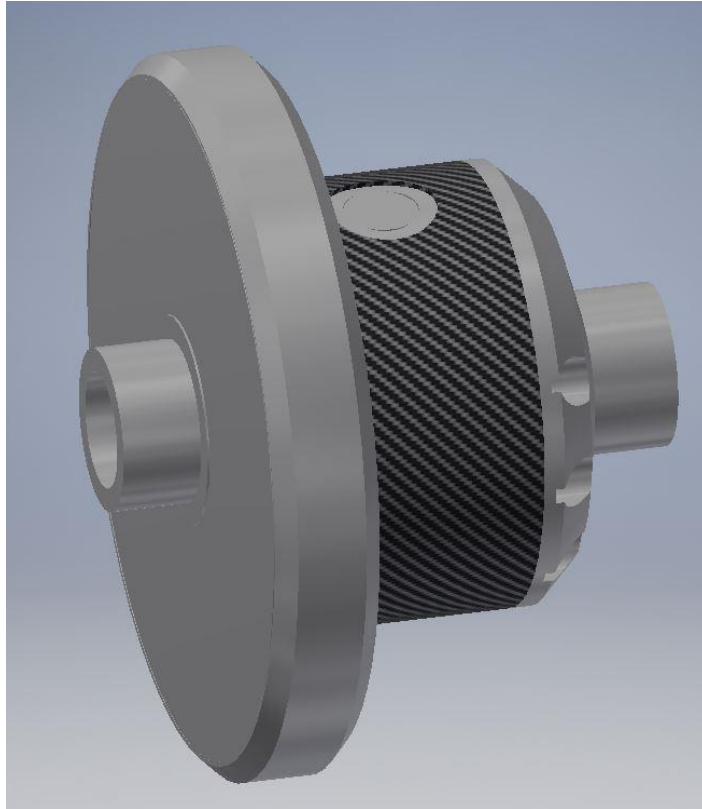
Obrázek 8.2 Výkres stávající verze

8.2. Verze I (Lepená)

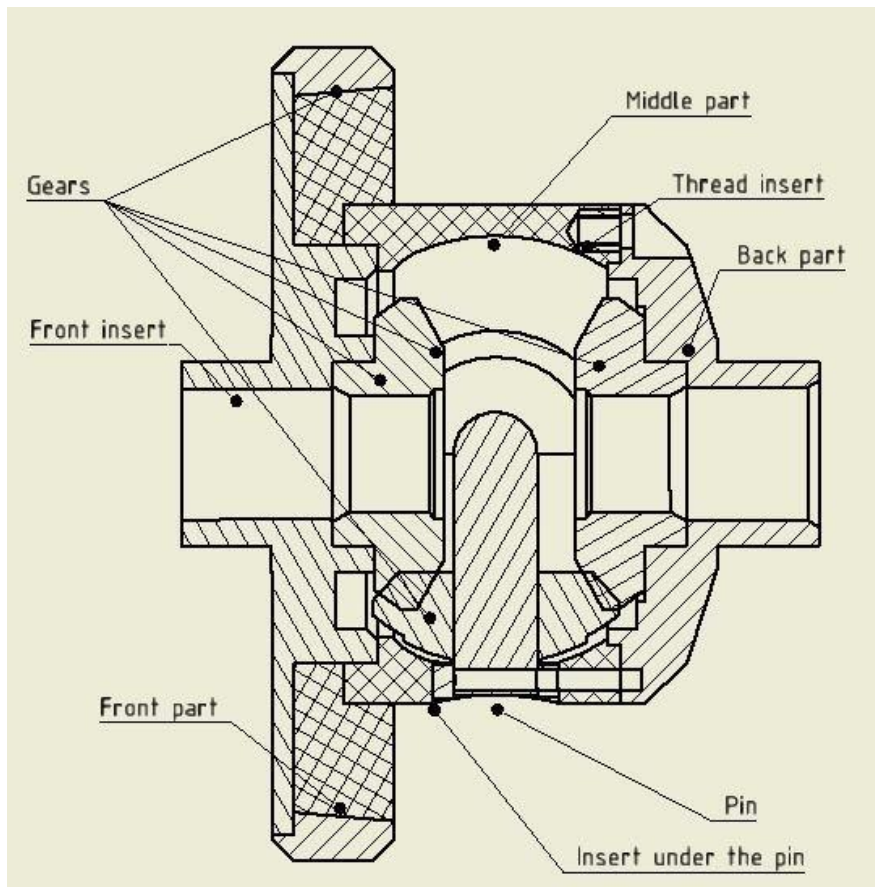
Ideou tohoto zpracování je zachovat stávající zadní část, k ní vytvořit navíjením přední část, která by se šroubovala přes závitové vlepené vložky k původní zadní části. Tím je zajištěn stávající postup kompletace. Korunové kolo je hybridního typu z kompozitního plátového základu a ozubeného prstence. Korunové kolo je slepeno dohromady s přední částí skříně.

Z kovových prvků v tomto případě jsou použity vložky pod čep, závitové vložky a vlepený přední kryt pro axiální jištění prstence, uzavření diferenciálu a jako podklad pod ložisko.

- 32,1% kompozitu, 67,9% kovu (počítáno včetně kol)
- Hmotnost: 3,6 kg - redukce 0,4 kg tj. 10 % hmotnosti kovové verze (počítáno včetně kol)



Obrázek 8.3 Model verze I



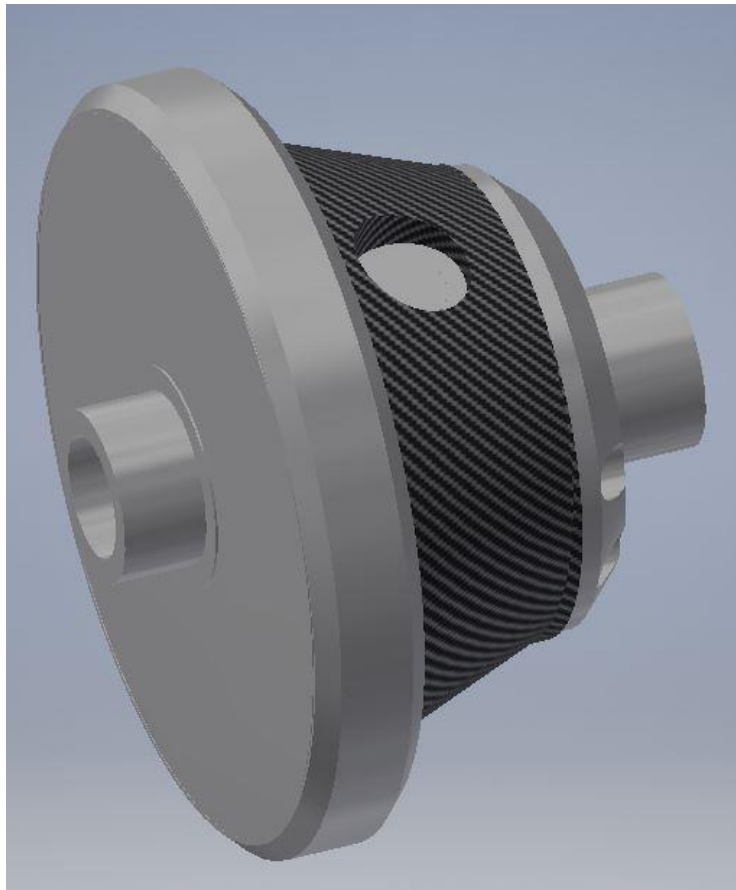
Obrázek 8.4 Výkres verze I

8.3. Verze II (Navíjená)

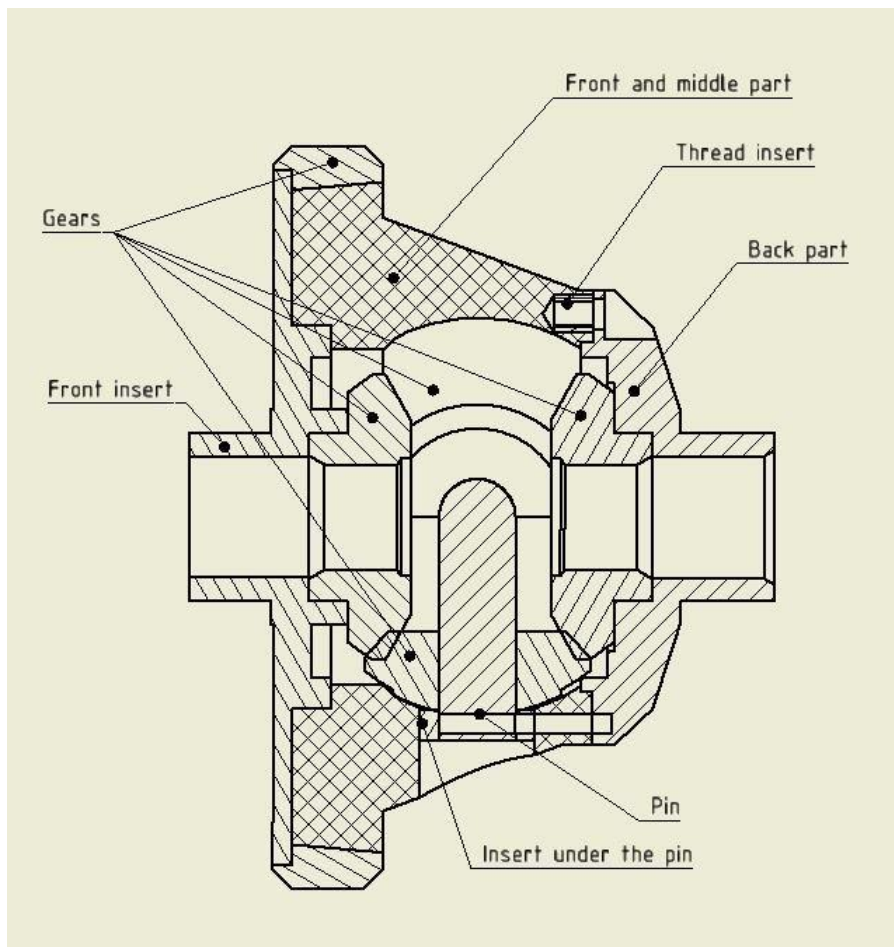
Tato varianta má navinutou část pod korunovým prstencem a přední část do jednoho tělesa. Zadní část se opět použije z původní verze, aby se zachovalo montování původní verze.

Opět jsou použity vložky pod čep, závitové vložky a vlepený přední kryt pro axiální jistění prstence, uzavření diferenciálu a jako podklad pod ložisko.

- 39,4% kompozitu, 60,6% kovu (počítáno včetně kol)
- Hmotnost: 3,59 kg redukce 0,41 kg tj. 10,25 % hmotnosti kovové verze (počítáno včetně kol)



Obrázek 8.5 Model verze II



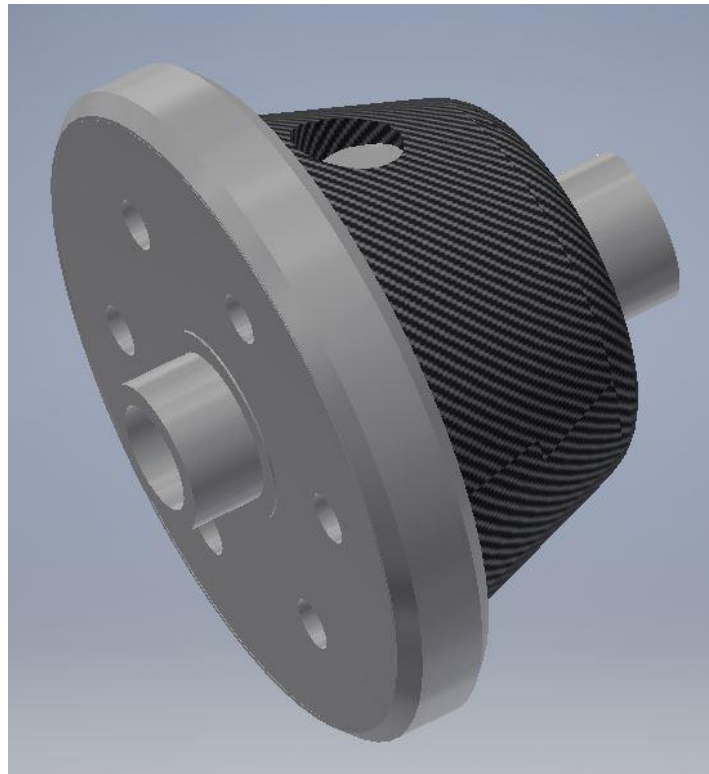
Obrázek 8.6 Výkres verze II

8.4. Verze III (Celonavíjená)

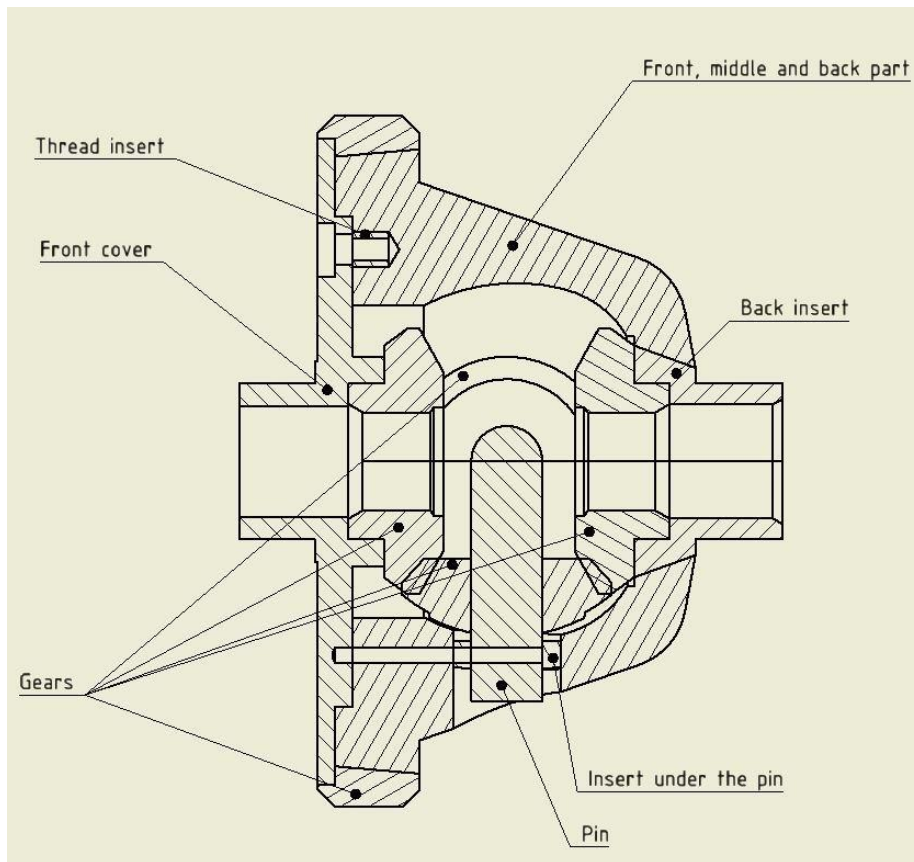
U této verze je navinuta dohromady část pod korunovým kolem, přední část i zadní část, aby byl co nejvíce zvýšen podíl kompozitu. Tím se změní montáž diferenciálu, v této verzi je zepředu, což se po konzultaci se zadavatelem nevyhodnotilo jako problém.

Opět jsou použity vložky pod čep, závitové vložky a vlepený přední kryt pro axiální jištění prstence, uzavření diferenciálu a jako podklad pod ložisko, ale tentokrát je nutné použít ještě zadní kovovou vložku pod zadní planetu a pod ložisko.

- 45,2% kompozitu, 54,8% kovu (počítáno včetně kol)
- Hmotnost: 3,36 kg redukce 0,64 kg tj. 16 % hmotnosti kovové verze (počítáno včetně kol)



Obrázek 8.7 Model verze III



Obrázek 8.8 Výkres verze III

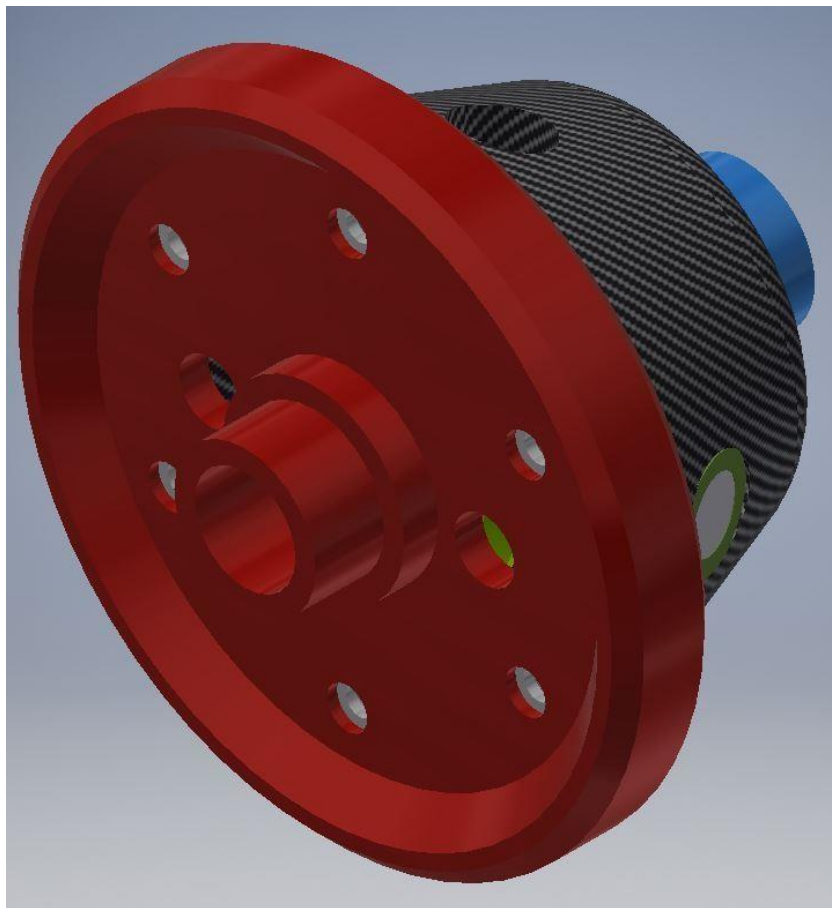
8.5. Verze IV (Integrované kolo s krytem)

Pro tuto variantu je korunový prstenec, část pod korunovým kolem a přední kryt integrovány do jedné kovové součásti. Přední a zadní část jsou navíjeny dohromady.

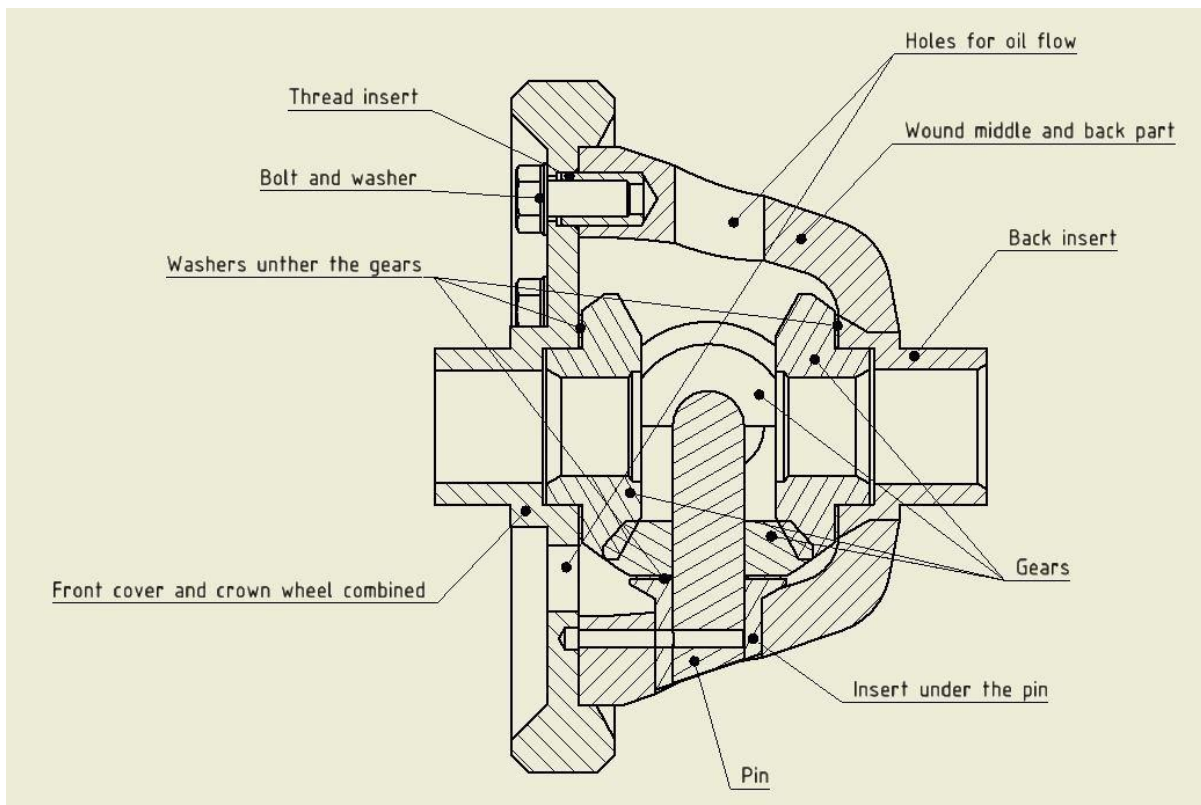
Rozebírání je opět zepředu.

Opět jsou použity vložky pod čep, závitové vložky a zadní kovovou vložku pod zadní planetu a ložisko

- 34,3% kompozitu, 65,7% kovu (počítáno včetně kol)
- Hmotnost: 3,44 kg redukce 0,56 kg tj. 14 % hmotnosti kovové verze (počítáno včetně kol)



Obrázek 8.9 Model verze IV



Obrázek 8.10 Výkres verze IV

8.5.1. Výběr finální verze

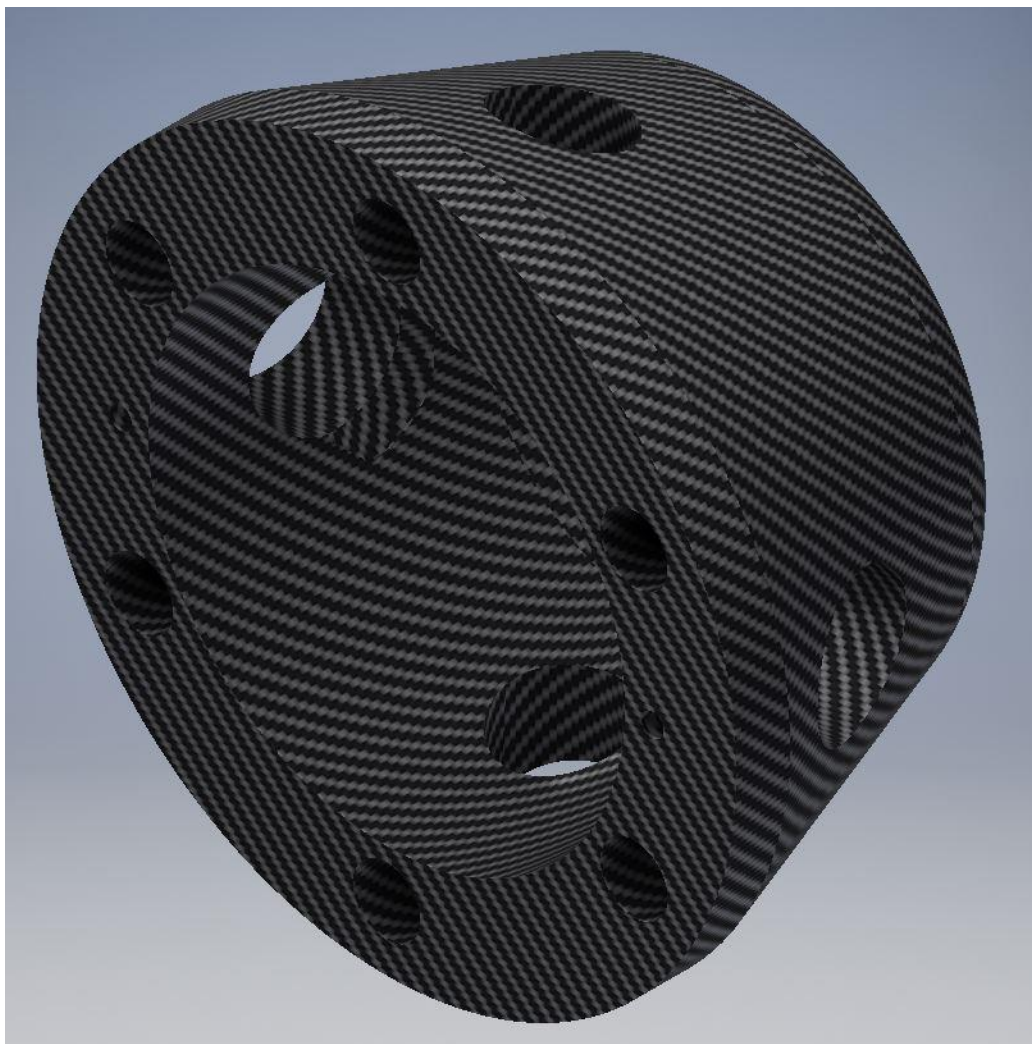
Po konzultaci s firmou Compotech, která bude diferenciál vyrábět, byly vyloučeny verze I a II, protože závitová vložka příliš oslabuje stěnu a pro zvětšení tloušťky není možné použít stávající zadní část, což byla hlavní výhoda těchto dvou návrhů.

Z verze III a IV byla vybrána verze IV, která má sice menší podíl kompozitu, ale je mnohem jednodušší na montáž a výrobu. Výsledný sestavný výkres s kusovníkem je v příloze jako příloha 1.

8.6. Návrh kompozitní skříně

Vnitřní stěna kompozitní skříně je navržena podle vnitřního prostoru původního diferenciálu, vnější stěna je navržena tak, aby diferenciál pasoval do kužele ve víku kompozitní převodovky, a zároveň aby tloušťka stěny byla co největší. Poté, co výrobce povolil zploštění satelitních ozubených kol, mohl být vnitřní prostor rozšířen, což pomohlo, aby byla změna tloušťky stěny minimální.

Do skříně je třeba vyvrtat 4 díry po obvodu po 90 stupních. Protější jsou stejné. Jedna z dvojice děr má za úkol pouze zajištění cirkulace oleje. Druhá v sobě má vlepenou vložku pod čep. Tato díra má vnitřní zahloubení, pro správnou polohu satelitního kola. Dále je vyvrtáno 6 děr z čela pro závitové vložky. Výkres skříně je v příloze jako příloha 2.



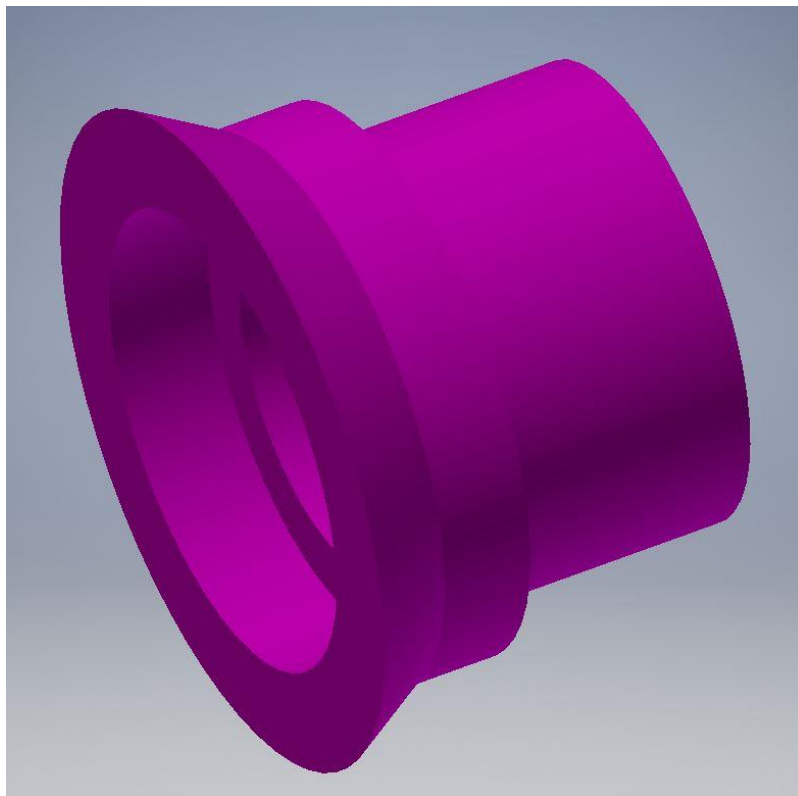
Obrázek 8.11 Model kompozitní skříně

8.7. Návrh kovových částí

Finální varianta obsahuje celkem 4 kovové části, které je nutné funkčně a výrobitelně navrhnout. Každá část má jiný účel a ne všechny budou vlepovány do kompozitové skříně. Tyto okolnosti je třeba při jejich návrhu vzít v úvahu.

8.7.1. Zadní vložka

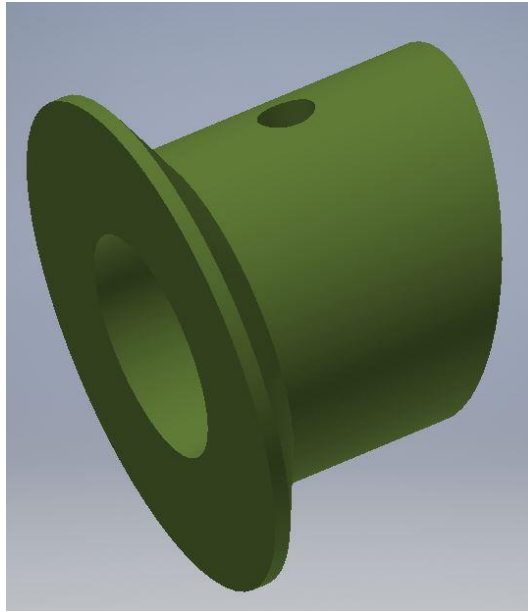
Zadní vložka je navržena tak, aby přenášela axiální zatížení od planety do skříně, proto je zčásti kuželová a zčásti válcová, pro lepší středění ve skříně. Zadní část vložky je válcová s dorazem na ložisko. Model zadní vložky lze vidět na obrázku 8.12 a výkres v příloze jako přílohu 6.



Obrázek 8.12 Model zadní vložky

8.7.2. Vložka pod satelit (čep)

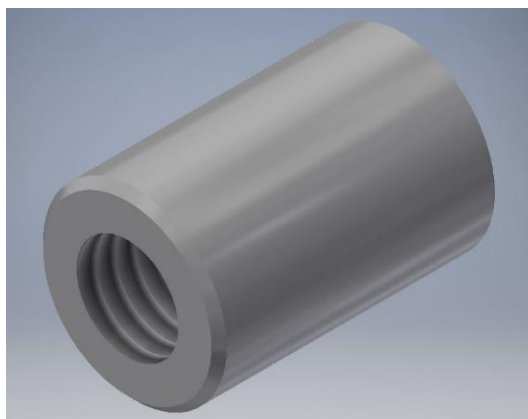
Vložka pod satelit, do níž se bude lisovat čep, plní dvě úlohy. Zaprvé přenáší axiální zatížení od satelitu, proto její vnější tvar je zčásti válcový se zahlobením do skříně a zbytek tělesa je válcový opět pro středění do skříně. Její druhou úlohou je držení čepu, proto je ve vložce díra na axiální pojištění čepu. Výkres této součásti najdete v příloze jako číslo 5.



Obrázek 8.13 Model Vložky pod satelit (čep)

8.7.3. Závitová vložka

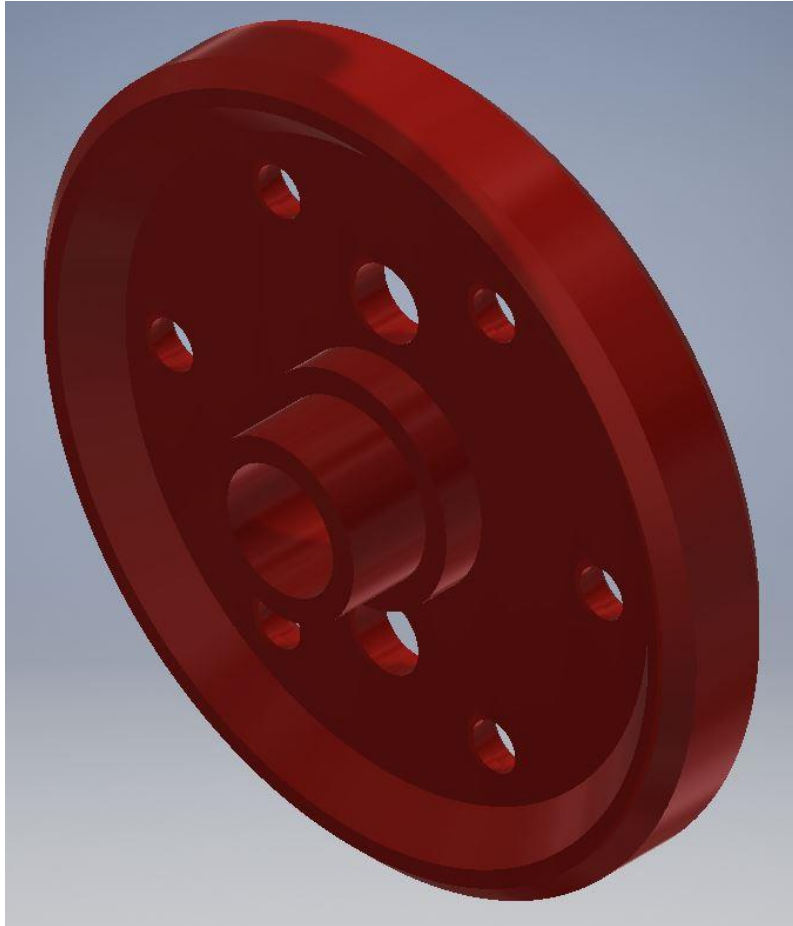
Závitová vložka bude vlepena do skříně s tím, že jedna její část bude zalepená a druhá bude pracovat jako pouzdro šroubu M8. Výkres součásti příloha 4.



Obrázek 8.14 Model závitové vložky

8.7.4. Korunové kolo

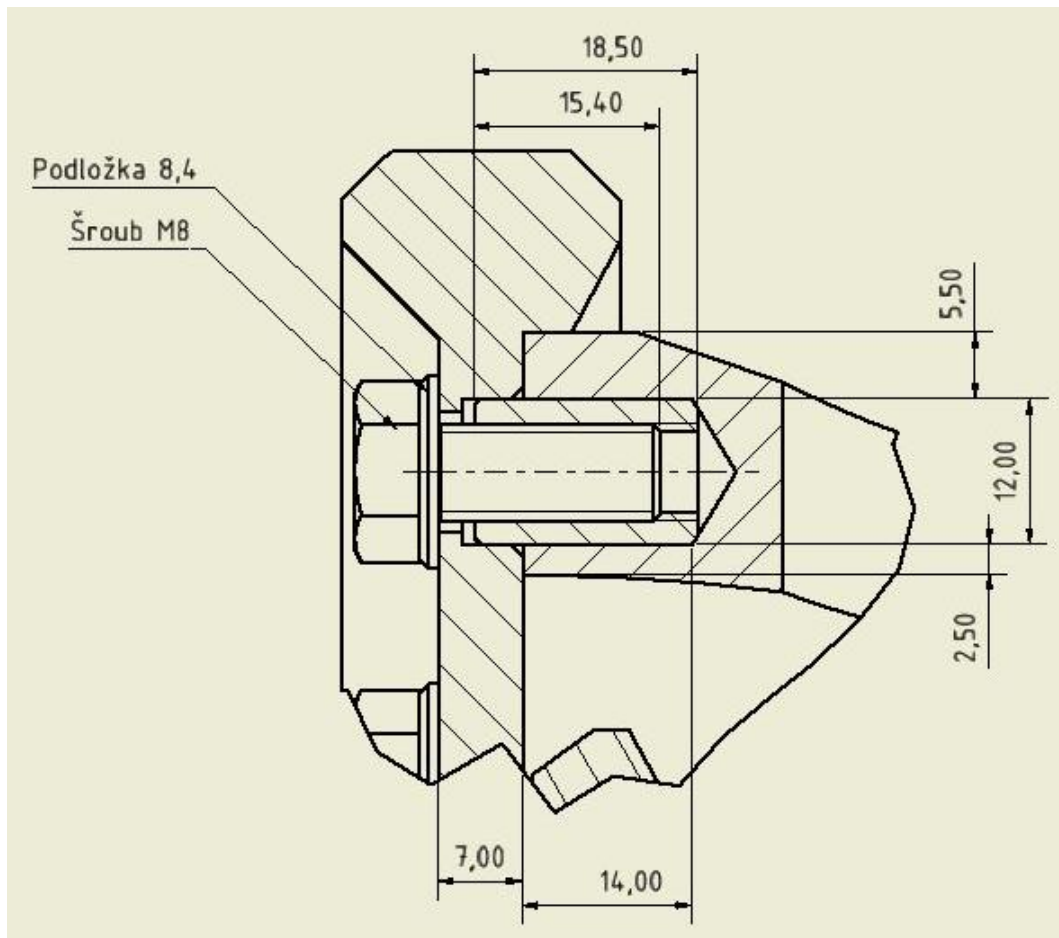
Korunové kolo vzniklo jako sloučenina předního krytu, korunového věnce a desky pod korunovým věncem. Přes závitové vložky bude šrouby M8 přišroubované ke skříni a jeho přední část se bude opírat o ložisko. Výkres korunového kola je jako příloha 3.



Obrázek 8.15 Model korunového kola

8.7.5. Spoj korunové kolo skříň diferenciálu

Spoj korunového kola a skříň diferenciálu bude realizován pomocí závitové vložky jakožto pouzdra pro šroub, viz obrázek 8.16. V případě ocel-ocel by bylo možné použít hned několik variant spoje. Například použití lícovaných šroubů, nebo kolíků. Čímž by byl vytvořen svěrný spoj. Ale v případě kompozitu toto řešení použít nelze. Případ použití závitových vložek skýtá velkou výhodu v možnosti použít běžný šroub M8 namísto některého z dražších řešení. Toto řešení je nutno zkontrolovat na stříh, na otlacení a na vytržení vložky.



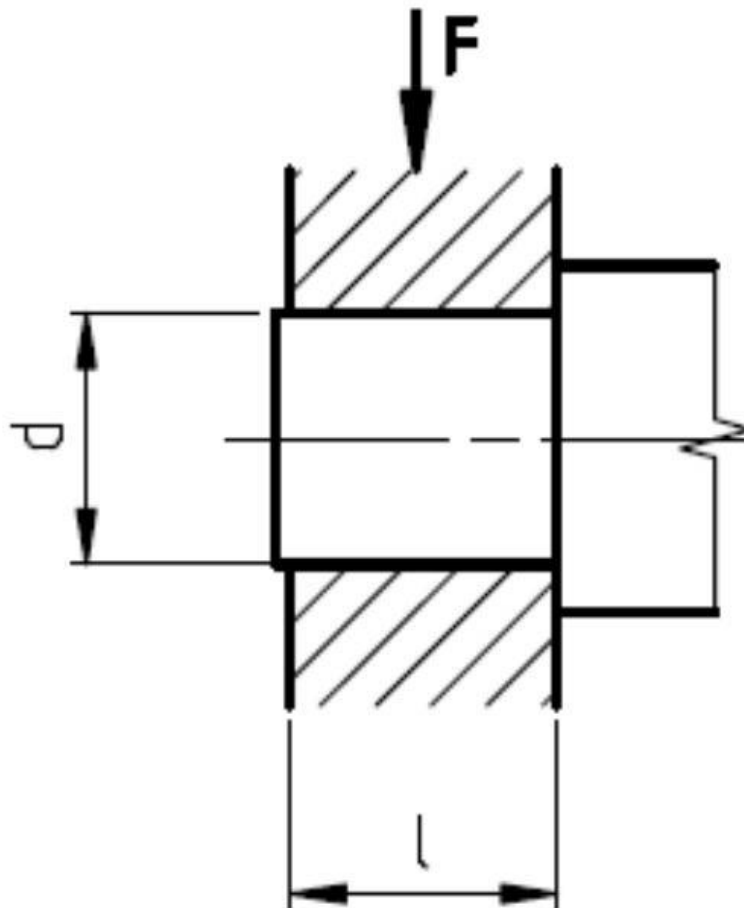
Obrázek 8.16 Spoj korunové kolo-skříň diferenciálu

Kontrola na otláčení

Porušení funkce šroubových, kolíkových, nýtových, perových a jiných spojů může nastat i v případě, kde napětí nepřekročí pevnost materiálu. Vlivem dynamického zatížení a chvění dochází u strojních součástí k otláčení jejich stykových ploch a tím k uvolnění spojení i ztrátě tuhosti a posléze k porušení. Abychom těmto následkům zamezili, musíme součásti kontrolovat, zda tlak ve stykových plochách nepřekročí dovolenou hodnotu. [9] Uvažujme stykovou plochu rovinného tvaru.

Kontrola na otláčení se počítá podle následujícího vzorce:

$$p = \frac{F}{S} = \frac{F}{d \cdot l} \leq p_D \quad (8.1)$$



Obrázek 8.17 Schéma kontrolы na otláčení [10]

Provedení kontroly na otláčení vložky, kde:

- Tlak ve stykových plochách p
- Dovolený tlak $p_D = 90 \text{ MPa}$
- Vstupní moment na diferenciál $M_k = 742 \text{ Nm} = 742\,000 \text{ Nmm}$
- Poloměr umístění vložek $r = 51 \text{ mm}$
- Síla na plochy F
- Vnější průměr vložky $D = 12 \text{ mm}$
- Funkční délka $l = 4 \text{ mm}$
- Počet vložek $i = 6$

$$p = \frac{\frac{M_k}{r}}{S \cdot i} = \frac{F}{D \cdot l \cdot i} \leq p_D \quad (8.2)$$

$$p = \frac{\frac{742\,000}{51}}{12 \cdot 4 \cdot 6} = 50,5 \text{ MPa} \leq 90 \text{ MPa}$$

$$k = \frac{p_D}{p} = \frac{90}{50,5} = 1,8 \quad (8.3)$$

Závitová vložka kontrole na otláčení **vyhovuje**.

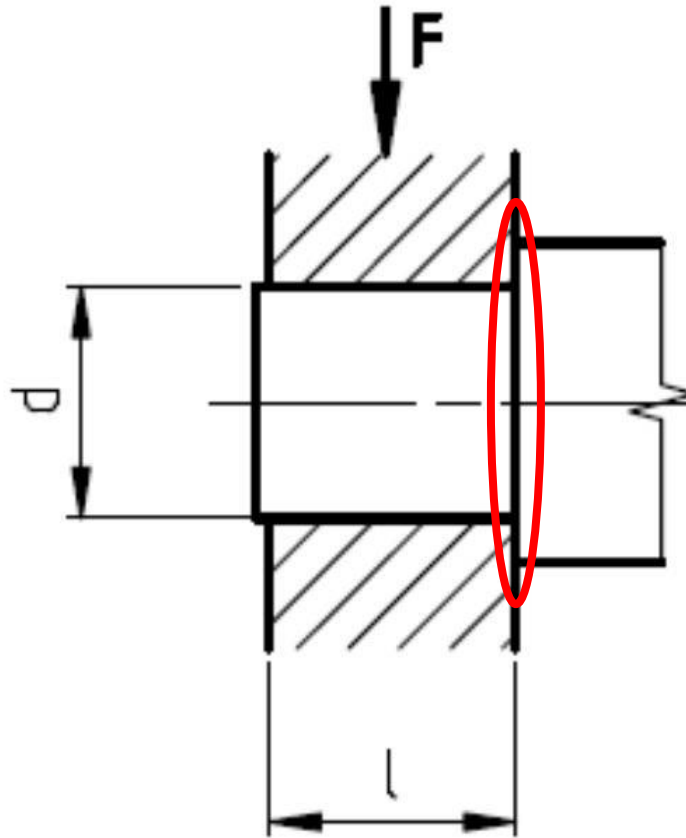
Kontrola na stříh

Kontrola na stříh je velice podobná kontrole na otláčení, jen počítáme jiný průřez. Viz obrázek 8.18 a rovnice 8.4 pro plný čep:

$$\tau = \frac{F}{S} = \frac{F}{\frac{\pi \cdot D^2}{4}} \leq \tau_D \quad (8.4)$$

A pro dutý čep:

$$\tau = \frac{F}{S} = \frac{F}{\frac{\pi \cdot (D^2 - d^2)}{4}} \leq \tau_D \quad (8.5)$$



Obrázek 8.18 Schéma kontroly na stříh [10]

Provedení kontroly na stříh vložky, kde:

- Smykové napětí ve stykových plochách τ
- Dovolené smykové napětí $\tau_D = 40 \text{ MPa}$
- Vstupní moment na diferenciál $M_k = 742 \text{ Nm} = 742\,000 \text{ Nmm}$
- Poloměr umístění vložek $r = 51 \text{ mm}$
- Síla na plochy F
- Vnější průměr vložky $D = 12 \text{ mm}$
- Vnitřní průměr vložky $d = 8 \text{ mm}$
- Počet vložek $i = 6$

$$\tau = \frac{M_k}{S \cdot i} = \frac{F}{\frac{\pi \cdot (D^2 - d^2)}{4} \cdot i} \leq \tau_D \quad (8.6)$$

$$\tau = \frac{\frac{742\,000}{51}}{\frac{\pi \cdot (12^2 - 8^2)}{4} \cdot 6} = 38,6 \text{ MPa} \leq 40 \text{ MPa}$$

$$k = \frac{\tau_D}{\tau} = \frac{40}{38,6} = 1,03 \quad (8.7)$$

Závitová vložka kontrole na střih **vyhovuje**, protože bude ještě vyplněná šroubem.

$$\tau = \frac{\frac{742\,000}{51}}{\frac{\pi \cdot 12^2}{4} \cdot 6} = 21,4 \text{ MPa} \leq 40 \text{ MPa}$$

$$k = \frac{\tau_D}{\tau} = \frac{40}{21,4} = 1,9 \quad (8.8)$$

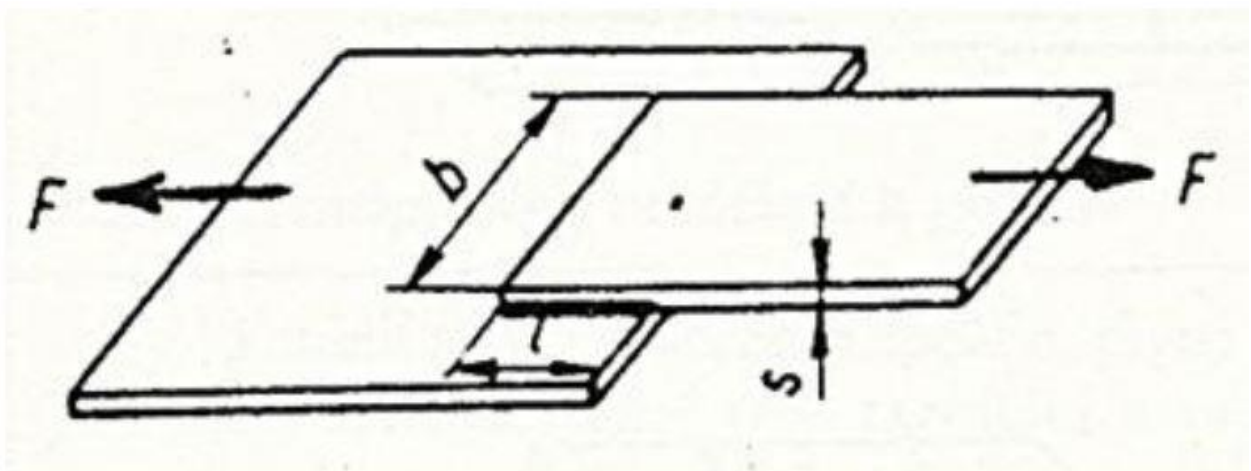
Po vyplnění šroubem vychází bezpečnost vyšší.

Kontrola na vytržení

Lepený spoj je uvažován pro namáhání pouze na smyk tzv. čistý smyk. Pro lepení kovových součástí uvažujeme $\tau_D = 25 \text{ MPa}$. Konkrétní hodnota je závislá na druhu použitého lepidla, čistotě spojovaných ploch, druhu lepeného spoje a podobně. [11]

Kontrola na vytržení se počítá podle následujícího vzorce:

$$\tau = \frac{F}{b \cdot l} = \frac{F}{\pi \cdot d \cdot l} \leq \tau_D \quad (8.9)$$



Obrázek 8.19 Schéma zatíženého lepeného spoje [11]

Provedení kontroly na vytržení vložky, kde:

- Smykové napětí ve stykových plochách τ
- Dovolené smykové napětí $\tau_{DL} = 25 \text{ MPa}$
- Počet vložek $i = 6$
- Síla od utahovacího momentu $F = 15\,242 \text{ N}$ [12]
- Vnější průměr vložky $D = 12 \text{ mm}$
- Funkční délka $l = 14 \text{ mm}$

$$\tau = \frac{F}{b \cdot l \cdot i} = \frac{F}{\pi \cdot D \cdot l \cdot i} \leq \tau_{DL} \quad (8.10)$$

$$\tau = \frac{15\,242}{\pi \cdot 12 \cdot 14 \cdot 6} = 4,8 \text{ MPa} \leq \tau_{DL}$$

$$k = \frac{\tau_D}{\tau} = \frac{25}{4,8} = 5,2 \quad (8.11)$$

Závitová vložka kontrole na vytržení **vyhovuje** s bezpečností 5,2, ale dá se předpokládat, že τ_{DL} bude nižší, protože tato hodnota je pro ideální podmínky povrchů a výroby.

9. Analýza tuhosti a pevnosti diferenciálu

Tato kapitola je zaměřena na tuhostní a pevnostní analýzu v MKP softwaru Abaqus [13]. Bude analyzována původní verze. Bude vytvořen návrhový výpočet skladby a výpočet detailních verzí kompozitních skříní s tím, že u kompozitního diferenciálu bude analyzována pouze kompozitní skříň s okrajovými podmínkami od korunového kola a zadní vložky opřené o ložisko. Zatížení bude uvažováno, jak bylo zmíněno výše, od korunového kola a od vnitřního ozubení.

9.1. Teorie analýzy diferenciálu

9.1.1. Teorie analýzy kovové verze

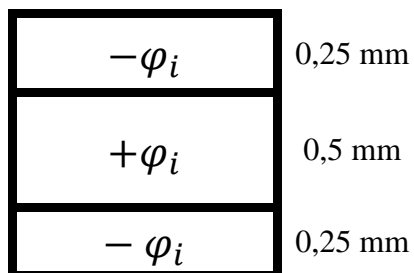
Při analýze původní kovové verze bude naimportován geometrický model dodaný zadávající firmou do programu Abaqus, kde bude výpočet probíhat. V tomto programu se pro přiřazení materiálových vlastností používají tzv. sekce (Abaqus - Sections), které definované části (nebo taky celé) součásti přiřazuje její materiál. Pro zadání materiálu pro kovovou verzi budou použity objemové sekce (Abaqus - solid sections), které se používají pro kovové (izotropní) součásti.

Pro modelování kovových částí byly použity čtyřuzlové objemové kvadratické prvky typu čtyřstěn (Abaqus – 3D stress C3D10), Ve srovnání s osmiuzlovými objemovými prvky typu šestistěn bývá uváděna horší aproximační schopnost, nicméně jejich výhodou je snadná tvorba sítě pro komplexní geometrii. Tyto prvky byly použity, protože kovová verze má tak komplexní geometrii, že dělení součásti pro vysíťování lepšími elementy by bylo složité.

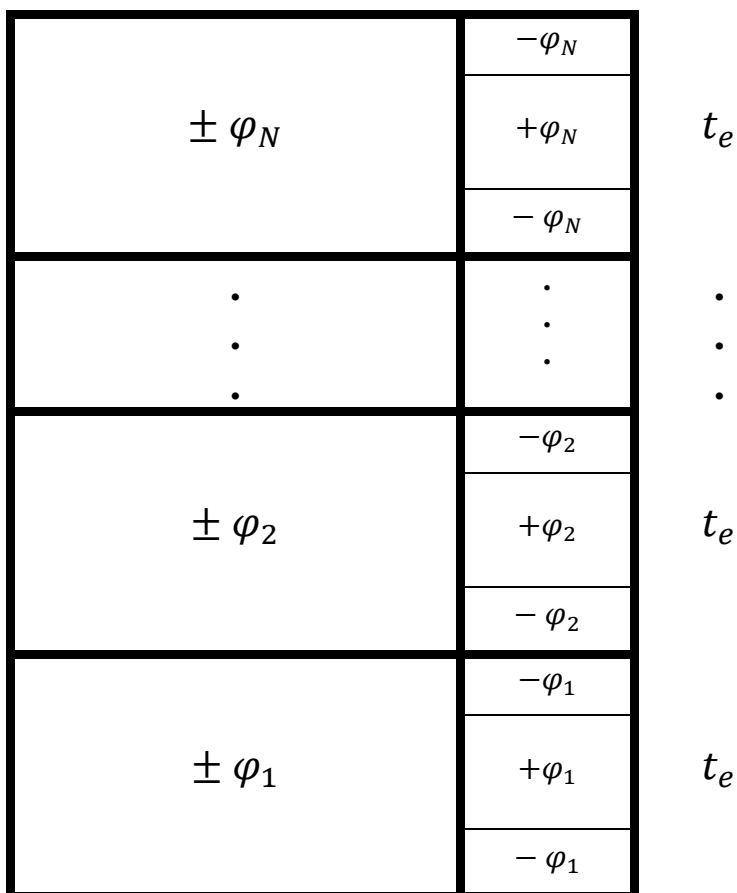
9.1.2. Teorie analýzy kompozitní verze

V této práci v souvislosti s vnitřní geometrií jsou používány tři výrazy:

- Lamina tj. vrstva jednoho úhlu (kladného nebo záporného) tlustá 0,25 mm nebo 0,5 mm v rámci jedné základní skladby
- Základní skladba je kombinace kladného a záporného úhlu (viz obrázek 9.1). Většinou ze dvou základních vrstev se skládá MKP vrstva
- MKP vrstva (viz text níže a obrázky 9.14 a 9.15)



Obrázek 9.1 Schéma základní skladby



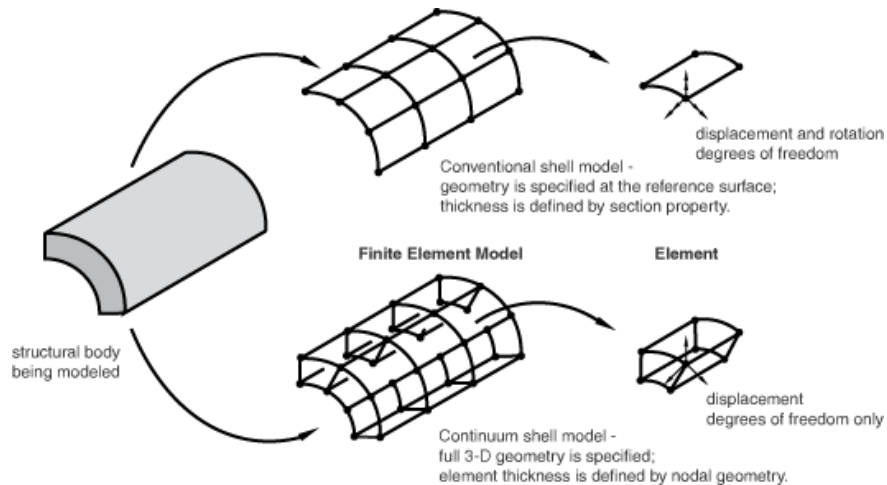
Obrázek 9.2 Schéma celkové skladby

Kompozitní součásti mají často tenkostěnný charakter, v těchto případech se pro MKP síť využívají skořepinové prvky.

Materiál se v této práci volí typ lamina (zástupce ortotropního materiálu v Abaqusu), kde se zadává podélný, příčný a smykový modul a Poissonovo číslo.

Pro modelování jednotlivých lamin v ohraničené části skříně se použijí skořepinové sekce, kde se definují jednotlivé laminy. Pro každou laminu se definuje materiál, úhel orientace vláken a absolutní tloušťka. Tato skořepinová sekce se následně přiřazuje ke skořepinovým prvkům.

Skořepinové prvky mohou být standardní, geometrie je definována obvykle střední plochou, tloušťka je parametrem prvku a tzv. objemové skořepiny, které z hlediska geometrie připomínají klasické objemové prvky. Konečněprvková síť u analýzy kompozitní verze bude tvořena osmiuzlovými objemovými skořepinovými lineárními prvky typu 6ti stěn (Abaqus – Continuum shell SC8R). Snahou je vytvoření jednoho elementu po tloušťce MKP vrstvy.



Obrázek 9.3 Rozdíl skořepinového a objemoskořepinového elementu [13]

Geometrický model skříně byl pro usnadnění síťování rozdělen na tzv. MKP vrstvy tlusté 2 mm. Pro tento geometrický model proběhnou celkem 2 analýzy. První pro návrh orientace vláken a pak pro návrh detailní kompozitní skladby. Pro první analýzu byly sekce voleny jako zjednodušené. To znamená, že na každou MKP vrstvu tlustou 2 mm připadala pouze jedna hodnota (kladná nebo záporná) zkoumaného úhlu. Pro detailní návrh byly sekce zadány podle postupu a metody výroby.

9.2. Tuhostní analýza původní kovové verze

Nejdříve je třeba provést tuhostní MKP analýzu původní verze pro porovnání, v jakých hodnotách se posuv řádově při výše zmíněném zatížení pohybuje. Původní verze se skládá ze tří částí korunového kola, přední a zadní části. Přední a zadní část je z litiny (GCD450) a korunové kolo je z ocele (SMC420), všechny tři části jsou smontovány pomocí šroubů.

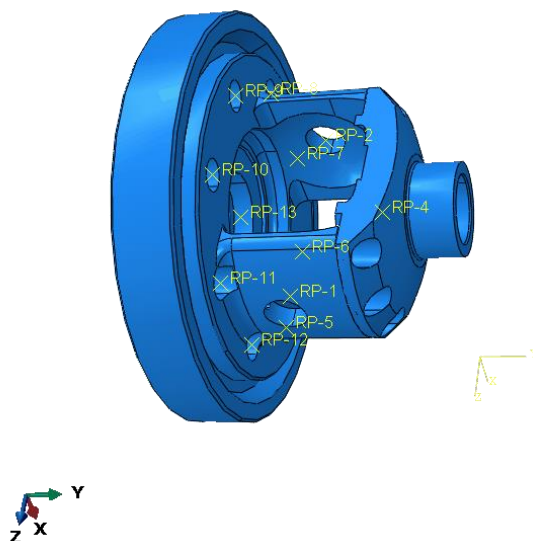
9.2.1. Materiál a vytvoření sestavy

Materiálové vlastnosti byly zadány dle tabulky níže s tím, že korunové kolo je z ocele (SMC420) a zbytek je z litiny (GCD450).

Tabulka 9.1 Materiálové vlastnosti stávajícího diferenciálu

| | <i>Hustota</i> | <i>Youngův modul pružnosti</i> | <i>Poissonovo číslo</i> |
|--------|-------------------|--------------------------------|-------------------------|
| | P | E | v |
| | kg/m ³ | MPa | - |
| GCD450 | 7900 | 170000 | 0,29 |
| SMC420 | 7850 | 210000 | 0,3 |

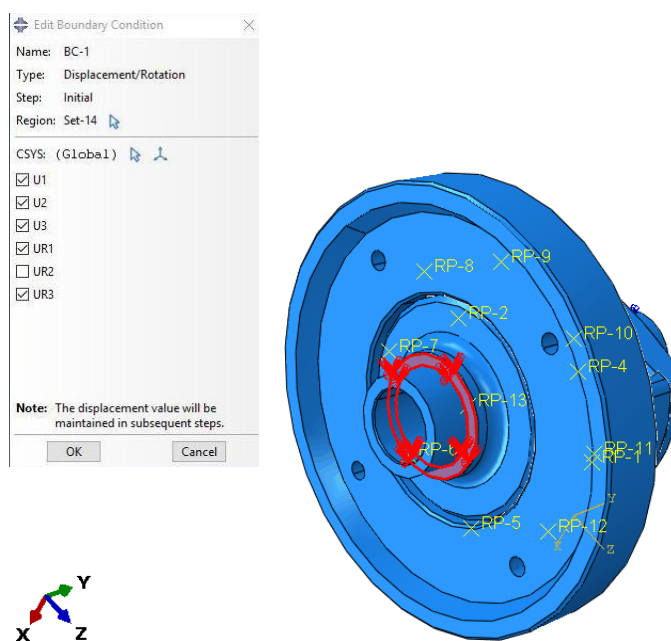
Jednotlivé části byly zkombinovány do sestavy a spojeny pomocí vazby typu slepení (Abaqus – vazba Tie). A byly vytvořeny referenční body v osách děr pro vnitřní ozubení a na uchycení korunového kola, které byly pomocí vazeb (Abaqus – coupling) svázány s jim náležícími povrchy.



Obrázek 9.4 Výpočtová sestava původního diferenciálu

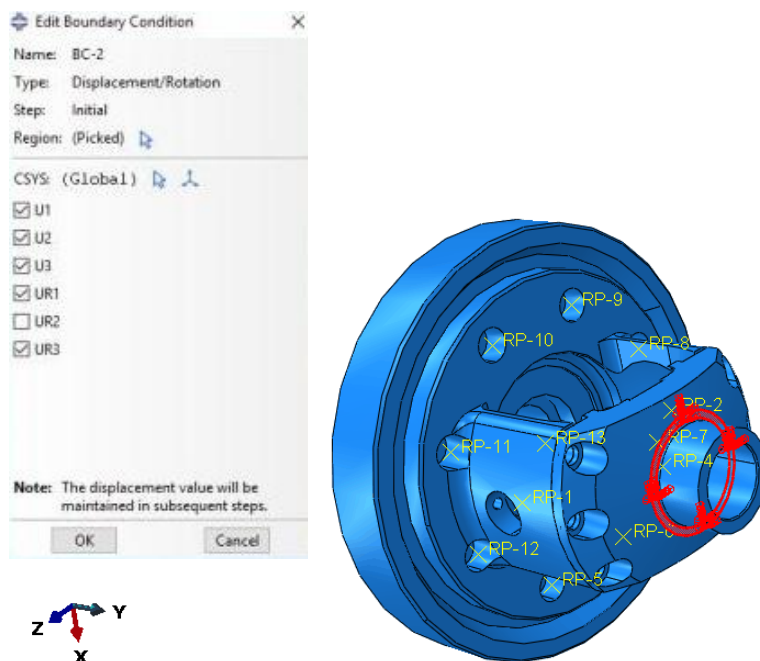
9.2.2. Kinematické a silové okrajové podmínky

Kinematické okrajové podmínky byly stanoveny podle uložení přední a zadní části v axiálně radiálních ložiscích. První okrajová podmínka BC-1 je určena pod předním ložiskem. Vzhledem k ložisku jsou zakázány posuvy ve všech směrech a rotace kolem X-ové a Z-ové osy.



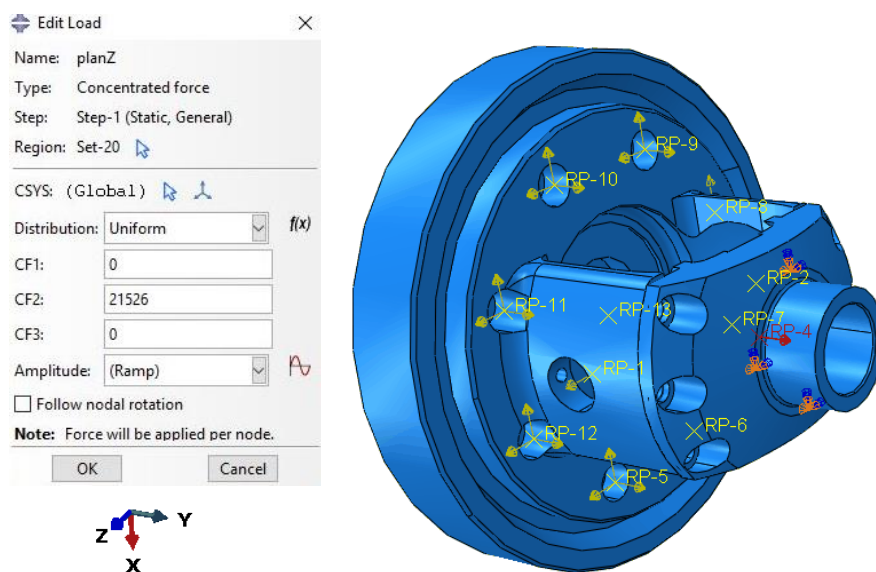
Obrázek 9.5 BC-1

Druhá kinematická okrajová podmínka BC-2 je určena pro uložení pod zadním ložiskem. Opět kvůli ložisku jsou zakázány posuvy všech ve směrech a rotace kolem X-ové a Z-ové osy.

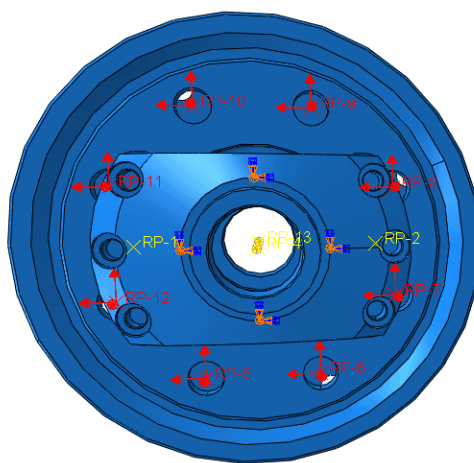
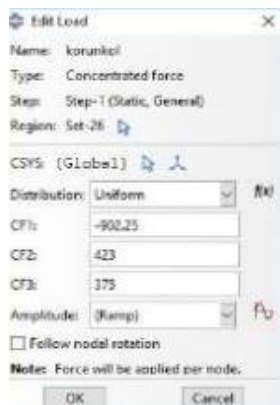


Obrázek 9.6 BC-2

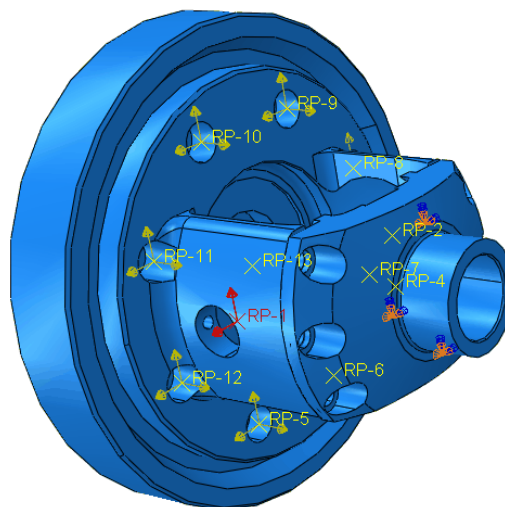
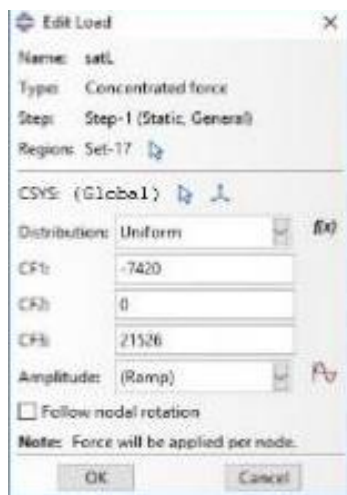
Síly byly vloženy do referenčních bodů, které byly svázané se svými povrchy pomocí vazeb (Abaqus – coupling), podle výpočtů v kapitole 7.2. viz obrázky 9.4, 5., 6.



Obrázek 9.7 Zadání síly místo zadní planety



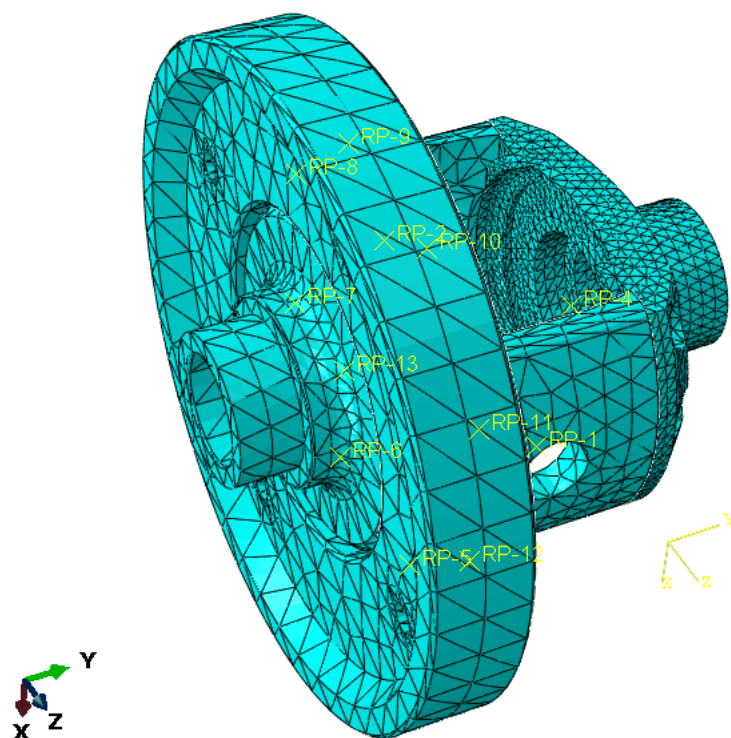
Obrázek 9.8 Zadání síly místo korunového kola



Obrázek 9.9 Zadání síly místo pravého satelitu

9.2.3. Síťování

Jak bylo zmíněno v kapitole 9.1.1. sestava byla vysítována pouze čtyřuzlovými objemovými lineárními elementy typu čtyřstěn (Abaqus – 3D stress C3D10).



Obrázek 9.10 Vysíťování sestavy původního diferenciálu

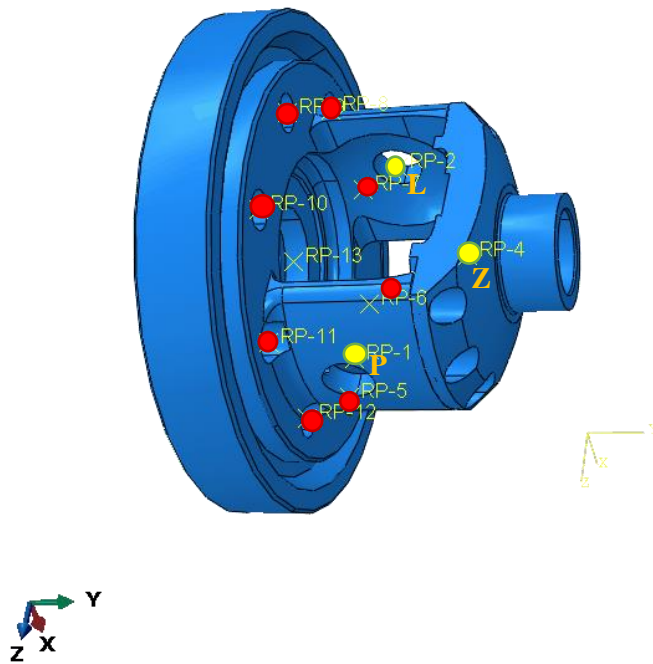
9.2.4. Výsledky

V tabulce 9.2 lze vidět výsledné součty všech 3 složek vektorů posuvů pro původní verzi. Největší posuv je na pravém satelitu 58,7 μm . Na obrázku 9.8 lze vidět znázornění jednotlivých referenčních bodů, znázorňujících osy loží pro kola (červené korunové kolo a žluté vnitřní soukolí)

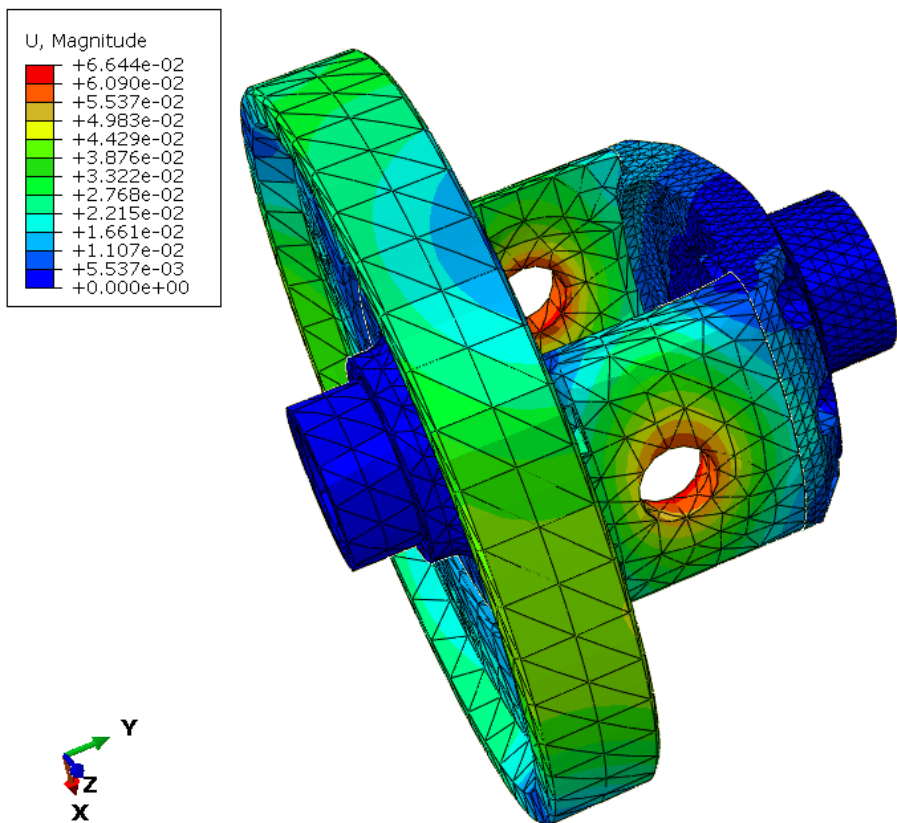
Na dalších obrázcích v této podkapitole lze vidět obrázek průběhu napětí podle Misese a obrázek průběhu celkové deformace.

Tabulka 9.2 Výsledná celková deformace os vnitřních ozubených kol a korunového kola

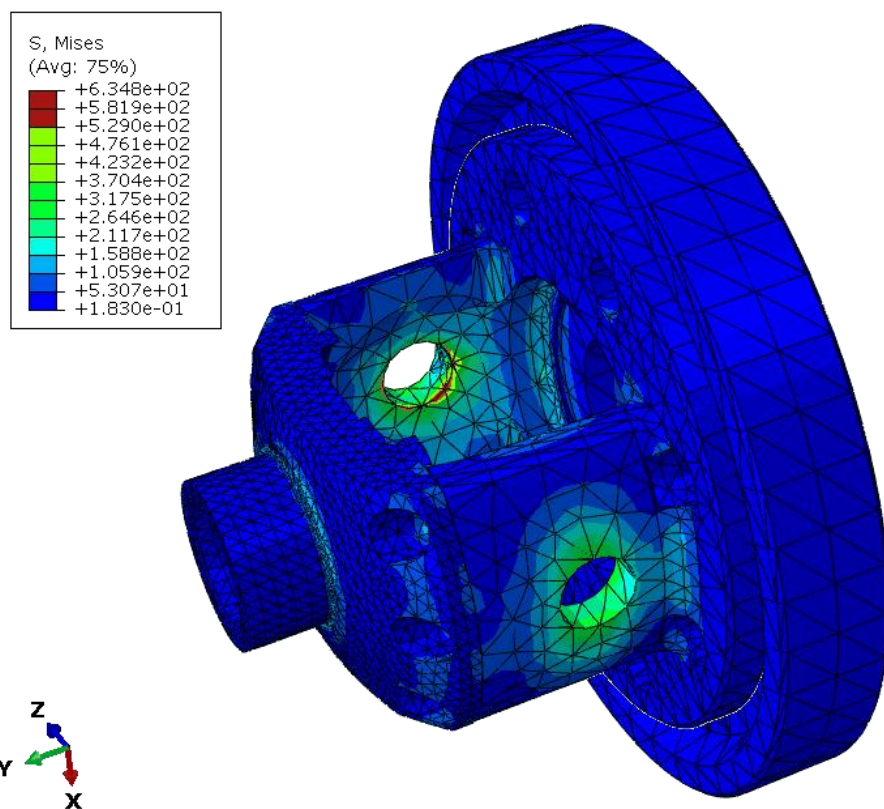
| Verze | Celková deformace osy [μm] | | | |
|----------------------------|---|-------------------|-------------------------------|-------------------|
| | Levý satelit (L) | Pravý satelit (P) | Korunové kolo (červené tečky) | Zadní planeta (Z) |
| Původní verze diferenciálu | 53,9 | 58,7 | 2,7 | 5,6 |



Obrázek 9.11 Znáznornění referenčních bodů u původní kovové verze



Obrázek 9.12 Průběh deformace na původní verzi diferenciálu



Obrázek 9.13 Průběh napětí na původní verzi diferenciálu

9.3. Návrhové výpočty pro volbu orientace vláken a tuhostní analýza

Před detailní analýzou bude vytvořen návrhový výpočet pro volbu orientace vláken. Bude hledána zjednodušená skladba, kdy bude skříň nejtužší. Nejdříve dojde k rozdělení skříňe na jednotlivé vrstvy s konstantní tloušťkou. Poté bude každé vrstvě přidělen kladný nebo záporný úhel. Úhly budu volit od 20° do 75°.

9.3.1. Volba materiálu

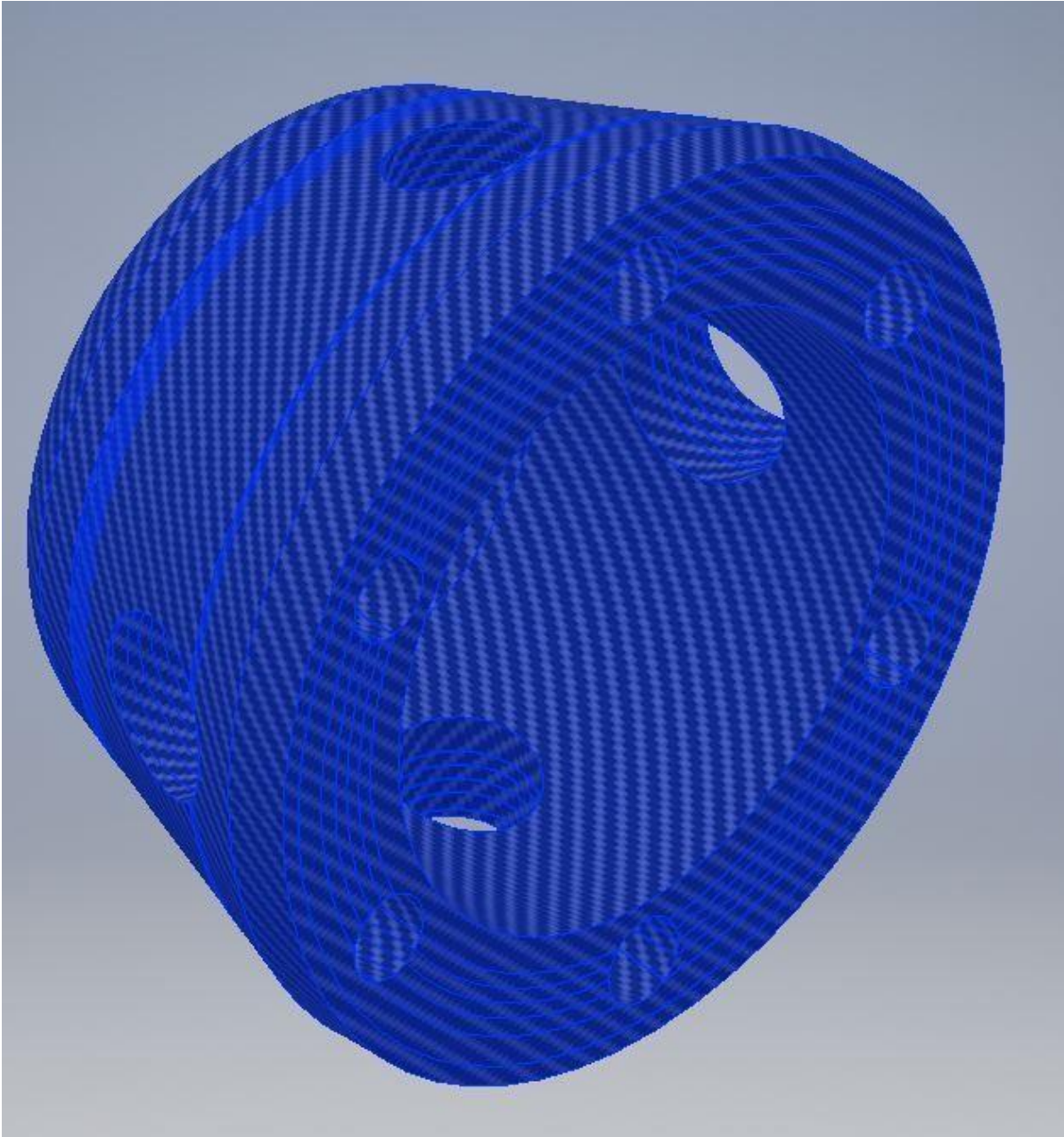
Po konzultaci s firmou Compotech bylo rozhodnuto, že na výrobu skříňe bude použito uhlíkové vlákno UHM s objemovým poměrem 45%. Niže v tabulce 9.3 lze vidět jeho vlastnosti a vlastnosti celého kompozitu.

Tabulka 9.3 Materiálové vlastnosti vlákna a kompozitu

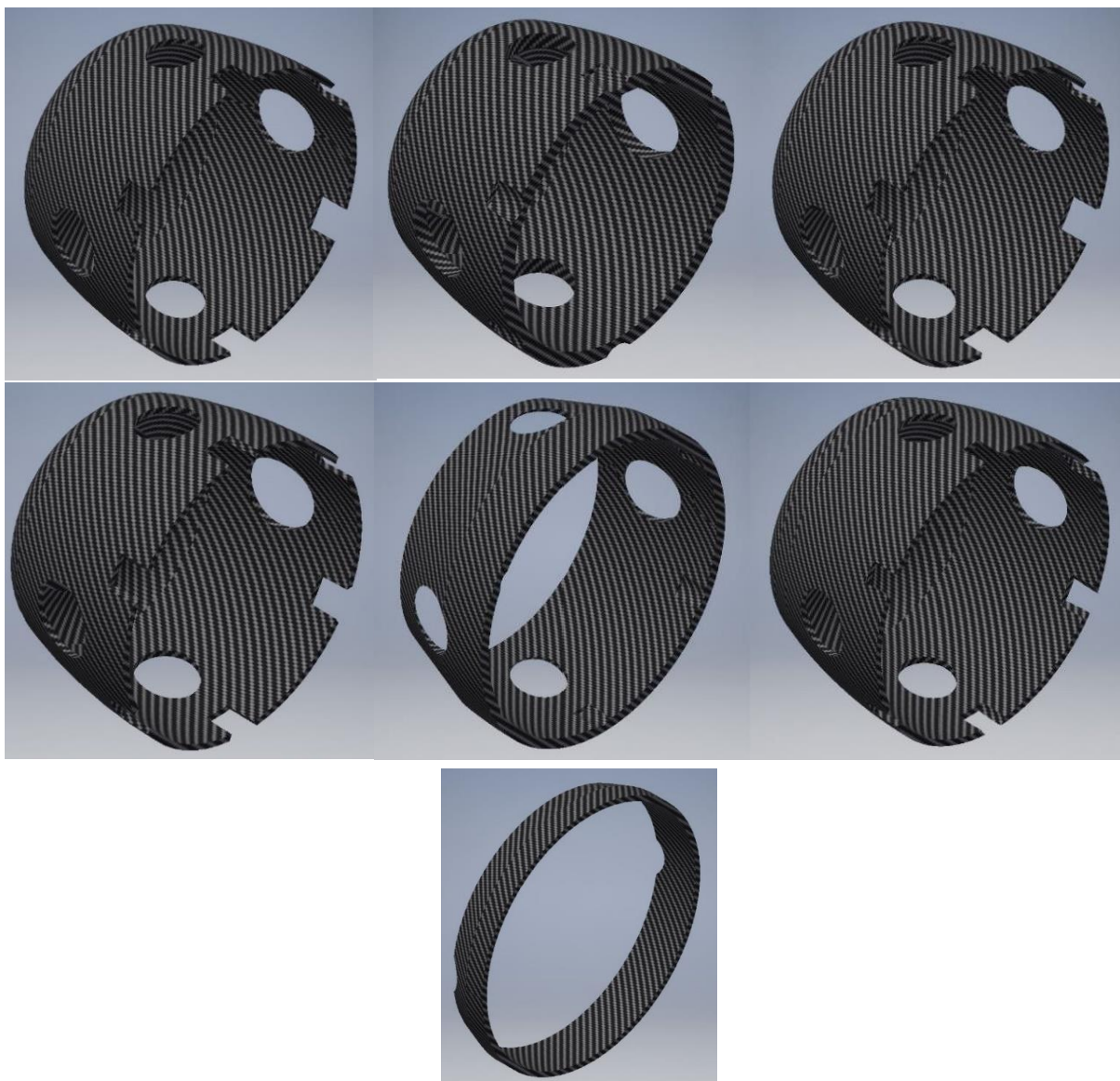
| | <i>Hustota</i> | <i>Podélný modul pružnosti</i> | <i>Příčný modul pružnosti</i> | <i>Modul pružnosti ve smyku</i> | <i>Poissonovo číslo</i> | <i>Koeficient teplotní roztažnosti</i> |
|----------|-------------------|--------------------------------|-------------------------------|---------------------------------|-------------------------|--|
| | ρ_f | E_{fL} | E_{fT} | G_f | ν_f | α_f |
| | kg/m ³ | MPa | MPa | MPa | - | K ⁻¹ |
| Vlákno | 2156 | 779000 | 5000 | 20000 | 0,35 | -1,5E-06 |
| Kompozit | 1598 | 352650 | 4100 | 4179 | 0,37 | |

9.3.2. Vytvoření vrstev a následné dělení skříňe

S ohledem na tvorbu sítě byl geometrický model skříňe diferenciálu rozřezán na 7 tzv. MKP vrstev, ale kvůli složité geometrii (vpředu díry pro závitové vložky) pouze 5 z nich je tlustých přibližně 2 mm a dvě jsou přibližně 5 mm.

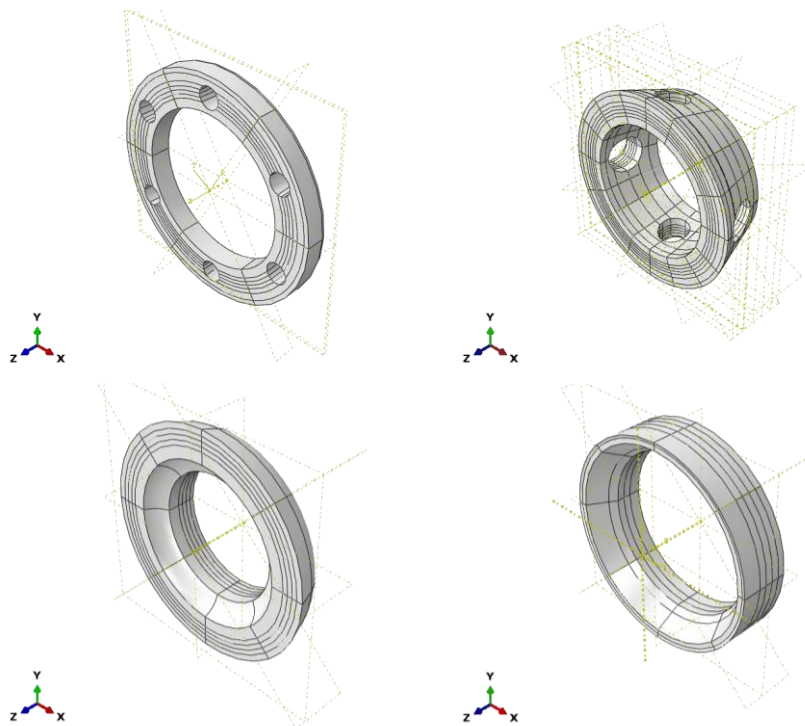


Obrázek 9.14 Sestava z jednotlivých vrstev skříně



Obrázek 9.15 Jednotlivé vrstvy skříně po rozřezání

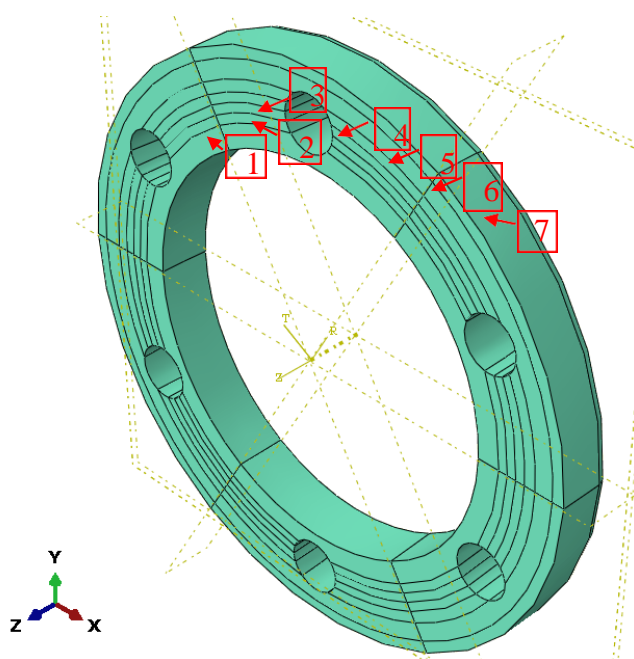
Tento geometrický model byl importován do výpočetního programu Abaqus tak, aby byla vytvořena sestava, ale byly zachovány hrany jednotlivých vrstev. Poté byl tento model znovu dělen na 4 části opět pro zjednodušení při síťování.



Obrázek 9.16 Jednotlivé části v Abaqus

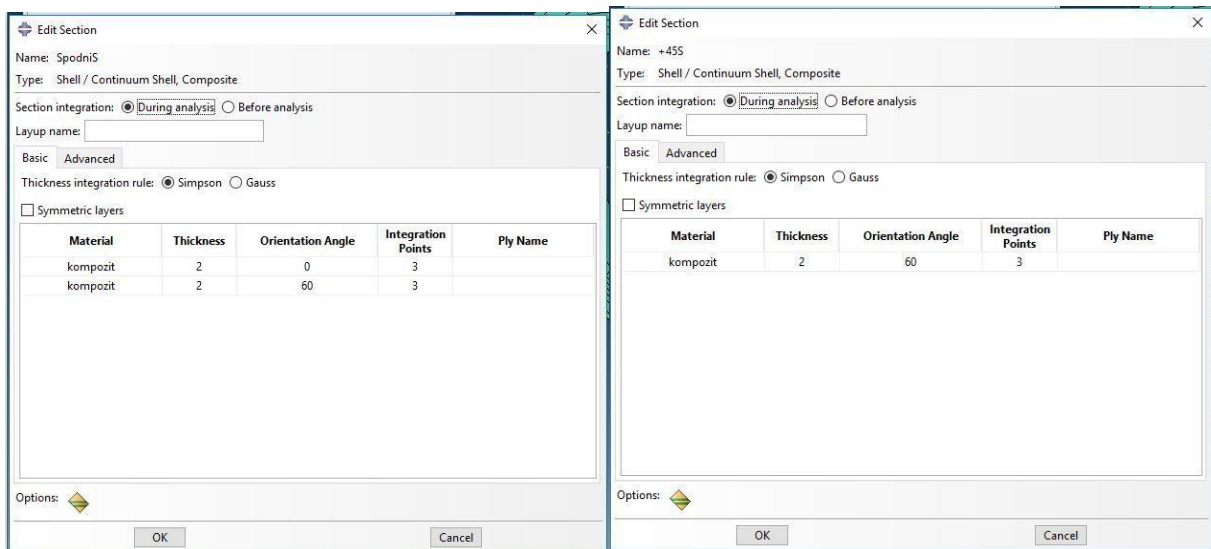
9.3.3. Přiřazení vlastností a orientace vláken

Bylo vytvořeno 5 zjednodušených skořepinových sekcí (Abaqus – shell sections), viz obrázek 9.15, které byly postupně dle obrázku 9.14 přiřazeny jednotlivým vrstvám.



| Číslo | Jméno sekce | Tloušťka [mm] |
|-------|-------------|---------------|
| 1 | ObalS | 2,4 |
| 2 | +S | 4 |
| 3 | +S | 2,4 |
| 4 | -S | 2 |
| 5 | +S | 2 |
| 6 | -S | 2 |
| 7 | SpodniS | 5 |

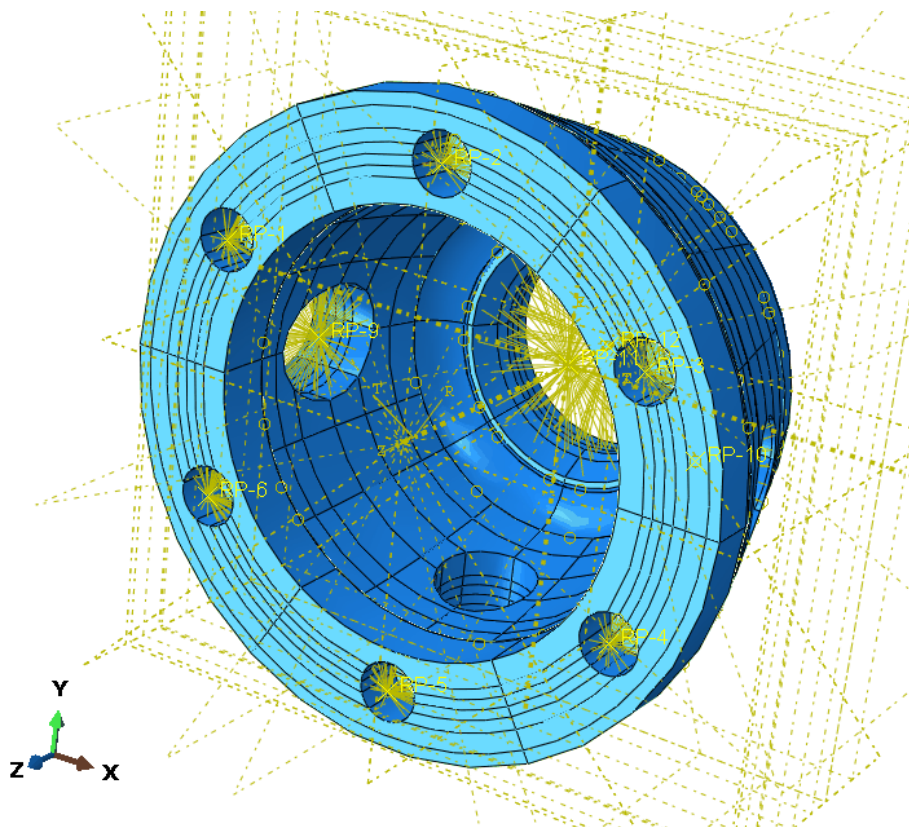
Obrázek 9.17 Přiřazení zjednodušených sectionů jednotlivým vrstvám na části jménem Přední



Obrázek 9.18 Příklady zjednodušených sekci

9.3.4. Vytvoření sestavy

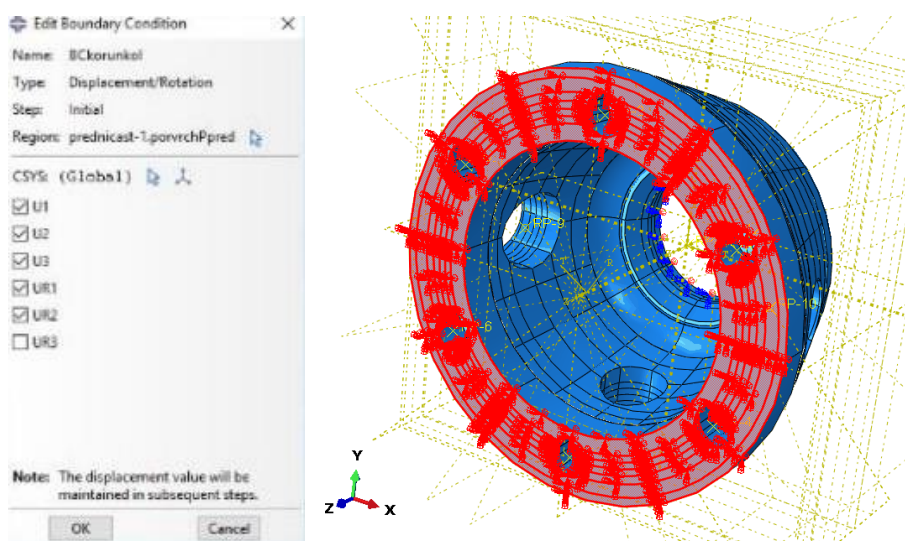
Pomocí vazby typu spleení (Abaqus – vazba Tie) byly spojeny všechny 4 části skříně. Dále byly vytvořeny referenční body v osách děr pro vnitřní ozubení a na uchycení koronového kola, které byly pomocí vazeb (Abaqus – vazba coupling) svázány s jim náležícími povrchy.



Obrázek 9.19 Sestava skříně s couplingy

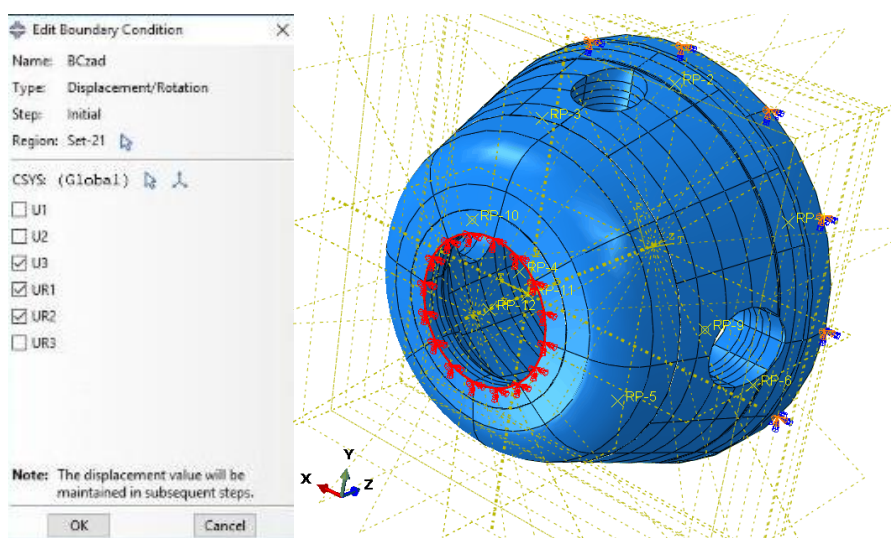
9.3.5. Přřazení kinematických a silových okrajových podmínek

Kinematické okrajové podmínky byly stanoveny podle uložení přední a zadní části v axiálně radiálních ložiscích. První okrajová podmínka BCkorunkol je určena pod korunovým kolem. Vzhledem ke korunovému kolu jsou zakázány posuvy ve všech směrech a rotace kolem X-ové a Y-ové osy.



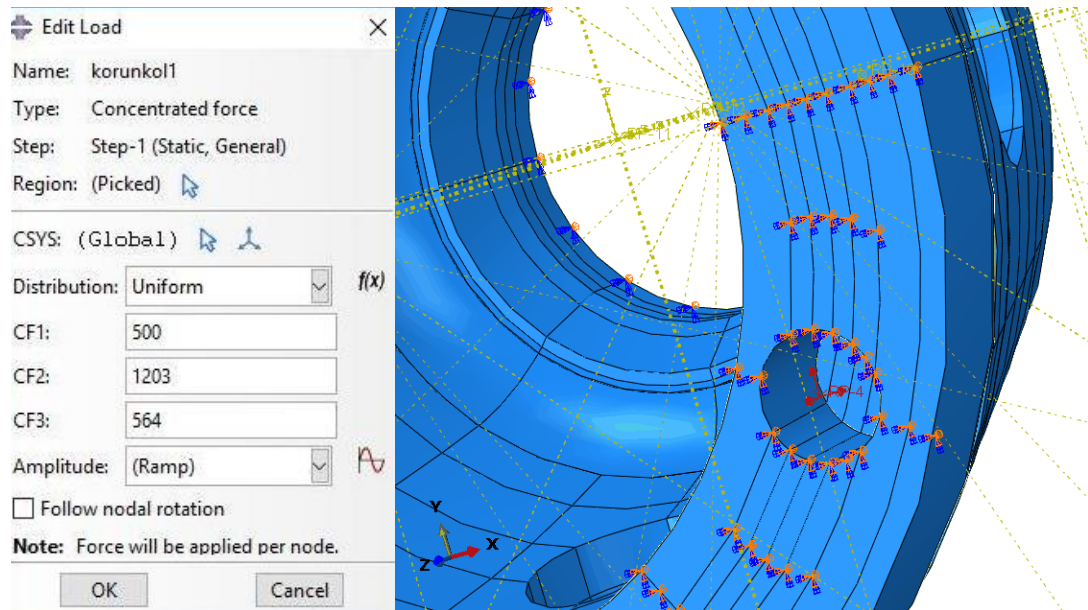
Obrázek 9.20 BCkorunkol

Druhá okrajová podmínka BCzad je určena pro uložení zadní vložky pod zadním ložiskem. Kvůli ložisku jsou zakázány posuvy ve všech směrech a rotace kolem X-ové a Y-ové osy.

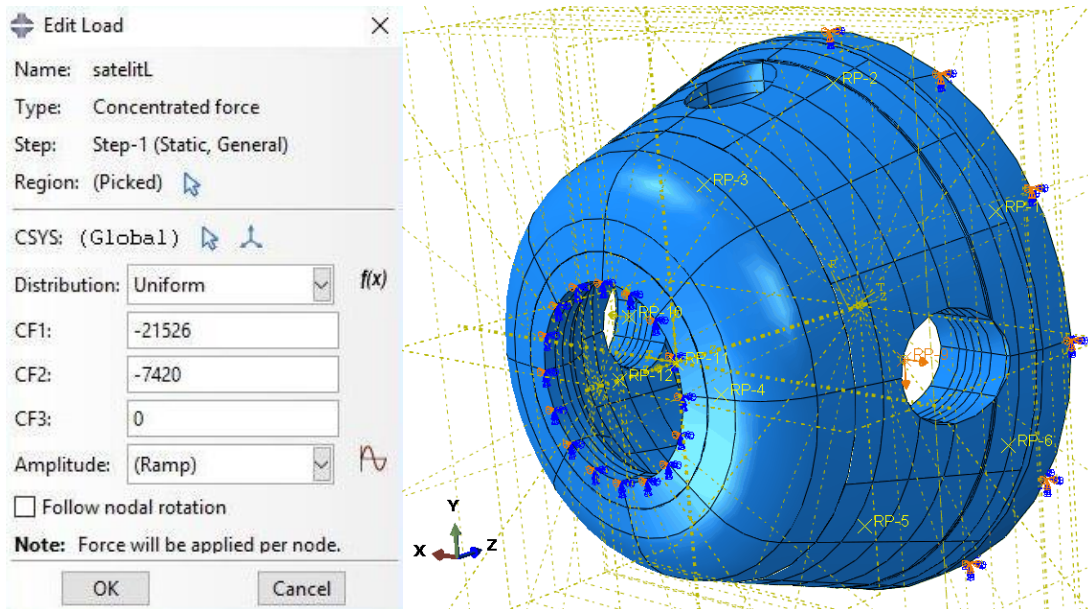


Obrázek 9.21 BCzad

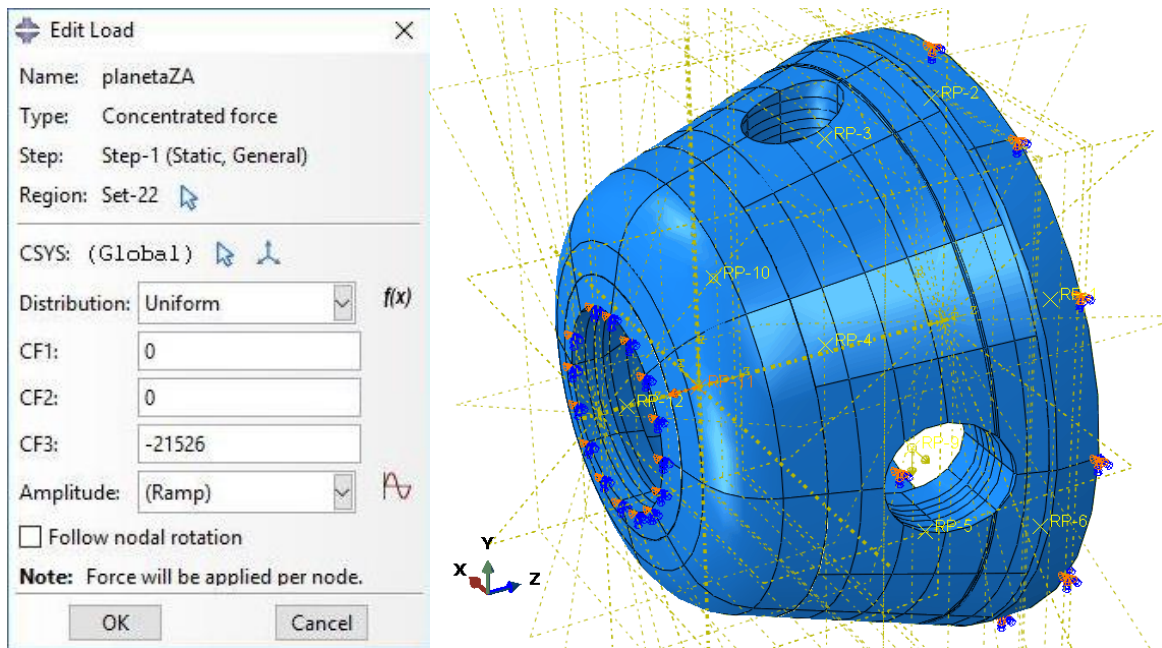
Silové okrajové podmínky byly vloženy do referenčních bodů, které byly svázány se svými povrchy pomocí vazeb (Abaqus – vazba coupling), podle výpočtů v kapitole 7.2. viz obrázek 9.18, 19, 20.



Obrázek 9.22 Vložení od korunového kola



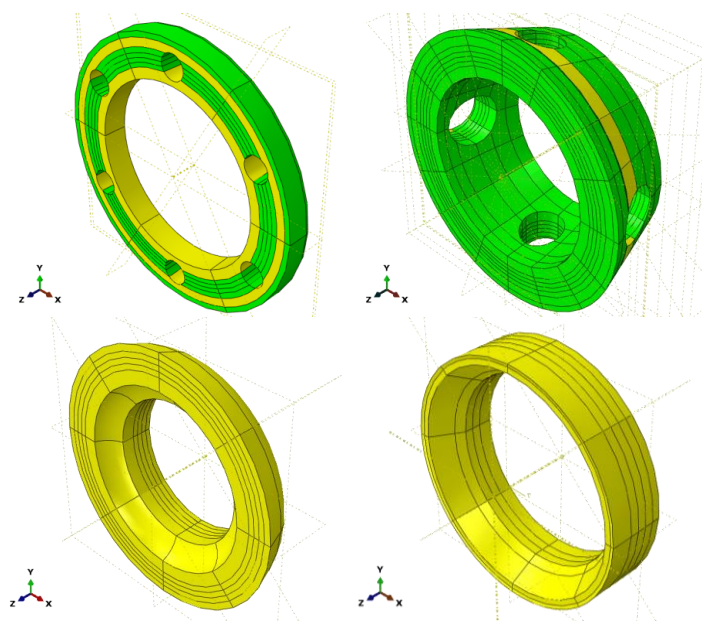
Obrázek 9.23 Vložení od Levého satelitu



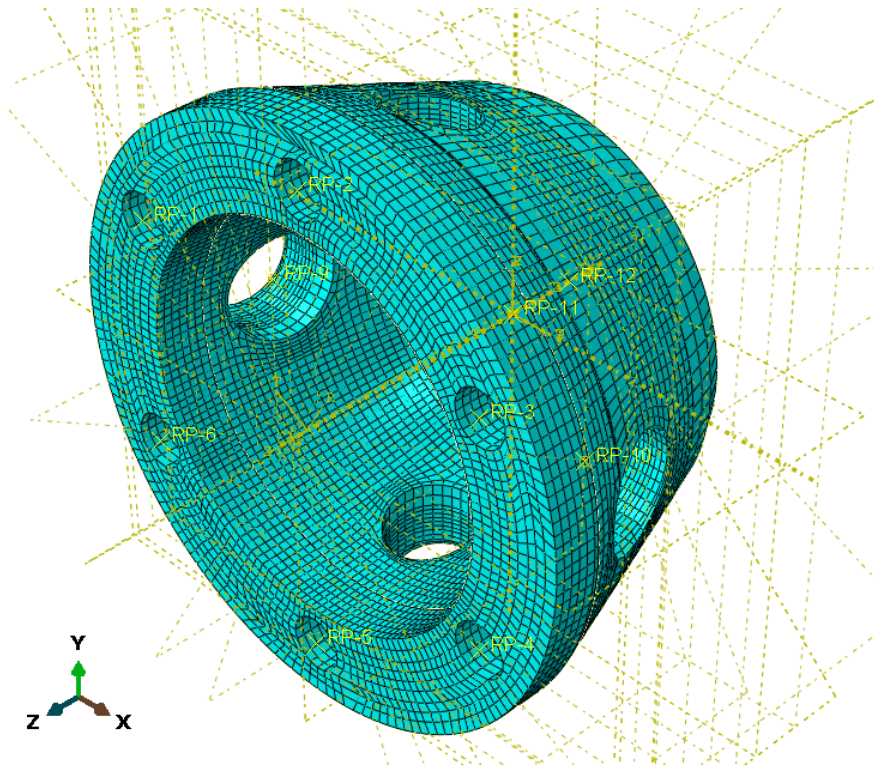
Obrázek 9.24 Vložení od zadní planety

9.3.6. Síťování

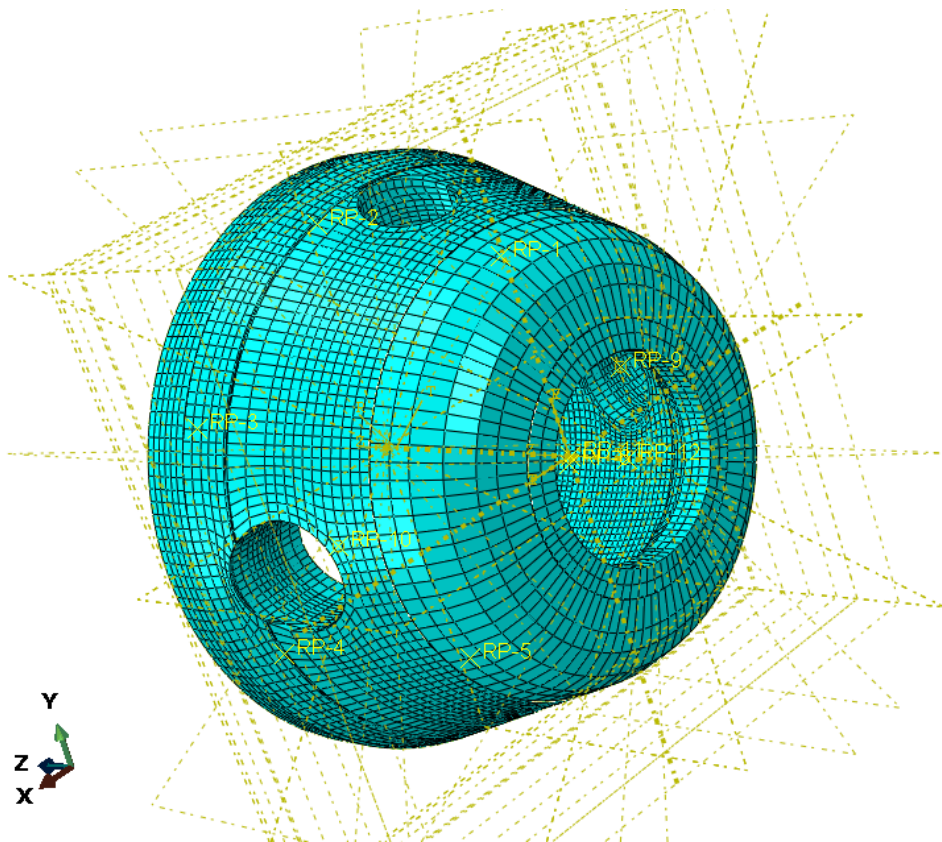
Pro dosažení co nejkvalitnější sítě byly jednotlivé části dále děleny. Jak bylo popsáno v kapitole 9.1.2. z hlediska simulace kompozitu je nutno použít osmiuzlové objemové skořepinové elementy typu šesti stěn (Abaqus – Continuum shell SC8R). Na obrázku 9.22 lze vidět, jaké síťovací techniky byly použity. Žlutá - síť vytvořena vytažením (Abaqus – Sweep) a Zelená – strukturální síť vytvořena na základě tvaru součásti (Abaqus – Structured).



Obrázek 9.25 Volba síťovacích mechanismů



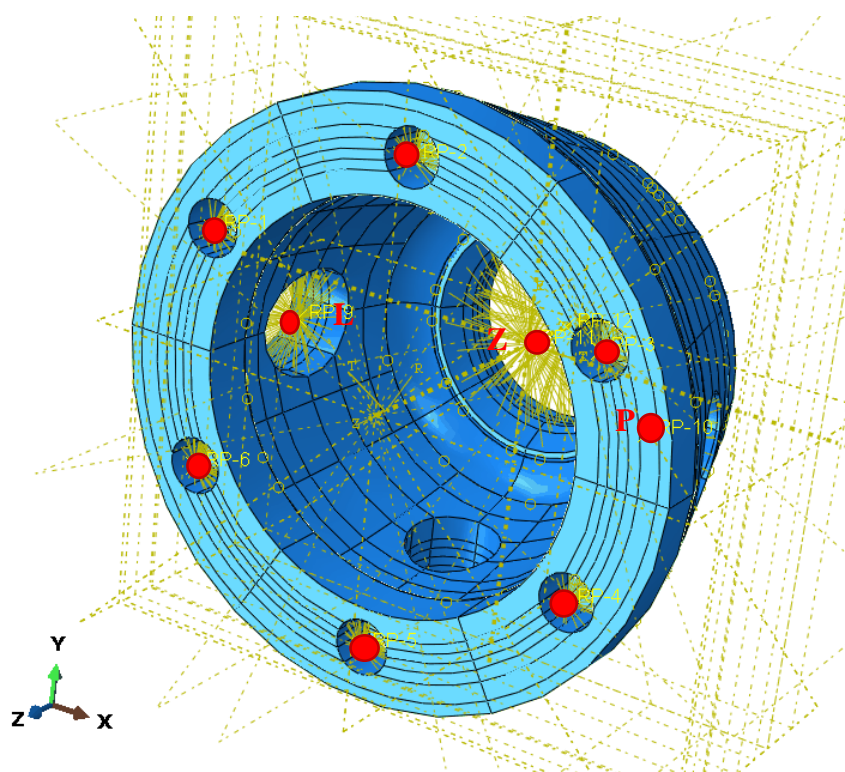
Obrázek 9.26 Volba sítě pohled zepředu



Obrázek 9.27 Volba sítě pohled zezadu

9.3.7. Výsledky

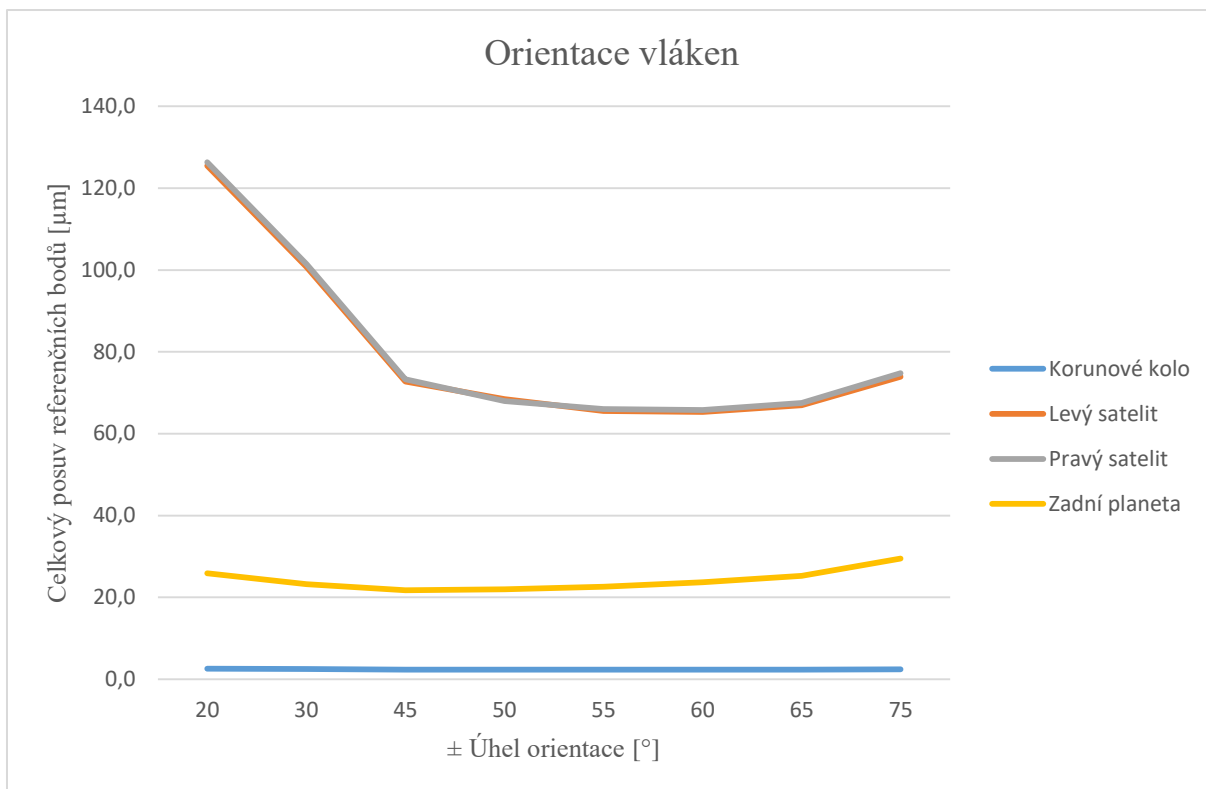
Orientace vláken byla ve zjednodušených sekcích měněna od $\pm 20^\circ$ do $\pm 75^\circ$ podle tabulky dole. Tabulka také obsahuje jednotlivé celkové posuvy os kol (červené body L, P, Z na obrázku 9.24) a průměr celkového posuvu v dírách pod korunovým kolem (červené body na obrázku 9.24).



Obrázek 9.28 Znáznornění referenčních bodů zjednodušené verze

Tabulka 9.4 Volba úhlu orientace vláken a jeho velikost deformace os

| Název verze | Orientace v sekci [°] | | | | | | | | | Celkový posuv [μm] | | | |
|-------------------------|-----------------------|----|-----|----|-----|----|-----|----|---|---------------------------------|------------------|-------------------|-------------------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | Korunové kolo (červené tečky) | Levý satelit (L) | Pravý satelit (P) | Zadní planeta (Z) |
| Kompozit $\pm 20^\circ$ | 0 | 20 | -20 | 20 | -20 | 20 | -20 | 20 | 0 | 2,6 | 125,5 | 126,3 | 25,9 |
| Kompozit $\pm 30^\circ$ | 0 | 30 | -30 | 30 | -30 | 30 | -30 | 30 | 0 | 2,5 | 100,7 | 101,5 | 23,2 |
| Kompozit $\pm 45^\circ$ | 0 | 45 | -45 | 45 | -45 | 45 | -45 | 45 | 0 | 2,4 | 72,7 | 73,3 | 21,8 |
| Kompozit $\pm 50^\circ$ | 0 | 50 | -50 | 50 | -50 | 50 | -50 | 50 | 0 | 2,4 | 68,5 | 68,0 | 22,0 |
| Kompozit $\pm 55^\circ$ | 0 | 55 | -55 | 55 | -55 | 55 | -55 | 55 | 0 | 2,3 | 65,5 | 66,0 | 22,6 |
| Kompozit $\pm 60^\circ$ | 0 | 60 | -60 | 60 | -60 | 60 | -60 | 60 | 0 | 2,3 | 65,3 | 65,8 | 23,7 |
| Kompozit $\pm 65^\circ$ | 0 | 65 | -65 | 65 | -65 | 65 | -65 | 65 | 0 | 2,4 | 66,9 | 67,5 | 25,3 |
| Kompozit $\pm 75^\circ$ | 0 | 75 | -75 | 75 | -75 | 75 | -75 | 75 | 0 | 2,4 | 74,0 | 74,7 | 29,5 |



Graf 9.1 Volba úhlů orientace vláken a jeho velikost deformace os

Podle grafu 9.1 nejlepší zjednodušenou orientací pro výrobu skříně je $\pm 60^\circ$. To bude uvažováno v další kapitole při vytváření detailnějších sekcí skříně. Také je nutno si povšimnout, že Kompozit $\pm 60^\circ$ se blíží tuhostí kovové verzi viz tabulka 9.5.

Tabulka 9.5 Porovnání Kompozitové a kovové verze

| Verze | Celková deformace [μm] | | | |
|---|------------------------|-------------------|-------------------------------|-------------------|
| | Levý satelit (L) | Pravý satelit (P) | Korunové kolo (červené tečky) | Zadní planeta (Z) |
| Kompozit $\pm 60^\circ$ | 65,3 | 65,8 | 2,3 | 23,7 |
| Ocelovo-litinová | 53,9 | 58,7 | 2,7 | 5,6 |
| Rozdíl Kompozit - kov [%] | 21,1 | 12,1 | 13,8 | 322,8 |

9.4. Tuhostní a pevnostní analýza kompozitní skříně s detailní orientací

Tato kapitola se bude týkat výpočtu variant skříní s detailní skladbou, ze kterých se vybere ta nejužší verze. Tuhostní a pevnostní analýza bude probíhat opět v programu Abaqus.

9.4.1. Volba materiálu a vytvoření vrstev a následné dělení skříně

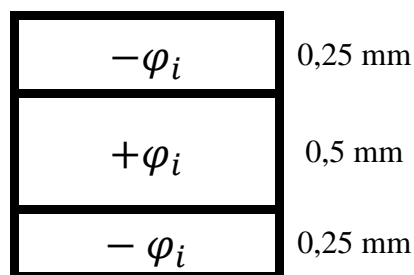
V této části bylo využito výsledků z kapitoly 9.2.2.. Materiál byl volen také stejný jako v kapitole 9.2.1. UHM s objemovým poměrem 45%.

Tabulka 9.6 Volený materiál pro výpočet detailní sekce

| | <i>Hustota</i> | <i>Podélný modul pružnosti</i> | <i>Příčný modul pružnosti</i> | <i>Modul pružnosti ve smyku</i> | <i>Poissonovo číslo</i> | <i>Koeficient teplotní roztažnosti</i> |
|----------|-------------------|--------------------------------|-------------------------------|---------------------------------|-------------------------|--|
| | ρ_f | E_{fL} | E_{fT} | G_f | ν_f | α_f |
| | kg/m ³ | MPa | MPa | MPa | - | K ⁻¹ |
| Vláknno | 2156 | 779000 | 5000 | 20000 | 0,35 | -1,5E-06 |
| Kompozit | 1598 | 352650 | 4100 | 4179 | 0,37 | |

9.4.2. Přřazení vlastností a orientace vláken

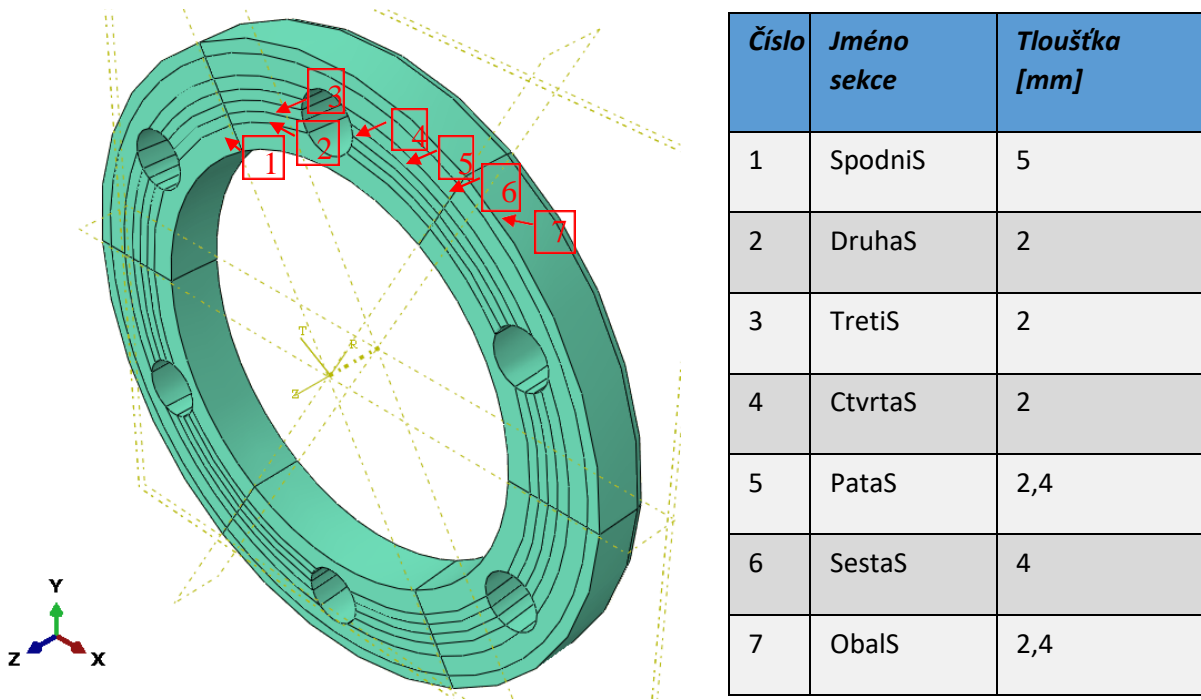
Detailní skladba (dále zmiňované také jako DS) bude po konzultaci s firmou Compotech volena jako kombinace tří úhlů: 30°, 45°, 60°. S tím že každá 1 mm základní skladba bude obsahovat pouze jeden úhel (laminu) s distribucí podle obrázku 9.26, viz kapitola 9.1.2..



Obrázek 9.29 Rozvrstvení úhlů v základní skladbě

Bylo vytvořeno 8 variant, které můžete vidět v příloze 7. Čtyři z těchto verzí mají místo doporučeného úhlu 45° úhel 50°, jelikož se v předchozí kapitole ukázalo, že je nosnější pro tento konkrétní typ zatížení.

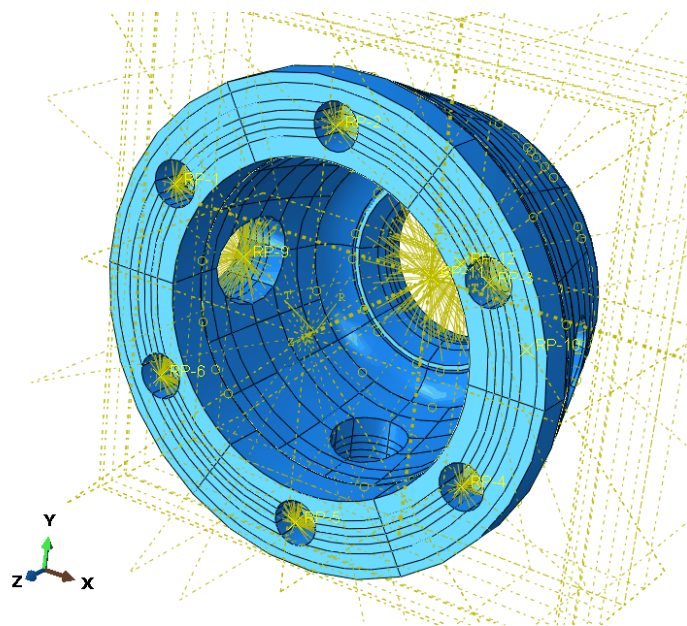
Pro každou verzi bylo vytvořeno celkem 7 sekcí (Abaqus - sections), každá MKP vrstva má vlastní originální skořepinovou sekci (Abaqus – shell section), které byly postupně dle obrázku 9.27 přiřazeny jednotlivým vrstvám.



Obrázek 9.30 Přiřazení detailních sectionů jednotlivým vrstvám na části jménem Přední

9.4.3. Vytvoření sestavy

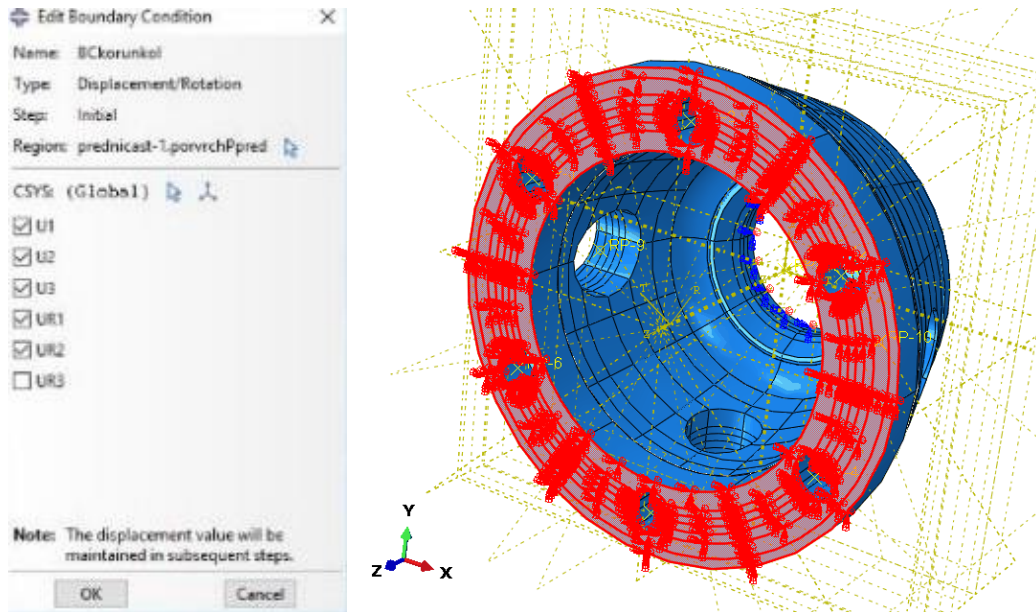
Spojení 4 částí skříně a vytvoření referenčních bodů proběhlo stejně jako v kapitole 9.2.4..



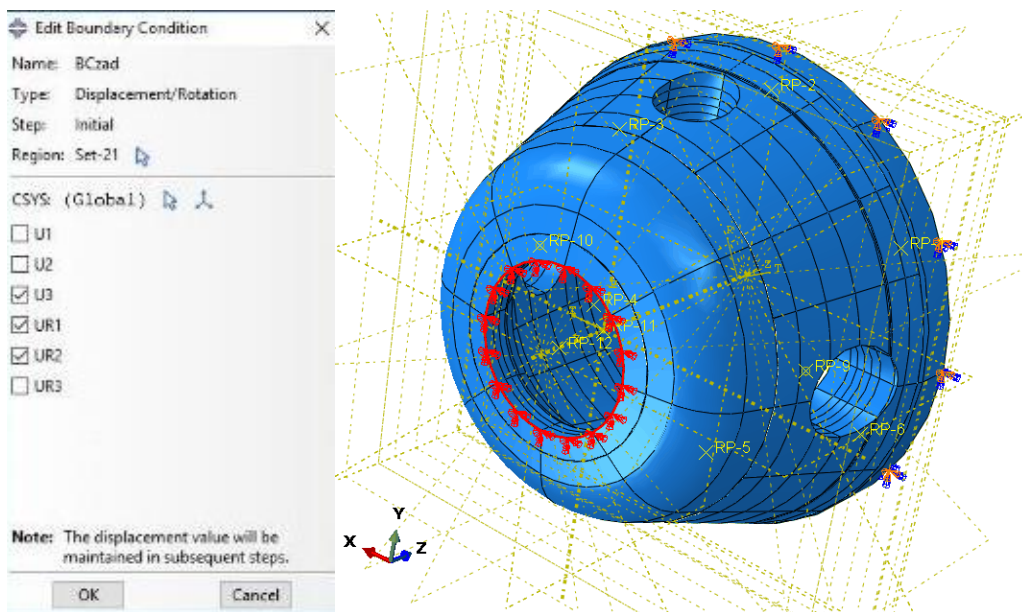
Obrázek 9.31 Sestava detailní orientace s referenčními body

9.4.4. Přřazení kinematických a silových okrajových podmínek

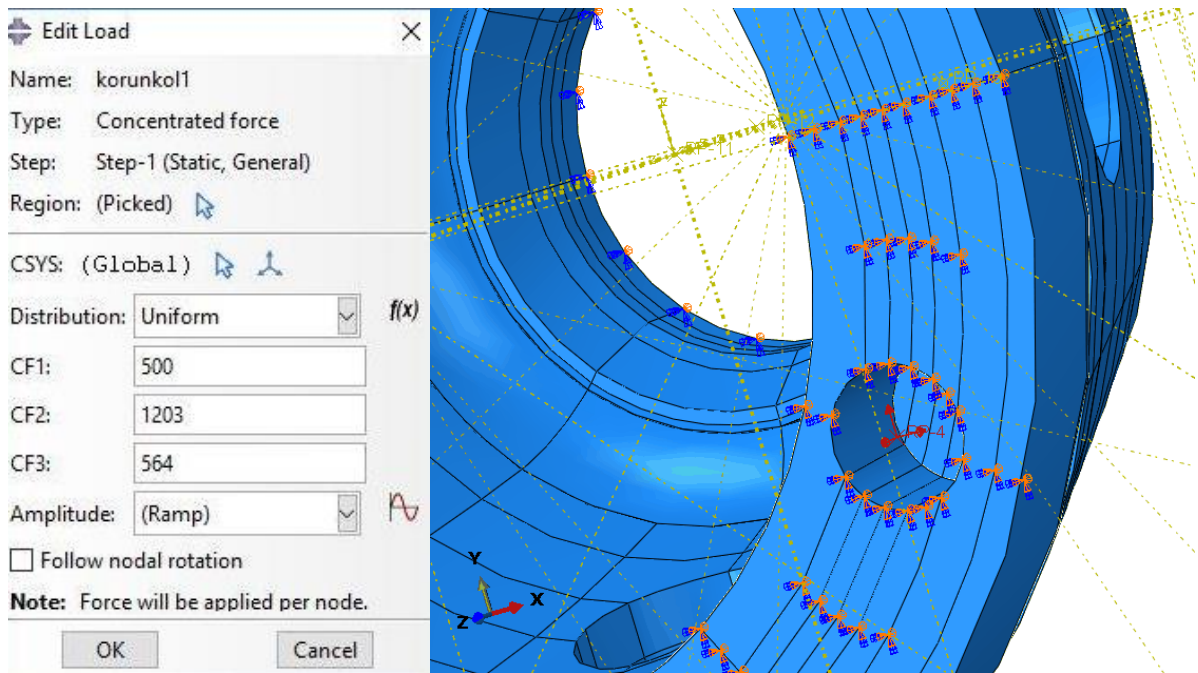
Přřazení kinematických a silových okrajových podmínek také proběhlo stejně jako u předchozího návrhového modelu.



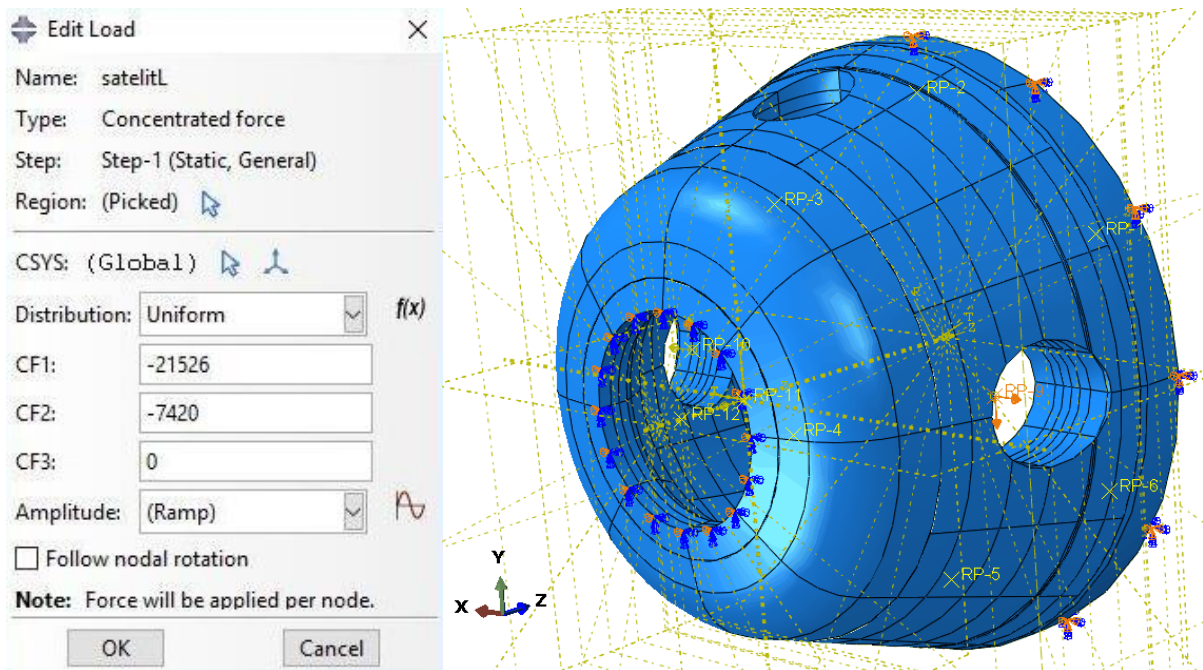
Obrázek 9.32 BCkorunkol DS



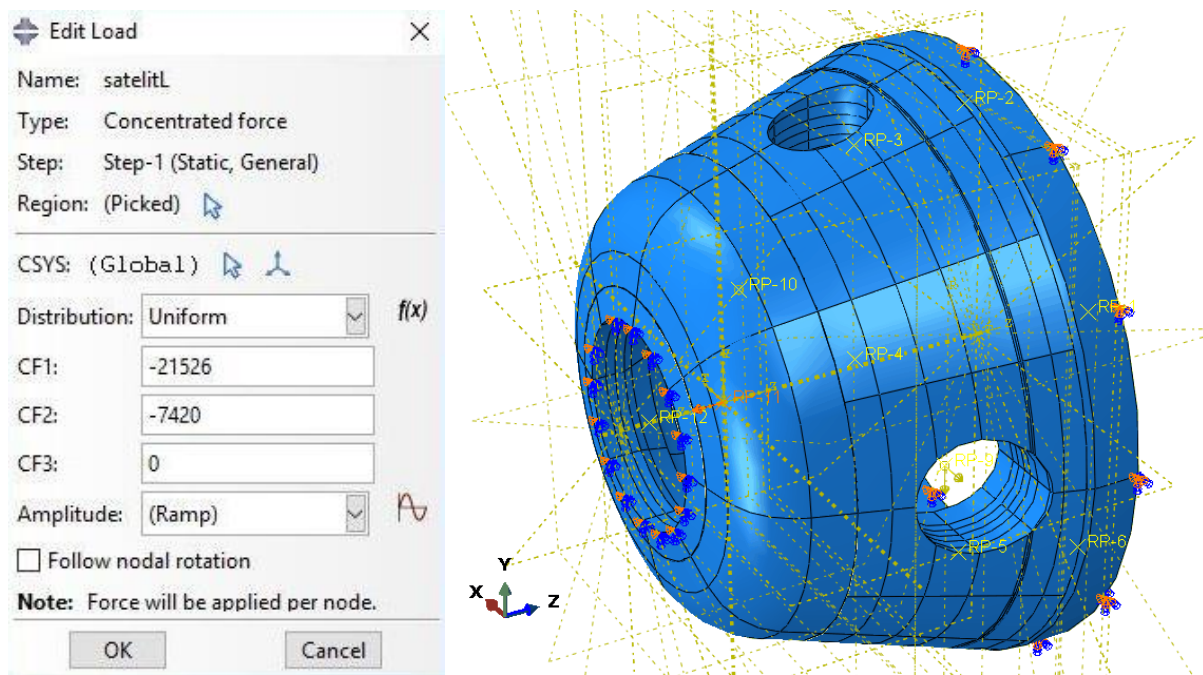
Obrázek 9.33 BCzad DS



Obrázek 9.34 Síly od korunového kola



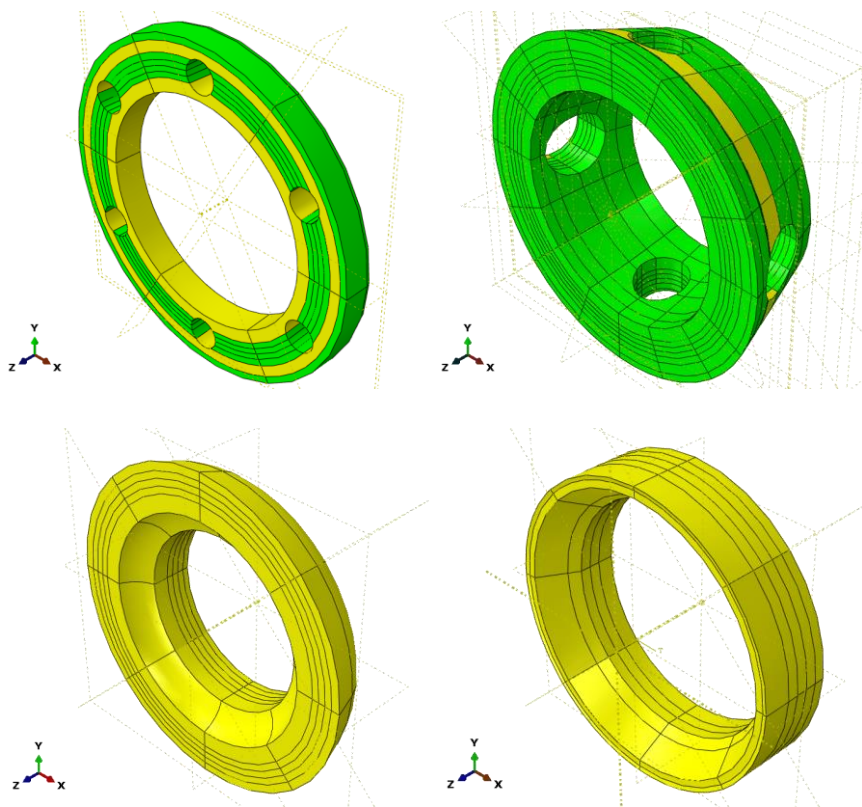
Obrázek 9.35 Síly od Levého satelitu



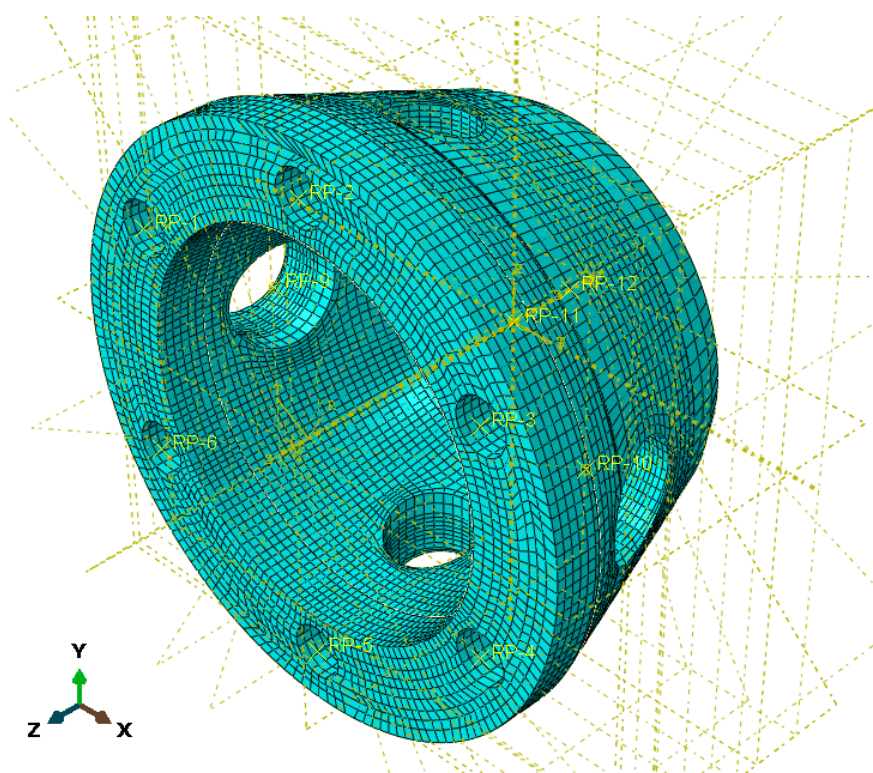
Obrázek 9.36 Síly od zadní planety

9.4.5. Síťování

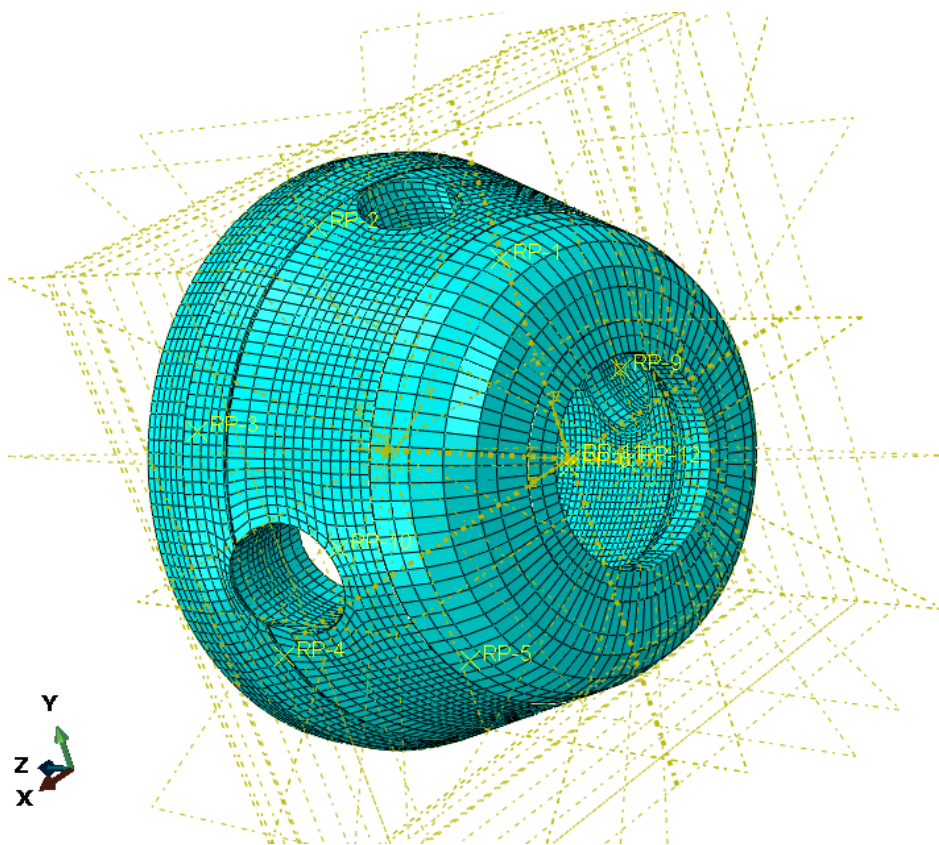
Síťování detailních sekcí proběhlo jako síťování zjednodušených sekcí, viz 9.2.6..



Obrázek 9.37 Volba síťovacích metod pro jednotlivé části součástí



Obrázek 9.38 Volba síť DS pohled zepředu



Obrázek 9.39 Volba síť DS pohled zezadu

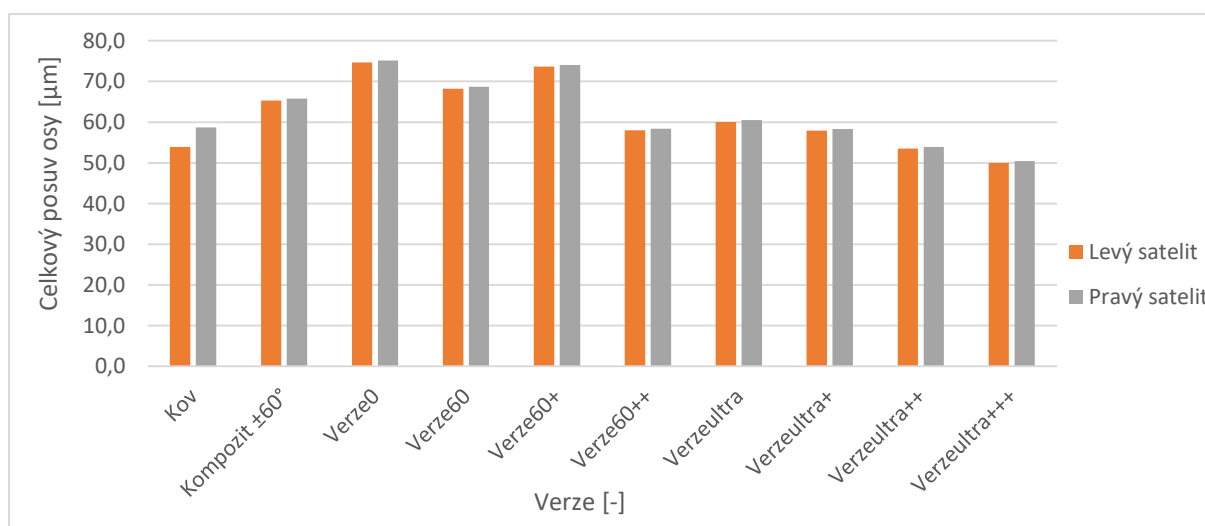
9.4.6. Výsledky tuhosti a porovnání s kovovou verzí

Ve výsledcích jsou porovnány pouze posuvy v osách satelitů a planety, protože posuvy v osách děr korunového kola se svou velikostí ukázaly jako zanedbatelné. Na obrázku 9.37 jsou červeně znázorněny referenční body znázorňující posuv os.

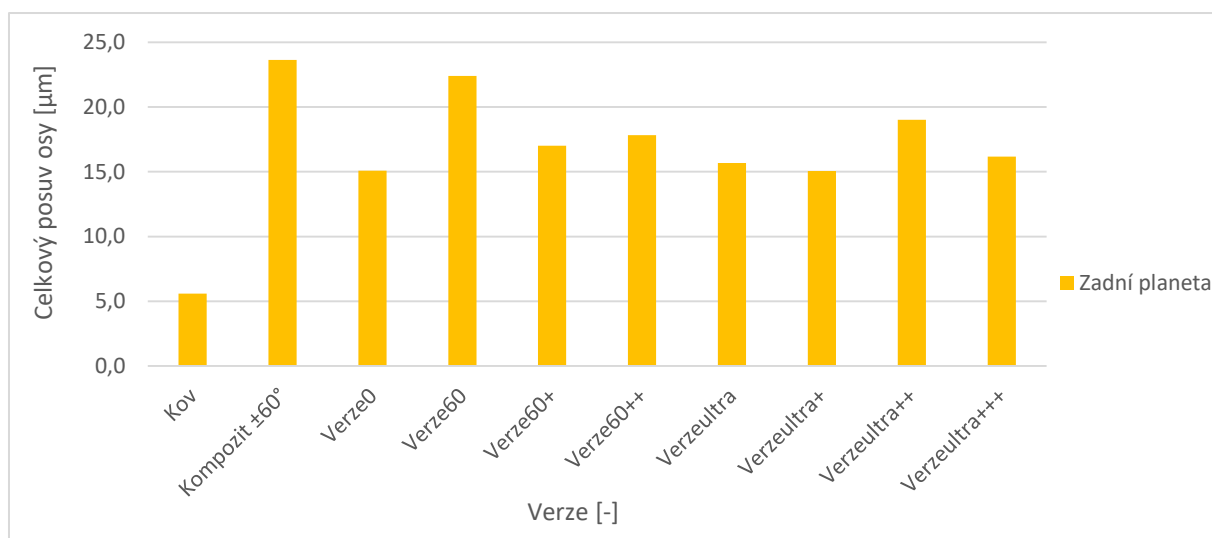
Z grafu 9.2, 3 a tabulky 9.7 lze vidět, že nejlépe vyšla Verzeultra+++, která obsahuje úhel 50° místo úhlu 45° a úhel 60° je dvojnásobně posílen.

Tabulka 9.7 Výsledky analýzy

| Verze | Posuvy [μm] | | |
|-------------------------|--------------------------|-------------------|-------------------|
| | Levý satelit (L) | Pravý satelit (P) | Zadní planeta (Z) |
| Kov | 53,9 | 58,7 | 5,6 |
| Kompozit $\pm 60^\circ$ | 65,3 | 65,8 | 23,7 |
| Verze0 | 74,7 | 75,1 | 15,1 |
| Verze60 | 68,2 | 68,7 | 22,4 |
| Verze60+ | 73,6 | 74,0 | 17,0 |
| Verze60++ | 58,0 | 58,4 | 17,8 |
| Verzeultra | 60,1 | 60,5 | 15,7 |
| Verzeultra+ | 57,9 | 58,3 | 15,1 |
| Verzeultra++ | 53,5 | 53,9 | 19,0 |
| Verzeultra+++ | 50,0 | 50,4 | 16,2 |



Graf 9.2 Porovnání posuvů na satelitech

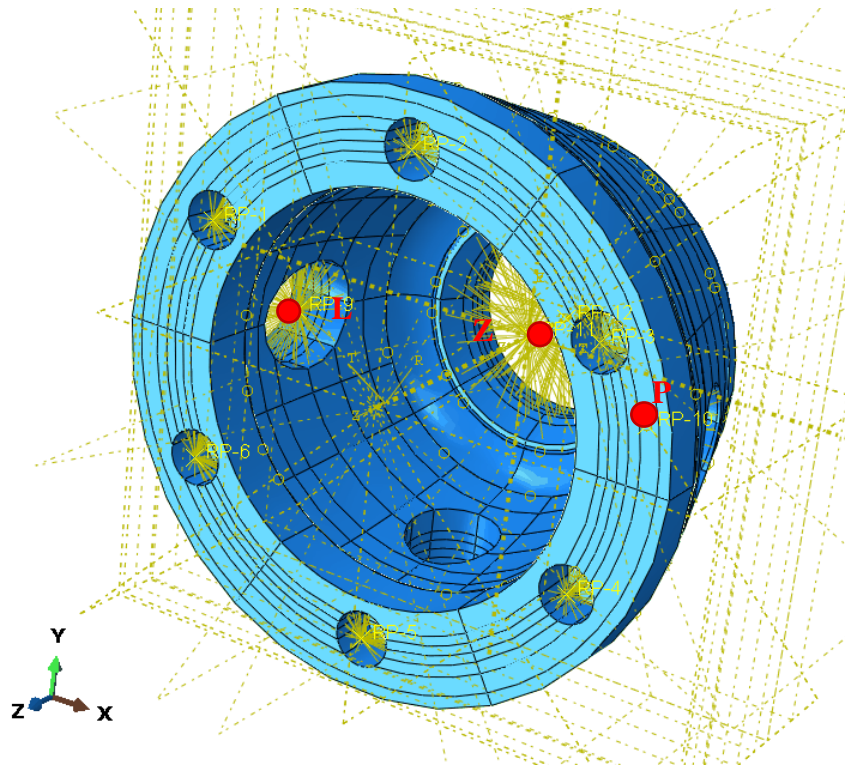


Graf 9.3 Porovnání na planetě

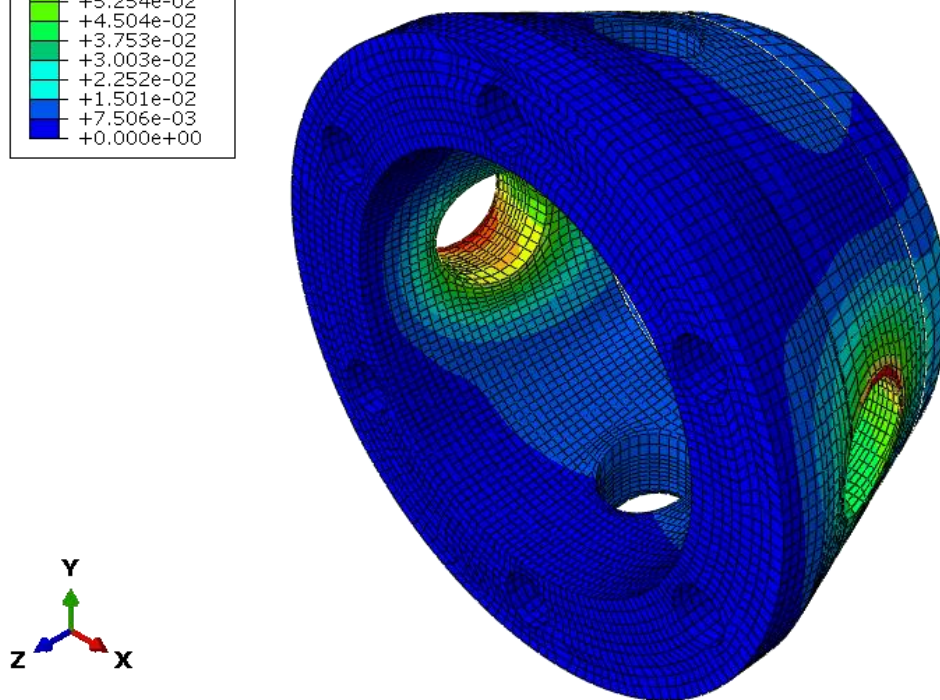
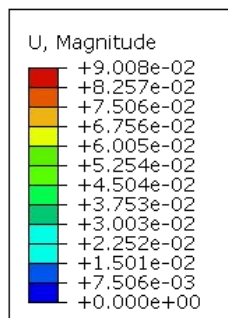
Podle porovnání nejužší kompozitové verze a kovové vidíme, že pro posuvy u satelitů vychází kompozitová Verzeultra+++ dokonce lépe než kovová, ale celkový posuv u zadní planety vyšel trojnásobný.

Tabulka 9.8 Složkové porovnání kompozit kov

| Verze | Posuvy [μm] | | | | | | | | |
|-----------------------------------|--------------------------|-------|-------|-------------------|-------|-------|-------------------|-------|-------|
| | Levý satelit (L) | | | Pravý satelit (P) | | | Zadní planeta (Z) | | |
| | U_x | U_y | U_z | U_x | U_y | U_z | U_x | U_y | U_z |
| Kompozit | -47,8 | -11,9 | -8,7 | 48,1 | 12,4 | -8,5 | 2,6 | 0,3 | -16,2 |
| Kov | -52,1 | -12,6 | -5,4 | 55,3 | 19,4 | -2,9 | -0,03 | 1,5 | -2,7 |
| Porovnání Kompozit/Kov [%] | -8,4 | -5,9 | 61,4 | -13,0 | -36,2 | 195,4 | 7762,9 | -80,4 | 497,7 |



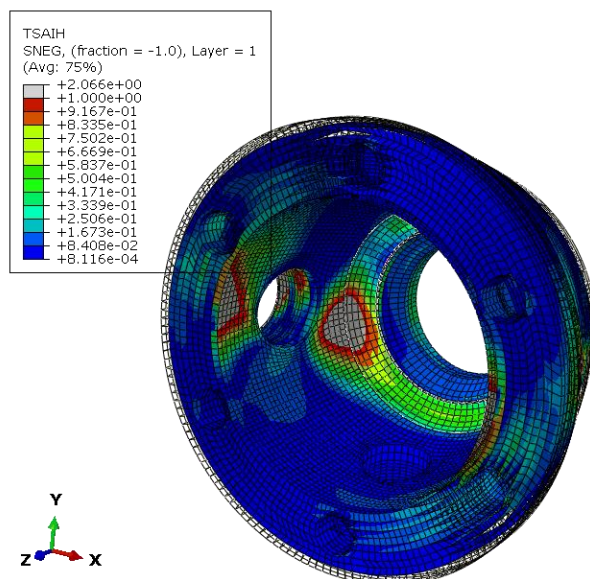
Obrázek 9.40 Znáornění referenčních bodů DS



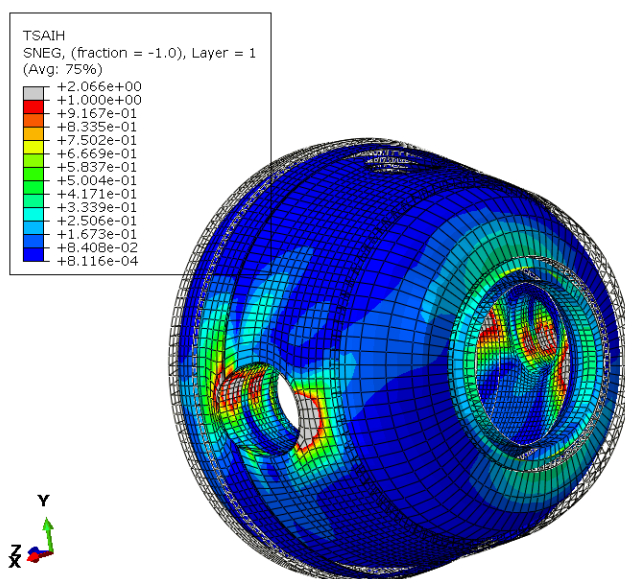
Obrázek 9.41 Průběh posuvů verzeultra+++

9.4.7. Pevnostní kontrola

Byla provedena pevnostní kontrola pomocí Tsai-Hillovy podmínky pevnosti, viz kapitola 4.2.3., která ukázala, že v některých MKP vrstvách buď na konci skříně, nebo v předělech mezi jednotlivými svázanými tělesy, anebo v díře pro vložku pro satelit je koncentrováno napětí a Tsai – Hillova podmínka pevnosti tam není splněna, viz obrázky 9.39 a 9.40 (bílé místa).



Obrázek 9.42 Průběh převrácené hodnoty bezpečnosti podle Tsai-Hillovy podmínky přední pohled



Obrázek 9.43 Průběh převrácené hodnoty bezpečnosti podle Tsai-Hillovy podmínky zadní pohled

10. Závěr

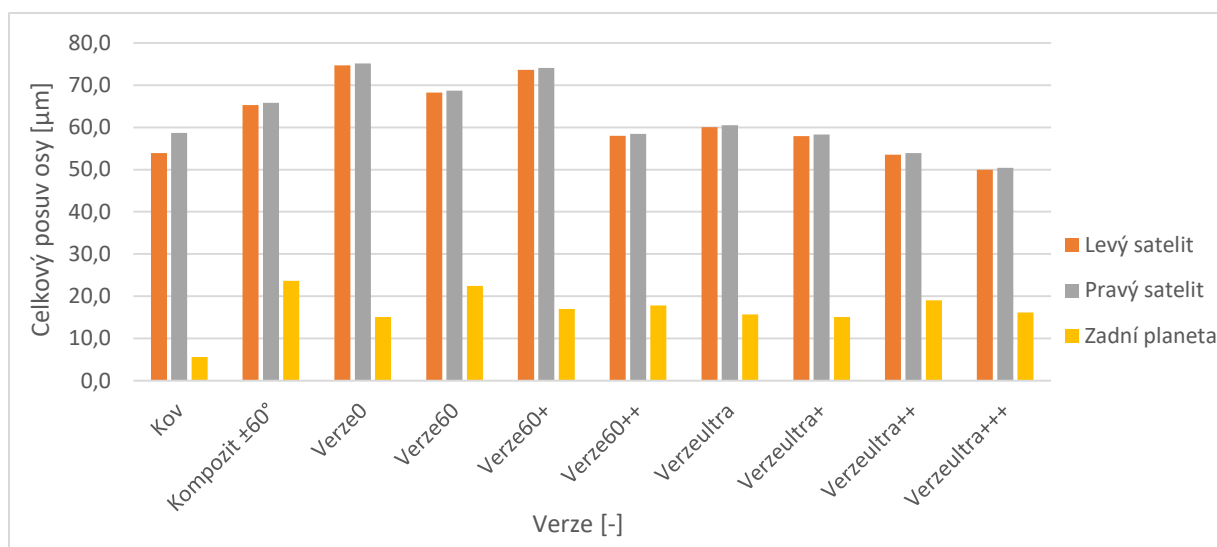
Jako finální varianta konstrukce kompozitního diferenciálu byla vybrána verze IV, která má sice menší podíl kompozitu než verze III, ale je mnohem jednodušší na montáž a výrobu. Dále byl kontrolován spoj korunového kola a skříně diferenciálu, který je realizován pomocí závitové vložky, která také vykonává funkci pouzdra pro šroub. Při kontrolách na stříh, otláčení a vytržení vložka vyhověla.

Byla provedena tuhostní analýza původního ocelovo-litinového diferenciálu, největší posuv je na pravém satelitu 58,7 μm . Následně při návrhu zjednodušené orientace vláken kompozitové verze ve zjednodušených sekcích byl měněn úhel od $\pm 20^\circ$ do $\pm 75^\circ$. Podle grafu 8.1 nejlepší zjednodušenou orientací pro výrobu skříně je $\pm 60^\circ$, jejíž největší posuv (na pravém satelitu) je 65,8 μm .

Dále po analýze detailnějších sekcí lze vidět v grafu 10.1 a tabulky 10.1, že nejlépe vyšla Verzeultra+++, která obsahuje úhel 50° místo úhlu 45° a úhel 60° je dvojnásobně posílen.

Tabulka 10.1 Výsledky všech analýz

| Verze | Posuvy [μm] | | |
|-------------------------|--------------------------|-------------------|-------------------|
| | Levý satelit (L) | Pravý satelit (P) | Zadní planeta (Z) |
| Kov | 53,9 | 58,7 | 5,6 |
| Kompozit $\pm 60^\circ$ | 65,3 | 65,8 | 23,7 |
| Verze0 | 74,7 | 75,1 | 15,1 |
| Verze60 | 68,2 | 68,7 | 22,4 |
| Verze60+ | 73,6 | 74,0 | 17,0 |
| Verze60++ | 58,0 | 58,4 | 17,8 |
| Verzeultra | 60,1 | 60,5 | 15,7 |
| Verzeultra+ | 57,9 | 58,3 | 15,1 |
| Verzeultra++ | 53,5 | 53,9 | 19,0 |
| Verzeultra+++ | 50,0 | 50,4 | 16,2 |



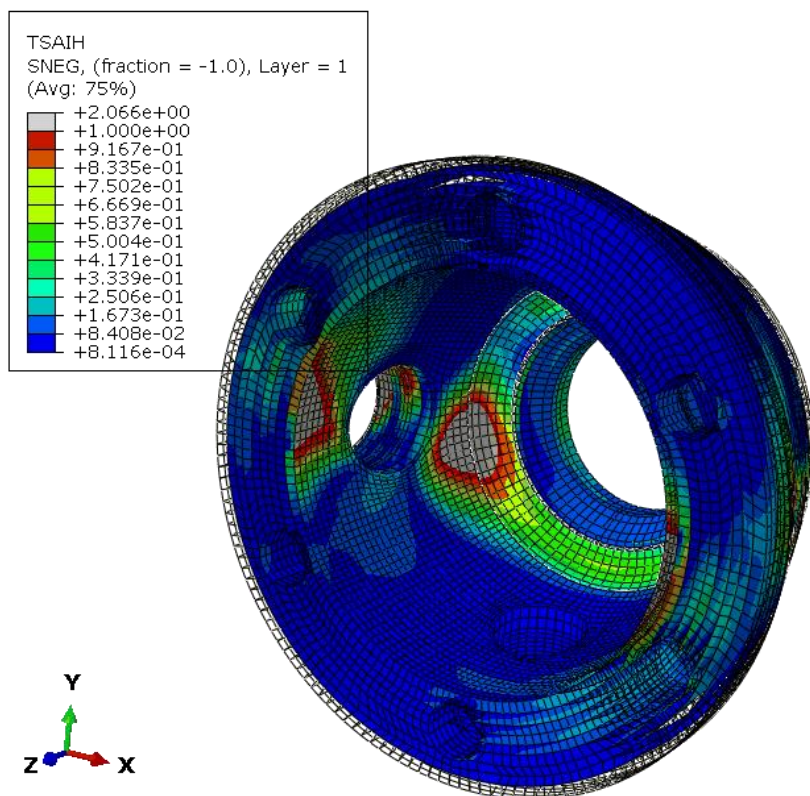
Graf 10.1 Porovnání jednotlivých variant a posuvů

Podle porovnání nejlepší kompozitové verze a kovové vidíme, že pro posuvy u satelitů vychází kompozitová Verzeultra+++ dokonce lépe než kovová, ale celkový posuv u zadní planety vyšel vyšší 16,2 µm, což je nárůst 289 %.

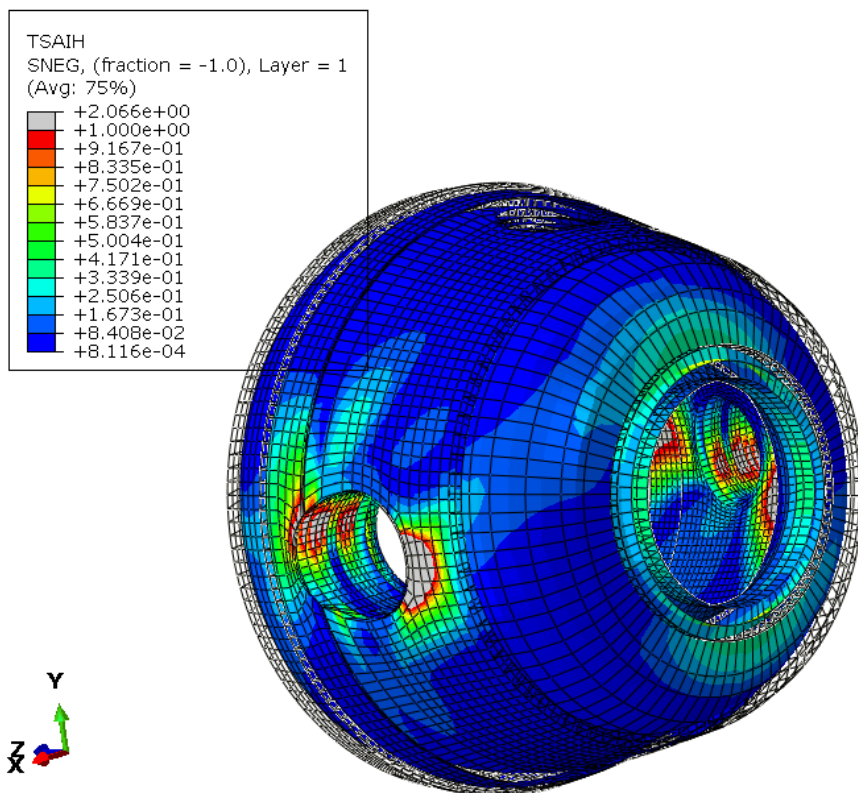
Následně byla vytvořena pevnostní kontrola pomocí Tsai-Hillovy podmínky pevnosti, viz kapitola 3.2.3., která ukázala, že v některých MKP vrstvách, buď na konci skříně, nebo v předělech mezi jednotlivými svázanými tělesy, anebo v díře pro vložku pro satelit, je koncentrováno napětí a Tsai – Hillova podmínka pevnosti tam není splněna, viz obrázky 10.1 a 10.2 (bílé místa). Jedná se o zásadní problém, ale domnívám se, že tyto koncentrace by se měla zmenšit (a někde i zmizet), kdyby se kontroloval diferenciál jako celek včetně vlepených vložek, což by mělo zlepšit distribuci napětí do skříně.

V další části projektu bude zpracována MKP analýza interakce jednotlivých částí sestavy převodovky.

Cíl této diplomové práce byl stanoven jako: „Hlavním cílem této práce je dosáhnout co největšího odlehčení původní kovové verze diferenciálu při zachování tuhosti a zastavitelnosti.“ Tento cíl byl splněn pouze z části. Zatímco zastavitelnost do kuželu ve víku převodovky byla splněna a z hlediska tuhosti vychází kompozitní diferenciál lépe než kov, úspora hmotnosti na finální verzi je pouze 14 %, což nesplňuje projektem zadaných alespoň 20 % odlehčení.



Obrázek 10.1 Průběh převrácené hodnoty bezpečnosti podle Tsai-Hillovy podmínky Verzeultra+++ přední pohled



Obrázek 10.2 Průběh převrácené hodnoty bezpečnosti podle Tsai-Hillovy podmínky Verzeultra+++ zadní pohled

11. Citovaná literatura

- [1] G. Gardiner, „Composites world,“ [Online]. Available: <https://www.compositesworld.com/blog/post/proving-performance-in-ev-powertrains>. [Přístup získán 29 Červenec 2019].
- [2] O. Sedivý, „Analýza tuhosti kompozitového víka pro převodovku,“ Praha, 2017.
- [3] M. Sulitka, „High-speed and lightweight reducer of Electric Vehicle using composite materials,“ FS ČVUT, Praha, 2018.
- [4] B. Kropík, „Návrh a analýza hřídelí pro převodovku elektromobilu,“ Fakulta strojů, ČVUT, Praha, 2019.
- [5] „Wikipedia,“ [Online]. Available: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Diferenci%C3%A1l_\(mechanika\)](https://cs.wikipedia.org/wiki/Diferenci%C3%A1l_(mechanika)). [Přístup získán 28 Duben 2019].
- [6] K. Blahouš, „Vysokopevnostní integrované kompozitové spoje, jejich navrhování a reálné aplikace-disertační práce,“ Praha, 2008.
- [7] H. Carter, „MODULUS OF SYMMETRICAL FILAMENT WOUND CARBON FIBRE TUBES,“ Prague, 2002.
- [8] V. Laš, Mechanika kompozitních materiálů, Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2008.
- [9] P. V. ŠČERBOVÁ, „spszengrova.cz,“ 13 Duben 2013. [Online]. Available: https://www.spszengrova.cz/texty/texty/MEC/12_MEC_KONTROLA_STYKOVYCH_PLOCH_NA_OTLACENI_2_ROCNIK-UT.pdf. [Přístup získán 25 Červenec 2019].
- [10] M. Svobodová, „http://domes.spssbrno.cz,“ Leden 2013. [Online]. Available: http://domes.spssbrno.cz/web/DUMy/SPS,%20MEC,%20CAD/VY_32_INOVACE_14-05.pdf. [Přístup získán 25 Červenec 2019].
- [11] V. Králová, „slideplayer.cz,“ [Online]. Available: <https://slideplayer.cz/slide/2918581/>. [Přístup získán 25 Červenec 2019].
- [12] briol, „briol.cz,“ Briol spojovací materiály, [Online]. Available: <https://www.briol.cz/technicke-informace/utahovaci-momenty-sroubu>. [Přístup získán 25 Červenec 2019].
- [13] Simulia, „Abaqus user's manual,“ Simulia, 2011.

12. Seznam obrázků

| | |
|--|----|
| Obrázek 1.1 Přehled použití vláknových kompozitů u elektromobilů [1] | 1 |
| Obrázek 1.2 Příklad hybridní převodovky [1] | 2 |
| Obrázek 1.3 Diferenciál s blokcí na hnané hřídeli [5]..... | 3 |
| Obrázek 1.4 Diferenciál bez blokace na hnané hřídeli [5]..... | 3 |
| Obrázek 2.1 Úvod do projektu [3] | 4 |
| Obrázek 2.2 Sestavný výkres původní kovové verze převodovky..... | 5 |
| Obrázek 2.3 Fotka komponentů původní kovové verze převodovky [3]..... | 5 |
| Obrázek 2.4 Model hybridní hřídele [3]..... | 6 |
| Obrázek 2.5 Vyrobené vzorky hybridních hřídelí [3] | 6 |
| Obrázek 2.6 MKP síť horního víka [3] | 7 |
| Obrázek 2.7 Fotka vyrobených vzorků horního víka [3] | 7 |
| Obrázek 2.8 MKP síť dolního víka [3]..... | 8 |
| Obrázek 2.9 Fotka vyrobených vzorků dolního víka [3] | 8 |
| Obrázek 3.1 Schéma postupu prací | 10 |
| Obrázek 4.1 Možnosti orientace vláken [6] | 13 |
| Obrázek 4.2 Orientace laminy vůči síle | 15 |
| Obrázek 4.3 Orientace laminy na ovíjené trubce [6] | 18 |
| Obrázek 6.1 Ukázka skladby jedné základní skladby | 26 |
| Obrázek 7.1 Schéma převodovky..... | 27 |
| Obrázek 7.2 Silový diagram diferenciálu..... | 29 |
| Obrázek 7.3 Zatížení korunového kola poskytnuté firmou KIMM | 30 |
| Obrázek 8.1 Model stávající verze | 31 |
| Obrázek 8.2 Výkres stávající verze..... | 32 |
| Obrázek 8.3 Model verze I..... | 33 |
| Obrázek 8.4 Výkres verze I..... | 33 |
| Obrázek 8.5 Model verze II..... | 34 |
| Obrázek 8.6 Výkres verze II | 35 |
| Obrázek 8.7 Model verze III | 36 |
| Obrázek 8.8 Výkres verze III | 36 |
| Obrázek 8.9 Model verze IV | 37 |
| Obrázek 8.10 Výkres verze IV | 38 |
| Obrázek 8.11 Model kompozitní skříně | 39 |
| Obrázek 8.12 Model zadní vložky | 40 |
| Obrázek 8.13 Model Vložky pod satelit (čep) | 41 |
| Obrázek 8.14 Model závitové vložky..... | 41 |
| Obrázek 8.15 Model korunového kola | 42 |
| Obrázek 8.16 Spoj korunové kolo-skříň diferenciálu | 43 |
| Obrázek 8.17 Schéma kontroly na otláčení [10] | 44 |
| Obrázek 8.18 Schéma kontroly na stříh [10]..... | 46 |
| Obrázek 8.19 Schéma zatíženého lepeného spoje [11] | 47 |
| Obrázek 9.1 Schéma základní skladby..... | 50 |
| Obrázek 9.2 Schéma celkové skladby..... | 50 |
| Obrázek 9.3 Rozdíl skořepinového a objemoskořepinového elementu [13]..... | 51 |
| Obrázek 9.4 Výpočtová sestava původního diferenciálu | 53 |

| | |
|--|-----------|
| Obrázek 9.5 BC-1 | 53 |
| Obrázek 9.6 BC-2..... | 54 |
| Obrázek 9.7 Zadání síly místo zadní planety | 54 |
| Obrázek 9.8 Zadání síly místo korunového kola..... | 55 |
| Obrázek 9.9 Zadání síly místo pravého satelitu | 55 |
| Obrázek 9.10 Vysíťování sestavy původního diferenciálu | 56 |
| <i>Obrázek 9.11 Znázornění referenčních bodů u původní kovové verze</i> | <i>57</i> |
| Obrázek 9.12 Průběh deformace na původní verzi diferenciálu | 57 |
| Obrázek 9.13 Průběh napětí na původní verzi diferenciálu | 58 |
| Obrázek 9.14 Sestava z jednotlivých vrstev skříně..... | 60 |
| Obrázek 9.15 Jednotlivé vrstvy skříně po rozřezání | 61 |
| Obrázek 9.16 Jednotlivé části v Abaqus | 62 |
| Obrázek 9.17 Přiřazení zjednodušených sectionů jednotlivým vrstvám na části jménem Přední | 62 |
| Obrázek 9.18 Příklady zjednodušených sekcí..... | 63 |
| Obrázek 9.19 Sestava skříně s couplingy | 63 |
| Obrázek 9.20 BCkorunkol..... | 64 |
| Obrázek 9.21 BCzad | 64 |
| Obrázek 9.22 Vložení od korunového kola..... | 65 |
| Obrázek 9.23 Vložení od Levého satelitu | 65 |
| Obrázek 9.24 Vložení od zadní planety | 66 |
| Obrázek 9.25 Volba síťovacích mechanismů..... | 66 |
| Obrázek 9.26 Volba sítě pohled zepředu | 67 |
| Obrázek 9.27 Volba sítě pohled zezadu | 67 |
| Obrázek 9.28 Znázornění referenčních bodů zjednodušené verze..... | 68 |
| Obrázek 9.29 Rozvrstvení úhlů v základní skladbě | 70 |
| Obrázek 9.30 Přiřazení detailních sectionů jednotlivým vrstvám na části jménem Přední | 71 |
| Obrázek 9.31 Sestava detailní orientace s referenčními body..... | 71 |
| Obrázek 9.32 BCkorunkol DS | 72 |
| Obrázek 9.33 BCzad DS | 72 |
| Obrázek 9.34 Síly od korunového kola..... | 73 |
| Obrázek 9.35 Síly od Levého satelitu | 73 |
| Obrázek 9.36 Síly od zadní planety | 74 |
| Obrázek 9.37 Volba síťovacích metod pro jednotlivé části součástí | 74 |
| Obrázek 9.38 Volba sítě DS pohled zepředu | 75 |
| Obrázek 9.39 Volba sítě DS pohled zezadu | 75 |
| Obrázek 9.40 Znázornění referenčních bodů DS | 78 |
| Obrázek 9.41 Průběh posuvů verzeultra+++..... | 78 |
| Obrázek 9.42 Průběh převrácené hodnoty bezpečnosti podle Tsai-Hillovy podmínky přední pohled | 79 |
| Obrázek 9.43 Průběh převrácené hodnoty bezpečnosti podle Tsai-Hillovy podmínky zadní pohled | 79 |
| Obrázek 10.1 Průběh převrácené hodnoty bezpečnosti podle Tsai-Hillovy podmínky Verzeultra+++ přední pohled | 82 |
| Obrázek 10.2 Průběh převrácené hodnoty bezpečnosti podle Tsai-Hillovy podmínky Verzeultra+++ zadní pohled..... | 82 |

13. Seznam grafů

| | |
|--|----|
| Graf 9.1 Volba úhlů orientace vláken a jeho velikost deformace os..... | 69 |
| Graf 9.2 Porovnání posuvů na satelitech..... | 76 |
| Graf 9.3 Porovnání na planetě..... | 77 |
| Graf 10.1 Porovnání jednotlivých variant a posuvů..... | 81 |

14. Seznam tabulek

| | |
|--|----|
| Tabulka 4.1 Materiálové vlastnosti vláken [6]..... | 12 |
| Tabulka 4.2 Materiálové vlastnosti matric [6]..... | 13 |
| Tabulka 9.1 Materiálové vlastnosti stávajícího diferenciálu..... | 52 |
| Tabulka 9.2 Výsledná celková deformace os vnitřních ozubených kol a korunového kola | 56 |
| Tabulka 9.3 Materiálové vlastnosti vlákna a kompozitu..... | 59 |
| Tabulka 9.4 Volba úhlu orientace vláken a jeho velikost deformace os..... | 68 |
| Tabulka 9.5 Porovnání Kompozitové a kovové verze | 69 |
| Tabulka 9.6 Volený materiál pro výpočet detailní sekce | 70 |
| Tabulka 9.7 Výsledky analýzy | 76 |
| Tabulka 9.8 Složkové porovnání kompozit kov..... | 77 |
| Tabulka 10.1 Výsledky všech analýz | 80 |

15. Seznam příloh

Příloha 1 – Sestavný výkres diferenciálu

Příloha 2 – Výkres kompozitové skříně

Příloha 3 – Výkres korunového kola

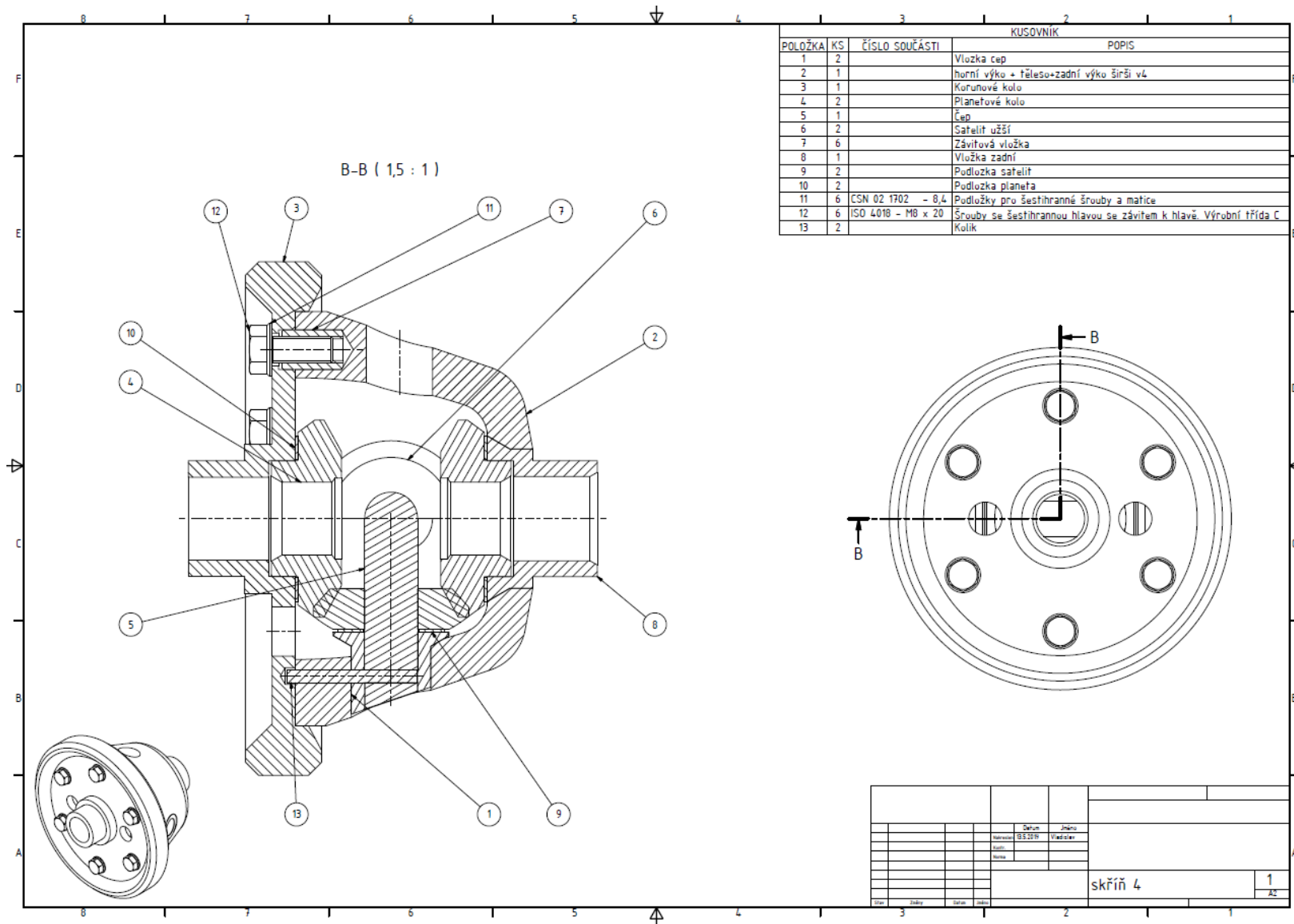
Příloha 4 – Výkres závitové vložky

Příloha 5 – Výkres vložky pod čep

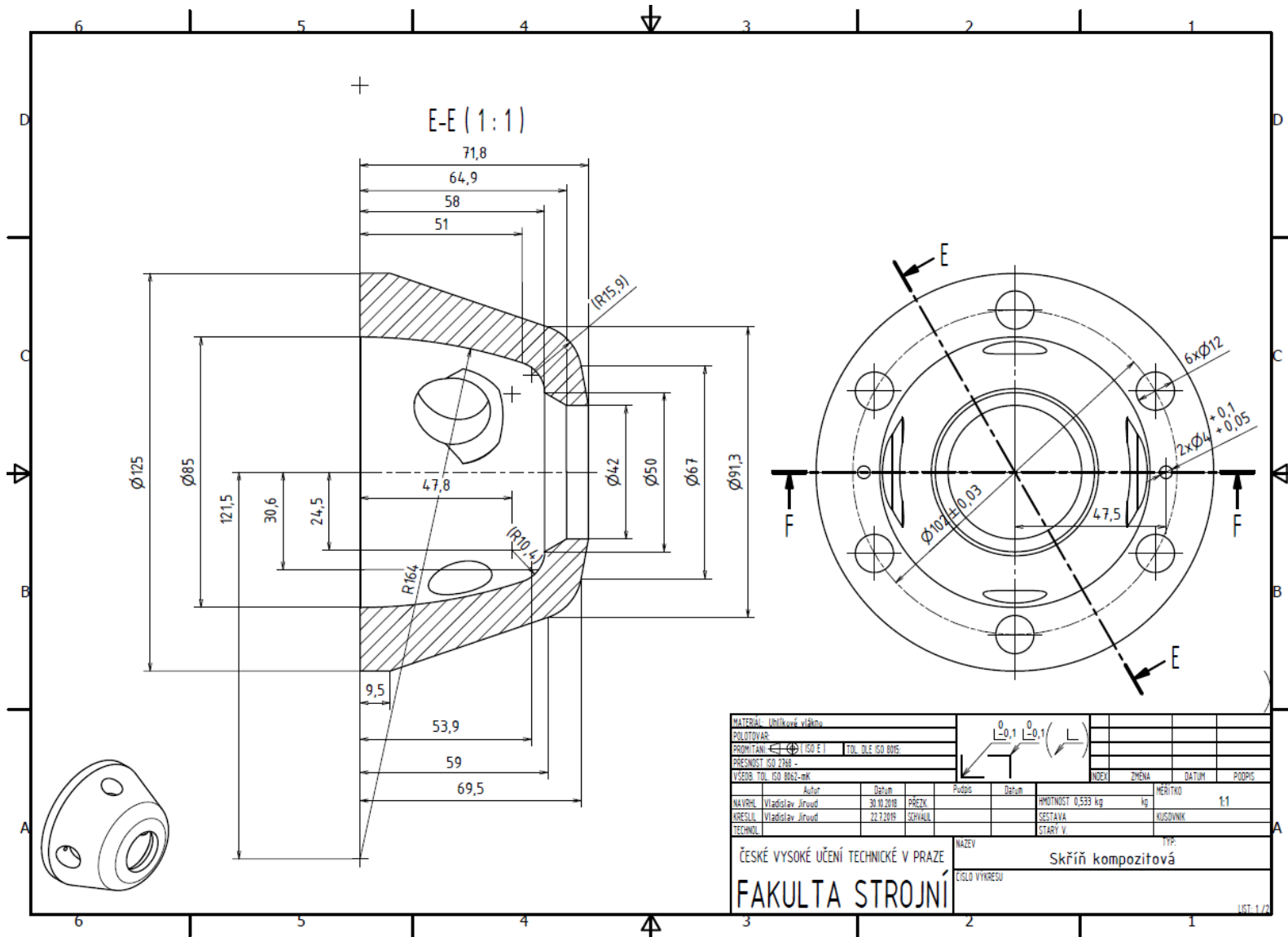
Příloha 6 – Výkres zadní vložky

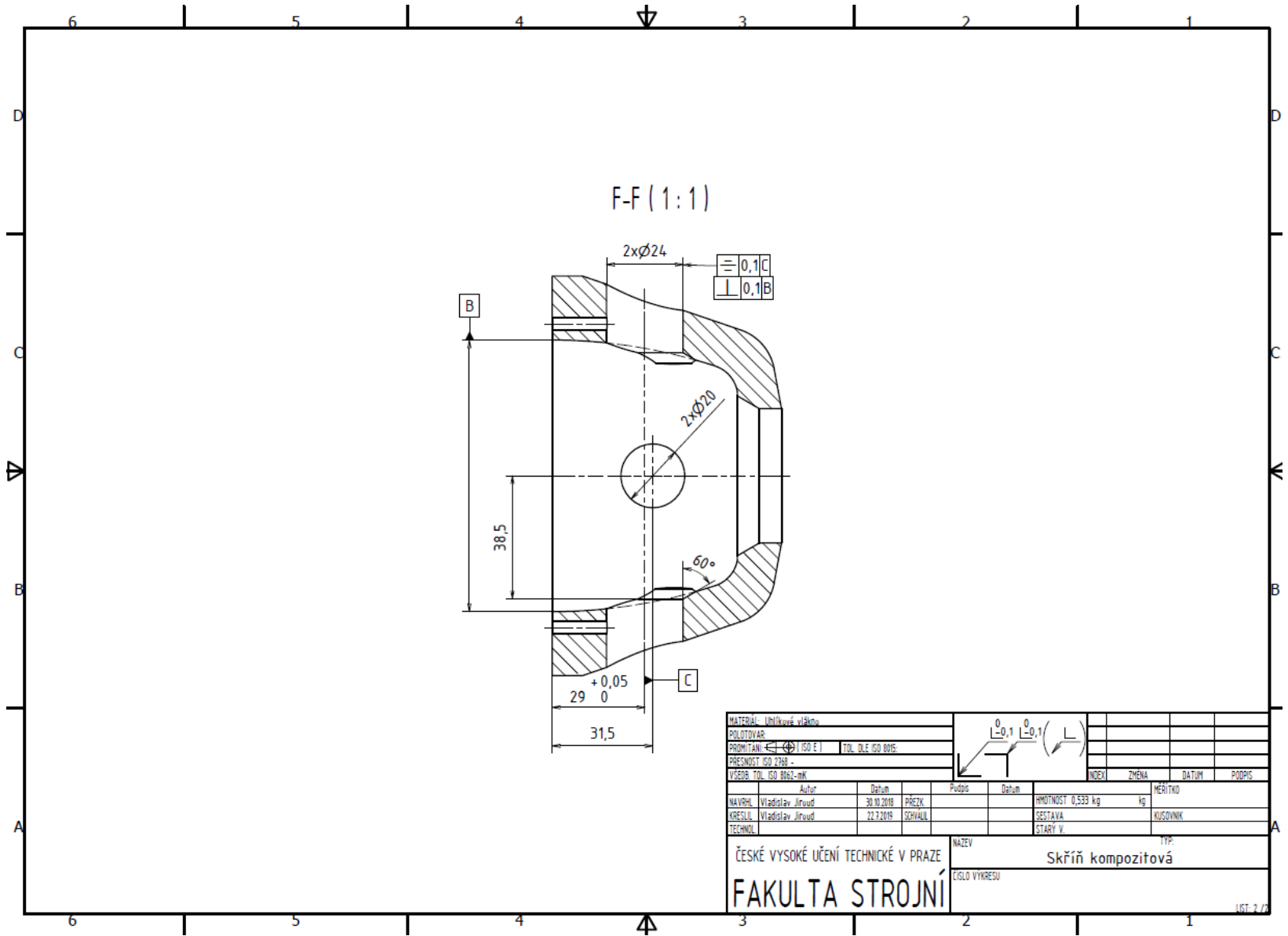
Příloha 7 – Tabulka orientace vláken ve vrstvách pro jednotlivé varianty

Příloha 1

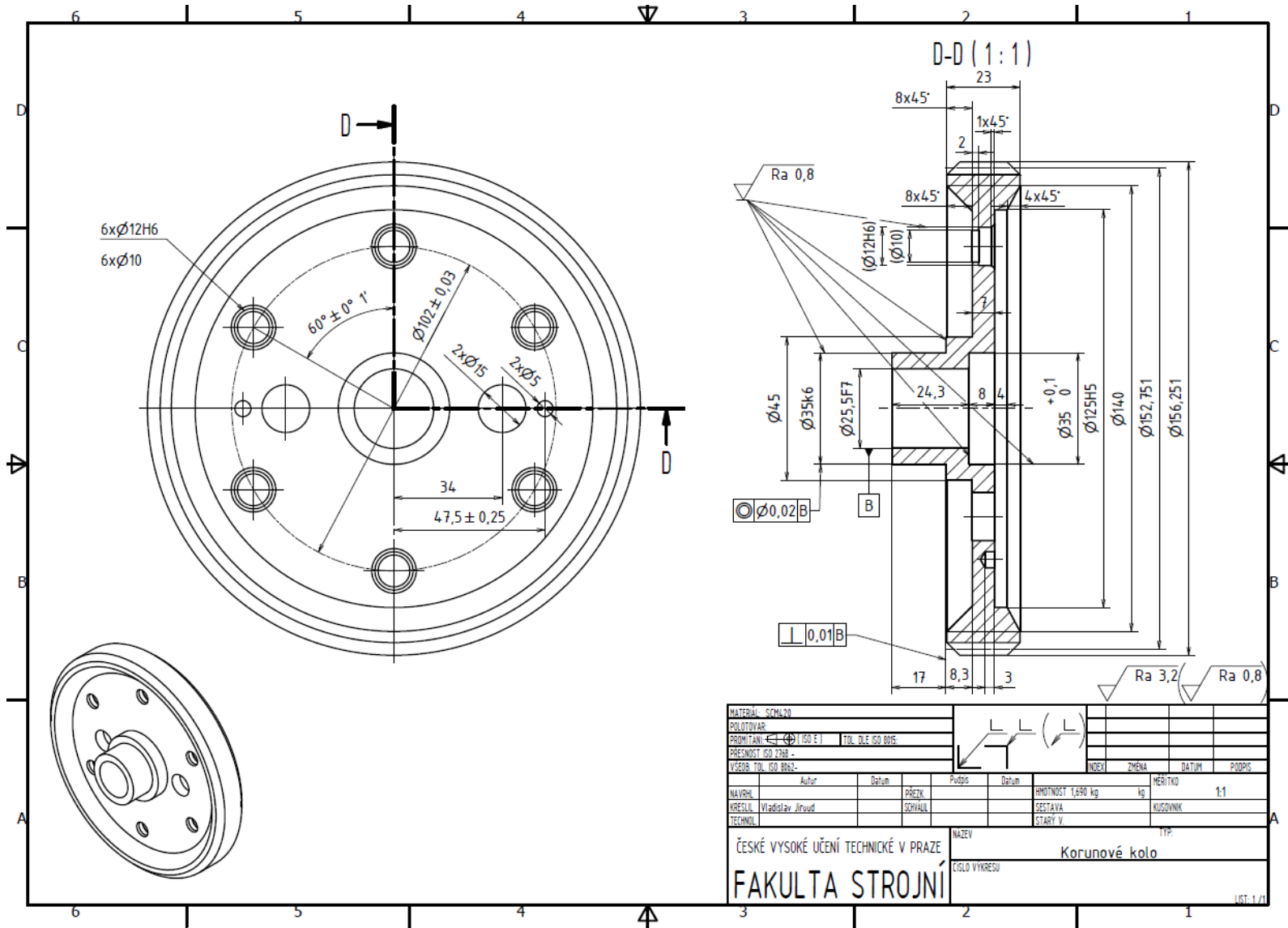


Příloha 2



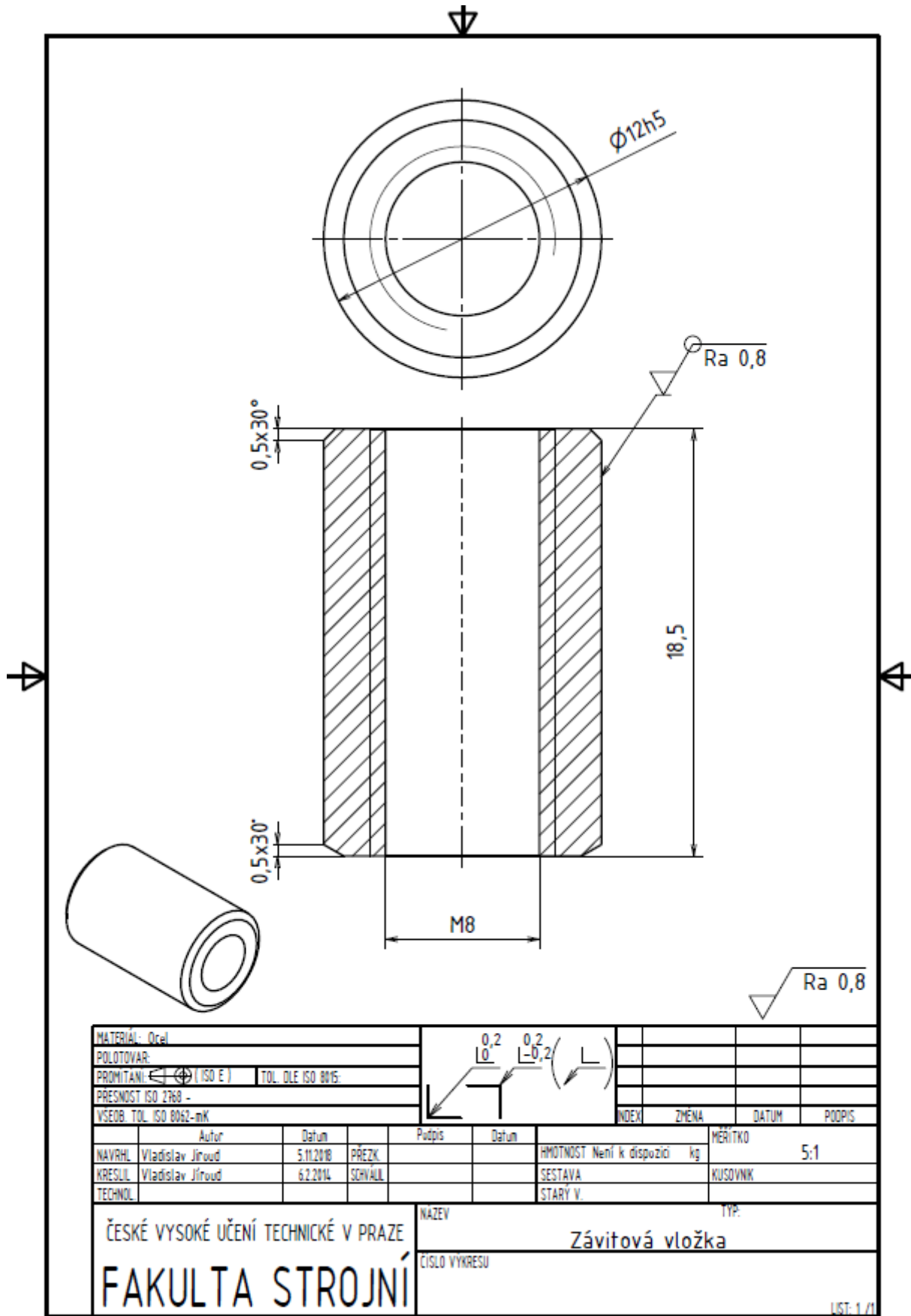


Příloha 3



| | | | | | | | |
|--------------------------------------|------------------|-------------------|----------|----------------------|-------------------|--------|-------------|
| MATERIAL: SCHL20 | | | | | | | |
| POLOTOVAR | | | | | | | |
| PROMITAN: 4 (150 E) | | TOL. DLE ISO 8015 | | | | | |
| PŘESNOST ISO 2199 | | | | | | | |
| VÝSOB. TOL. ISO 8015 | | | | | | | |
| | | | | KOD | | ZMENA | |
| | | | | DATUM | | PODPIS | |
| NAVRH: | Autor | Datum | PŘEZK: | Datum | HMOTNOST 1,690 kg | kg | MĚŘITKO 1:1 |
| KRESLIL: | Vladislav Jiroud | | SKRIVAL: | | SESTAVA | | KUSOVNIK |
| TECHNOL: | | | | | STARÝ V | | |
| ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE | | | | NAZEV: Korunové kolo | | | |
| FAKULTA STROJNÍ | | | | CÍLO VÝKRESU | | | |
| | | | | TYP: | | | |

Příloha 4

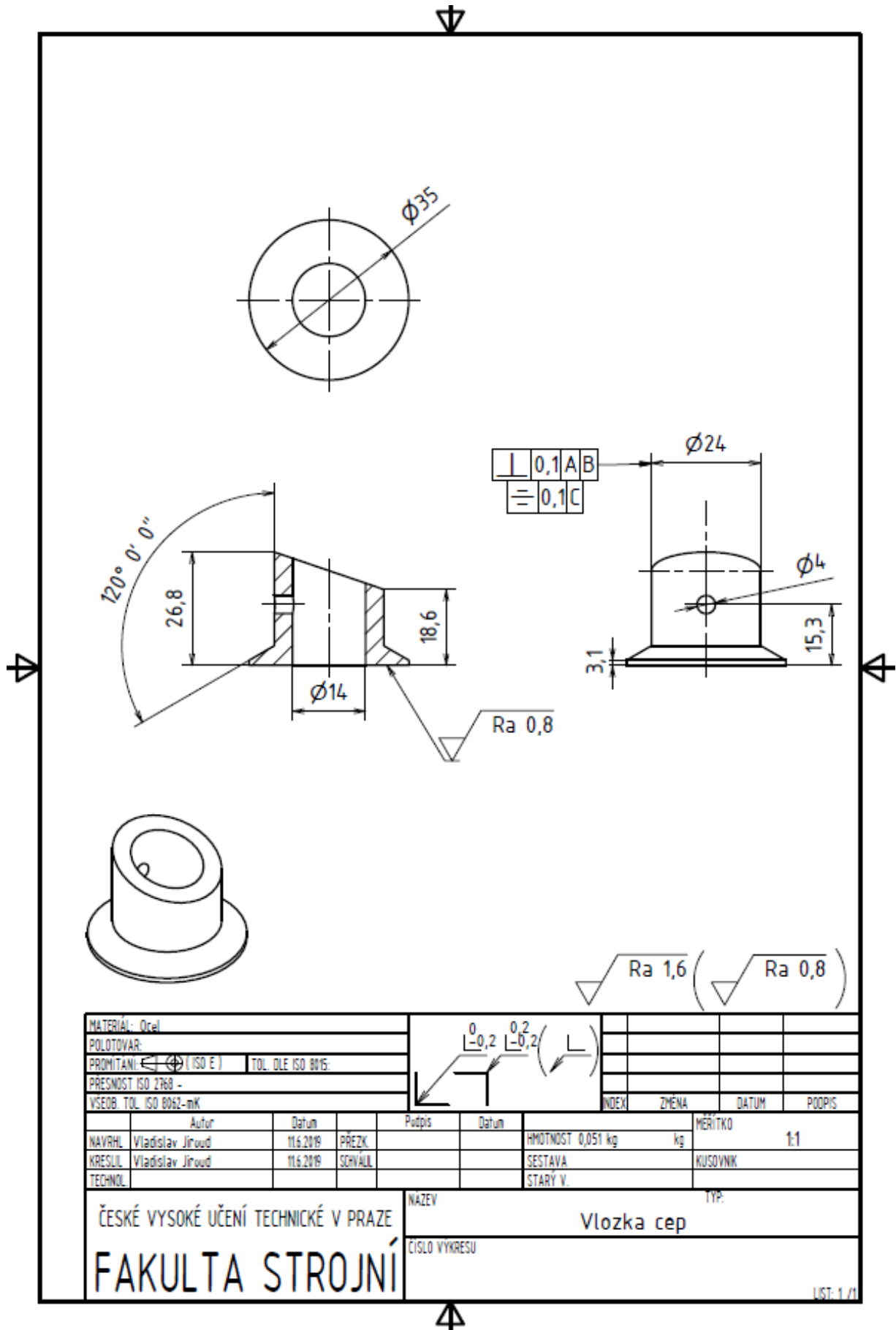


| | | | | | | | | | |
|--|------------------|--------------------|--------|-----------|----------|------------------|----|---------|-----|
| MATERIÁL: Ocel | | POLOTOVAR: | | 0,2 L0 | | 0,2 L-0,2 (L) | | | |
| PROMĚTÁNÍ: $\left(\begin{smallmatrix} \text{---} \\ \text{---} \end{smallmatrix}\right)$ (ISO E) | | TOL. DLE ISO 8015: | | | | | | | |
| PŘESNOST ISO 2768 - | | | | | | | | | |
| VŠEOB. TOL. ISO 8062-mK | | | | | | | | | |
| | Autor | Datum | Podpis | Datum | HMOTNOST | Není k dispozici | kg | MĚŘÍTKO | 5:1 |
| NAVRHL | Vladislav Jíroud | 5.11.2018 | PREZK | | | | | | |
| KRESLIL | Vladislav Jíroud | 6.2.2014 | SCHVÁL | | | | | | |
| TECHNOL | | | | | | | | | |

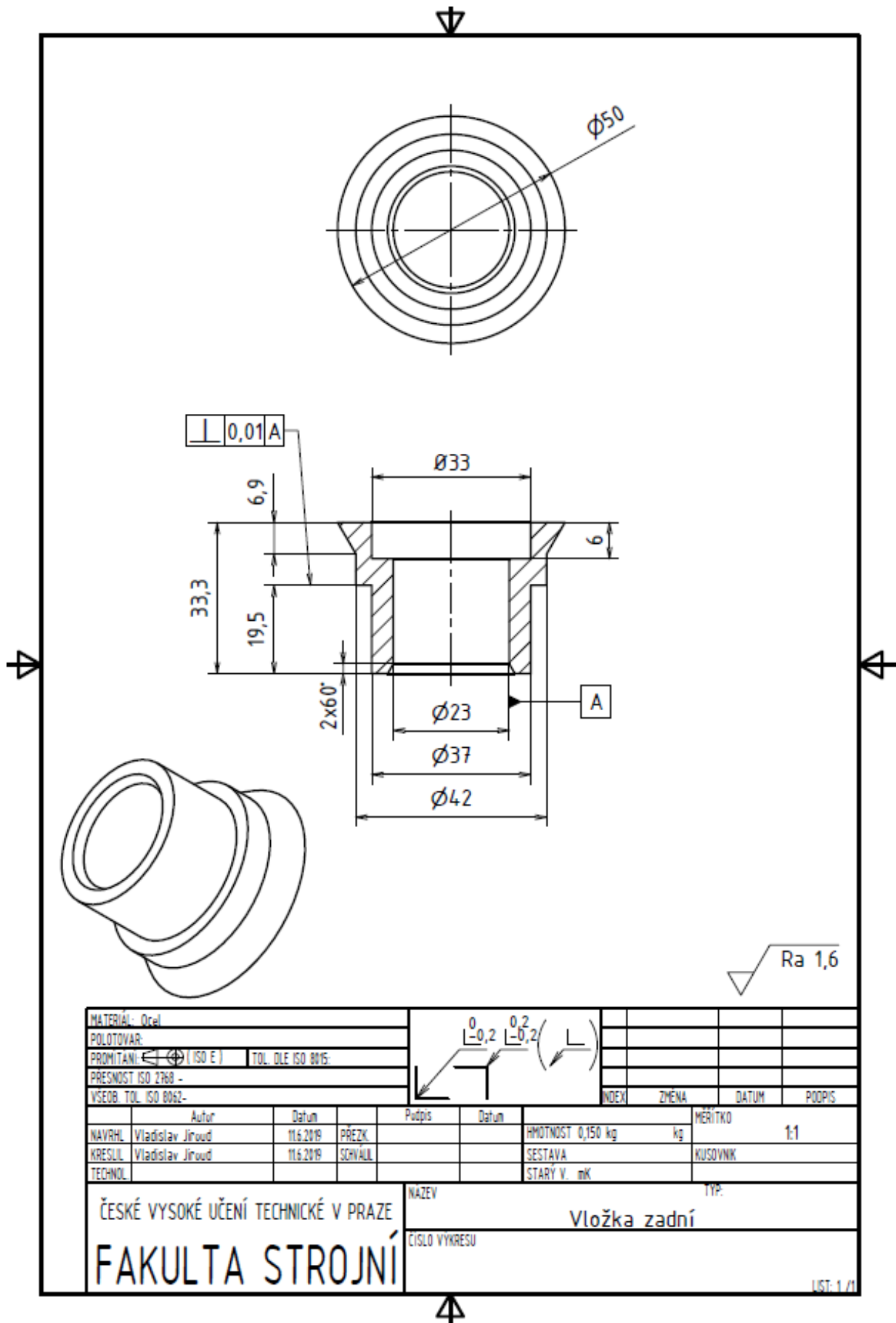
| | | | | | |
|--------------------------------------|--|-----------------|--|------|--|
| ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE | | NAZEV | | TYP: | |
| FAKULTA STROJNÍ | | Závitová vložka | | | |
| | | ČÍSLO VÝKRESU | | | |

LST-1 / 1

Příloha 5



Příloha 6



| | | | | | | | | | |
|--------------------------------------|------------------|--------------------|---------|---------------|-------------|----------|-------|----------|-----|
| MATERIAL: Ocel | | | | | | | | | |
| POLOTOVAR: | | | | | | | | | |
| PROMĚTANÍ: ⊕ (ISO E) | | TOL. DLE ISO 8015: | | | | | | | |
| PŘESNOST ISO 2768 - | | | | | | | | | |
| VSEOB. TOL. ISO 8062- | | | | | | | | | |
| | Autor | Datum | Podpis | Datum | INDEX | ZMENA | DATUM | PODPIS | |
| NAVRHL. | Vladislav Jiroud | 11.6.2019 | PŘEZK. | | HMOTNOST | 0,150 kg | kg | MĚŘÍTKO | 1:1 |
| KRESLIL. | Vladislav Jiroud | 11.6.2019 | SCHVÁL. | | SESTAVA | | | KUSOVNĚK | |
| TECHNOL. | | | | | STARÝ V. mK | | | | |
| ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE | | | | NÁZEV | | TYP: | | | |
| FAKULTA STROJNÍ | | | | Vložka zadní | | | | | |
| | | | | ČÍSLO VYKRESU | | | | | |

Příloha 7

| Verze | Verze0 | | Verze60 | | Verze60+ | | Verze60++ | |
|---------|-----------|----------|-----------|----------|-----------|----------|-----------|----------|
| Vrstva | Orientace | Tloušťka | Orientace | Tloušťka | Orientace | Tloušťka | Orientace | Tloušťka |
| | ° | mm | ° | mm | ° | mm | ° | mm |
| SpodniS | ±30 | 1 | ±30 | 1 | ±30 | 1 | ±30 | 1 |
| | ±45 | 1 | ±60 | 1 | ±45 | 1 | ±60 | 1 |
| | ±60 | 1 | ±45 | 1 | ±60 | 1 | ±60 | 1 |
| | ±30 | 1 | ±60 | 1 | ±60 | 1 | ±45 | 1 |
| | ±45 | 1 | ±30 | 1 | ±30 | 1 | ±60 | 1 |
| DruhaS | ±60 | 1 | ±60 | 1 | ±45 | 1 | ±60 | 1 |
| | ±30 | 1 | ±45 | 1 | ±60 | 1 | ±30 | 1 |
| TretiS | ±45 | 1 | ±60 | 1 | ±60 | 1 | ±60 | 1 |
| | ±60 | 1 | ±30 | 1 | ±30 | 1 | ±60 | 1 |
| CtvrtaS | ±30 | 1 | ±60 | 1 | ±45 | 1 | ±45 | 1 |
| | ±45 | 1 | ±45 | 1 | ±60 | 1 | ±60 | 1 |
| PataS | ±60 | 1,2 | ±60 | 1,2 | ±60 | 1,2 | ±60 | 1,2 |
| | ±30 | 1,2 | ±30 | 1,2 | ±30 | 1,2 | ±30 | 1,2 |
| SestaS | ±45 | 1 | ±60 | 1 | ±45 | 1 | ±60 | 1 |
| | ±60 | 1 | ±45 | 1 | ±60 | 1 | ±60 | 1 |
| | ±30 | 1 | ±60 | 1 | ±60 | 1 | ±45 | 1 |
| | ±45 | 1 | ±30 | 1 | ±30 | 1 | ±60 | 1 |
| ObalS | ±60 | 1,2 | ±60 | 1,2 | ±45 | 1,2 | ±60 | 1,2 |
| | ±30 | 1,2 | ±45 | 1,2 | ±60 | 1,2 | ±30 | 1,2 |

| Verze | Verzeultra | | Verzeultra+ | | Verzeultra++ | | Verzeultra+++ | |
|---------|------------|----------|-------------|----------|--------------|----------|---------------|----------|
| Vrstva | Orientace | Tloušťka | Orientace | Tloušťka | Orientace | Tloušťka | Orientace | Tloušťka |
| | ° | mm | ° | mm | ° | mm | ° | mm |
| SpodniS | ±30 | 1 | ±30 | 1 | ±30 | 1 | ±30 | 1 |
| | ±50 | 1 | ±50 | 1 | ±60 | 1 | ±60 | 1 |
| | ±60 | 1 | ±60 | 1 | ±50 | 1 | ±60 | 1 |
| | ±30 | 1 | ±60 | 1 | ±60 | 1 | ±50 | 1 |
| | ±50 | 1 | ±30 | 1 | ±30 | 1 | ±60 | 1 |
| DruhaS | ±60 | 1 | ±50 | 1 | ±60 | 1 | ±60 | 1 |
| | ±30 | 1 | ±60 | 1 | ±50 | 1 | ±30 | 1 |
| TretiS | ±50 | 1 | ±60 | 1 | ±60 | 1 | ±60 | 1 |
| | ±60 | 1 | ±30 | 1 | ±30 | 1 | ±60 | 1 |
| CtvrtaS | ±30 | 1 | ±50 | 1 | ±60 | 1 | ±50 | 1 |
| | ±50 | 1 | ±60 | 1 | ±50 | 1 | ±60 | 1 |
| PataS | ±60 | 1,2 | ±60 | 1,2 | ±60 | 1,2 | ±60 | 1,2 |
| | ±30 | 1,2 | ±30 | 1,2 | ±30 | 1,2 | ±30 | 1,2 |
| SestaS | ±50 | 1 | ±50 | 1 | ±60 | 1 | ±60 | 1 |
| | ±60 | 1 | ±60 | 1 | ±50 | 1 | ±60 | 1 |
| | ±30 | 1 | ±60 | 1 | ±60 | 1 | ±50 | 1 |
| | ±50 | 1 | ±30 | 1 | ±30 | 1 | ±60 | 1 |
| ObaS | ±60 | 1,2 | ±50 | 1,2 | ±60 | 1,2 | ±60 | 1,2 |
| | ±30 | 1,2 | ±60 | 1,2 | ±50 | 1,2 | ±30 | 1,2 |