



**FAKULTA  
STROJNÍ  
ČVUT V PRAZE**

**Ústav automobilů,  
spalovacích motorů  
a kolejových vozidel**

---

Návrh sloupku řízení pro vůz typu Formula  
Student

Design of steering column for a Formula  
Student car

BAKALÁRSKA PRÁCA  
2021

TERÉZIA ĎURKOVIČOVÁ

Študijný program: B2342 TEORETICKÝ ZÁKLAD STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
Študijný obor: 2301R000 Studijní program je bezoborový  
Vedúci práce: Ing. Lukáš Kazda

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Ďurkovičová** Jméno: **Terézia** Osobní číslo: **475096**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávající katedra/ústav: **Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel**  
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**  
Studijní obor: **bez oboru**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Návrh sloupku řízení pro vůz typu Formula Student**

Název bakalářské práce anglicky:

**Design of steering column for a Formula Student car**

Pokyny pro vypracování:

Proveďte rešerši konstrukčních možností sloupku řízení ve voze Formula Student.  
Proveďte zhodnocení stávajícího řešení sloupku ve voze FS.12 a možnosti jeho vylepšení.  
Upravte stávající řešení sloupku řízení a navrhnete nové uchycení sloupku řízení.  
Pro návrh využijte funkci topologické optimalizace pomocí metody konečných prvků.

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

**Ing. Lukáš Kazda, ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel FS**

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

Datum zadání bakalářské práce: **14.04.2021** Termín odevzdání bakalářské práce: **14.07.2021**

Platnost zadání bakalářské práce: **19.09.2021**

Ing. Lukáš Kazda  
podpis vedoucí(ho) práce

doc. Ing. Oldřich Vitek, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

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

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_  
Podpis studentky

## Anotačný záznam

|                                  |  |
|----------------------------------|--|
| <b>Meno:</b>                     | Terézia  |
| <b>Priezvisko:</b>               | Ďurkovičová  |
| <b>Názov práce v češtine:</b>    | Návrh sloupku řízení pro vůz typu Formula Student                |
| <b>Názov práce v angličtine:</b> | Design of steering column for a Formula Student car              |
| <b>Rozsah práce:</b>             | 43 strán<br>36 obrázkov<br>6 tabuliek                            |
| <b>Akademický rok:</b>           | 2020/2021  |
| <b>Ústav:</b>                    | 12 120 Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel |
| <b>Študijný program:</b>         | Teoretický základ strojního inženýrství                          |
| <b>Vedúci práce:</b>             | Ing. Lukáš Kazda   |
| <b>Kľúčové slová:</b>            | Formula Student, stĺpik riadenia, topologická optimalizácia      |
| <b>Key words:</b>                | Formula Student, steering column, topology optimization          |

## Abstrakt

Témou tejto bakalárskej práce je návrh stĺpiku riadenia pre voz určený na súťaže Formula Student. Konštrukcia stĺpiku riadenia sa odvíja od pravidiel súťaže a od dostupného zástavbového priestoru. V práci sú rozobraté možné konštrukčné riešenia stĺpikov riadenia, mechanizmy prenosu krútiaceho momentu a ich výhody a nevýhody. Pre návrh uchytenia stĺpiku riadenia bola využitá funkcia topologickej optimalizácie. Jej výsledok bol následne podrobený MKP analýze, na základe ktorej sa diel upravil tak, aby vydržal dané záťažové stavy.

## Abstract

The topic of this bachelor's thesis is design of a steering column for a car designated for Formula Student Competition. Design of the steering column depends on the competition rules and utilizable space. In the research section of the thesis, different designs of steering columns and torque transmission mechanisms are discussed. The steering column support was created using topology optimization. Based on the FEM analysis the result of topology optimization was then modified to withstand specific load cases.

## Čestné prehlásenie

Prehlasujem, že som bakalársku prácu na tému: „Návrh sloupku řízení pro vůz typu Formula Student“ vypracovala samostatne s použitím odbornej literatúry a prameňov, uvedených v zozname zdrojov, ktorý sa nachádza v poslednej kapitole tejto práce.

V Prahe dňa: \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

## Pod'akovanie

Chcela by som sa poďakovať vedúcemu mojej práce Ing. Lukášovi Kazdovi za vedenie práce a za jeho cenné rady a pripomienky pri jej vypracovaní.

Taktiež by som chcela poďakovať tímu CTU CarTech za možnosť pracovať na tejto téme a mojej rodine, ktorá mi umožnila študovať na vysokej škole a celé štúdium ma podporovala.

# Obsah

|   |    |
|---|----|
| 1. Úvod .....   | 8  |
| 2. Formula Student.....                                   | 9  |
| 3. Pravidlá týkajúce sa zostavy riadenia .....            | 11 |
| 4. Mechanizmus riadenia vo vozoch Formula Student .....   | 12 |
| 4.1 Krížový kĺb.....                                      | 12 |
| 4.2 Stĺpik riadenia vo voze FS.12 .....                   | 14 |
| 5. Návrh stĺpiku riadenia pre voz FS.13 .....             | 16 |
| 5.1 Analytický výpočet pevnosti jednotlivých dielov ..... | 18 |
| 5.1.1 Kontrola na krut u hriadelí .....                   | 18 |
| 5.1.2 Výpočet dĺžky drážkovania .....                     | 19 |
| 5.2 Voľba klzných ložisiek .....                          | 20 |
| 5.3 Návrh domčeku stĺpiku riadenia.....                   | 22 |
| 5.3.1 Návrh pomocou topologickej optimalizácie.....       | 23 |
| 5.3.2 Okrajové podmienky .....                            | 24 |
| 5.3.3 Zaťaženie .....                                     | 24 |
| 5.3.4 Výsledky topologickej optimalizácie.....            | 25 |
| 5.3.5 MKP výpočet.....                                    | 26 |
| 5.3.6 Výsledky MKP výpočtu .....                          | 27 |
| 5.3.7 Výsledky kontrolného MKP výpočtu.....               | 29 |
| 5.3.8 Výroba domčeku stĺpiku riadenia .....               | 32 |
| 6. Záver .....  | 33 |
| Zdroje .....  | 34 |
| Zoznam obrázkov .....                                     | 35 |
| Zoznam tabuliek .....                                     | 36 |
| Zoznam použitých veličín .....                            | 37 |
| Zoznam príloh.....  | 38 |

# 1. Úvod

Riadenie je neodmysliteľnou časťou každého vozidla, pretože zabezpečuje ovládanie jeho smeru. Úlohou stĺpiku riadenia v akomkoľvek vozidle je prenos rotačného pohybu vyvolaného vodičom na volante na mechanizmus, ktorý zabezpečuje pohyb kolies. Cieľom práce je navrhnúť stĺpik riadenia pre voz typu Formula Student, a preto v prvej časti rozoberiem možné konštrukčné riešenia stĺpikov používaných vo vozoch študentskej formuly, možnosti prenosu krútiaceho momentu a výhody a nevýhody jednotlivých riešení. V ďalšej časti sa budem venovať návrhu jednotlivých dielov a väčšia časť práce je zameraná na návrh uchytenia stĺpiku riadenia pomocou funkcie topologickej optimalizácie.



## 2. Formula Student

Formula Student (Formula SAE) je celosvetový projekt určený pre univerzity s technickým zameraním, ktorého cieľom je poskytnúť študentom možnosť vyskúšať si vedomosti nadobudnuté pri štúdiu v praxi. Študenti musia v pomerne krátkom časovom úseku podľa zadaných pravidiel navrhnuť, postaviť a otestovať voz formulového typu, s ktorým sa následne účastnia na pretekoch a súťažia proti tímom z celého sveta. Okrem získania technických znalostí sa študenti naučia pracovať v tíme a obhájiť si svoj návrh pred porotou tvorenou odborníkmi z automobilového priemyslu. Od svojho vzniku v roku 1981 sa do tohto projektu zapojilo viac než 600 univerzít z celého sveta. Tím CTU CarTech pôsobí na strojnej fakulte Českého vysokého učení technického v Praze od roku 2007 a pravidelne sa umiestňuje medzi dvadsiatimi najlepšimi tímami sveta.



Obrázok 1 Formula Student Česko 2019 [1]

Súťaž Formula Student je rozdelená na statické a dynamické disciplíny. Každá disciplína je bodovo ohodnotená a na základe súčtu bodov, ktoré tím získa zo všetkých disciplín sa určí výsledné poradie preteku. K statickým disciplínam patria:

- **Konštrukčný návrh** (Engineering Design Report, EDR) - je najdôležitejšou statickou disciplínou, pretože má najväčší vplyv na hodnotenie. Študenti musia odprezentovať a obhájiť ako celkový koncept vozu, tak návrh jednotlivých častí z konštrukčného hľadiska.
- **Business plán** - tím má za úlohu vytvoriť biznis plán vozu využívaného pre určitú činnosť a odprezentovať ho pred potenciálnymi investormi, ktorými sú porotcovia. Body sa získavajú za čo najoriginálnejší plán využitia vozu a za jeho obhájenie.
- **Cost Report** - obsahuje zoznam všetkých súčastí, z ktorých sa voz skladá a jeho podstatou je čo najlepšie pochopenie nákladov a technologických procesov spojených s výrobou vozu.

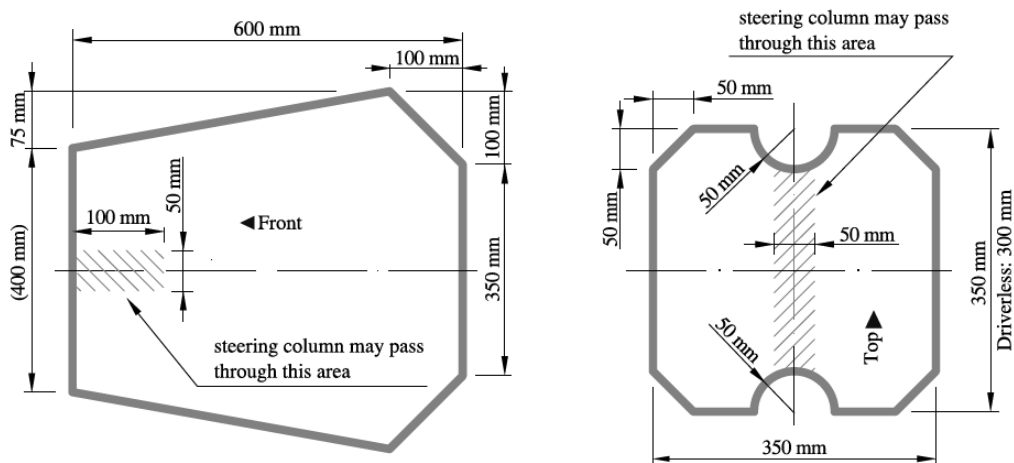
Dynamické disciplíny slúžia pre otestovanie rýchlosti a obratnosti vozu. Pri akcelerácii sa meria čas, za ktorý voz z pevného štartu prejde rovnú trať dlhú 75 m. Ďalšou disciplínou je skidpad, čo je jazda na trati v tvare osmičky, pričom sa meria priemerný čas prechádzania jednej zákruty. Pri autokrose sa testuje obratnosť vozu na trati vytýčenej kuželkami. Pilot zajazdí dve kolá a horší z nameraných časov sa vyškrtnú. Najdôležitejšou dynamickou disciplínou je endurance, v ktorom musí voz vydržať jazdiť bez poruchy 22 km a túto vzdialenosť zároveň zdolať v čo najkratšom čase.

[2]

### 3. Pravidlá týkajúce sa zostavy riadenia

V nasledujúcej časti uvádzam vybrané pravidlá, ktoré sú dôležité pre návrh stĺpiku riadenia pre voz Formuly Student. Ďalšie pravidlá týkajúce sa riadenia neuvádzam, pretože rozoberajú detailnejšie časti, ktoré nie sú predmetom riešenia tejto práce.

- Je zakázané použiť lanká alebo remene pre ovládanie systému riadenia.<sup>1</sup>
- Volant musí priamo mechanicky ovládať kolesá.
- Maximálna dovolená vôľa v mechanizme riadenia meraná na volante je 7°.
- Volant musí byť k stĺpiku riadenia pripojený pomocou tzv. rýchlospojky.
- Priestor pre vodiča musí byť dostatočne veľký na to, aby ním prešla šablóna na obrázku 2 vpravo od otvoru kokpitu po bod vzdialený 100 mm od najbližšej plochy na pedáloch v nestlačenej polohe. Šablóna sa môže pohybovať hore alebo dole. V prípade nastaviteľných pedálov musia byť tieto v najvzdialenejšej polohe.
- Otvor v kokpite musí byť dostatočne veľký na to, aby ním prešla šablóna na obrázku 2 vľavo zvislo od otvoru kokpitu až pod vrchný člen bočnej nárazovej štruktúry. [2]



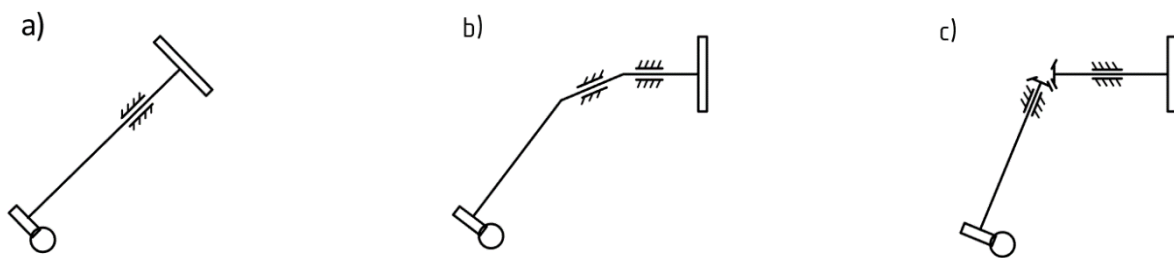
Obrázok 2 Šablóny vymedzujúce otvor kokpitu [2]

<sup>1</sup> Výnimka platí pre vozy kategórie „driverless“.

## 4. Mechanizmus riadenia vo vozoch Formula Student

Trate v súťaži Formula Student sú špecifické tým, že sú úzke a točité. Mechanizmus riadenia preto musí byť navrhnutý tak, aby vodičovi umožnil rýchle zmeny smeru jazdy, poskytol mu odozvu, ale zároveň aby neprenášal od kolies do volantu príliš veľké sily, kvôli ktorým by bolo riadenie fyzicky namáhavé.

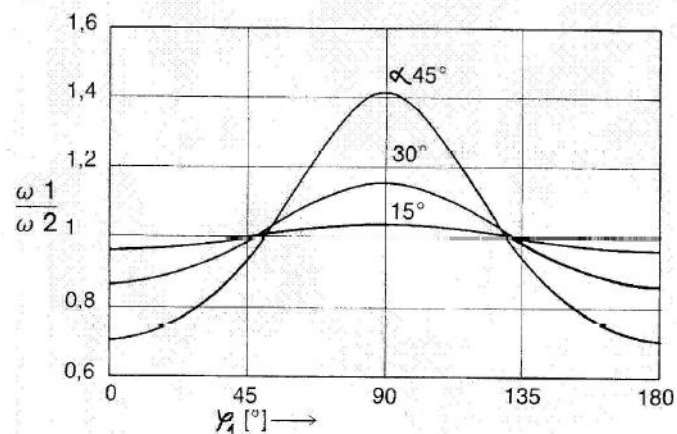
Možné konštrukčné riešenia stĺpiku riadenia vychádzajú z pravidiel, ktoré v kategórii vozov s pohonom motoru s vnútorným spaľovaním dovoľujú len priame mechanické prepojenie volantu s kolesami. Preto sa pre prenos krútiaceho momentu od volantu k hrebeňovej prevodovke využíva mechanizmus s priamou tyčou (obr. 3a) alebo so zalomenou tyčou, kde zlom je riešený pomocou kĺbov (obr. 3b) alebo prevodkou s ozubenými kolesami (obr. 3c). Najčastejšie používanými sú riešenia so zalomenou tyčou, a to najmä kvôli výhodnejšej polohe volantu a zástavbovému priestoru. Jednotlivé typy konštrukcie stĺpiku rozoberiem bližšie v nasledujúcej časti.



**Obrázok 3** Konštrukčné riešenia stĺpiku riadenia vo vozoch Formula Student – a) konštrukcia s priamou tyčou, b) konštrukcia so zalomenou tyčou s kĺbmi, c) konštrukcia so zalomenou tyčou s prevodkou s ozubenými kolesami

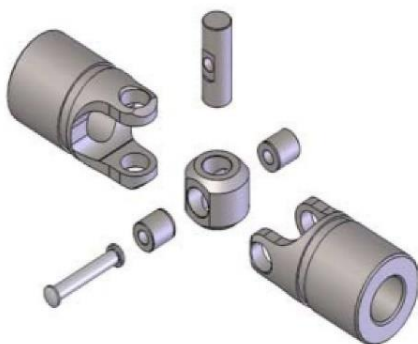
### 4.1 Krížový kĺb

Krížové kĺby sa používajú pre prenos rotačného pohybu medzi hriadeľmi, ktorých osi zvierajú určitý uhol. U kĺbov všeobecne je problém s nerovnomernosťou chodu, čo sa prejavuje v odchýlke uhlovej rýchlosti výstupného hriadeľu voči uhlovej rýchlosti vstupného hriadeľu (obr. 4). Táto odchýlka závisí od uhlu zlomu hriadeľov. Pri uhle zlomu  $\alpha=0^\circ$  je pomer uhlových rýchlostí  $\frac{\omega_1}{\omega_2} = 1$  a s rastúcim uhlom zlomu sa zväčšuje i odchýlka uhlových rýchlostí a zároveň sa výrazne znižuje životnosť kĺbu. V prípade použitia samostatného kĺbu v stĺpiku riadenia by sa preto v celom rozpätí chodu volantu  $\pm 90^\circ$  kvôli vysokému uhlu zlomu (viac než  $30^\circ$ ) neustále menil prevodový pomer. Toto spôsobuje rozdiel nielen uhlových rýchlostí, ale taktiež odchýlku momentu. Nerovnomernosť chodu môžeme eliminovať pridaním druhého kĺbu, resp. použitím jedného dvojitého kĺbu. [3]



**Obrázok 4** Závislosť pomeru uhlových rýchlostí na polovici jednej otáčky vstupného hriadeľa pri rôznych uhloch zlomu [3]

Konštrukcia kĺbov vo všeobecnosti pozostáva z dvoch prírub, na ktoré sa napoja vstupný a výstupný hriadeľ a stredového elementu v tvare krížu. Pripojenie hriadeľov na kĺb a prenos momentu môžu byť riešené rôznymi spôsobmi a líšia sa u každého výrobcu – pomocou prírub, pera, tvarových spojov (štvorhranov, šesťhranov, drážkovania), atď. Konštrukcia stredového elementu je taktiež rôznorodá. U bežne dostupných kĺbov je tvorený nábojom v tvare kocky s čapom a kolíkmi (obr. 5), buď s klznými puzdrami alebo ihlovými ložiskami alebo s krížom s ihlovými ložiskami (obr. 6). [4]

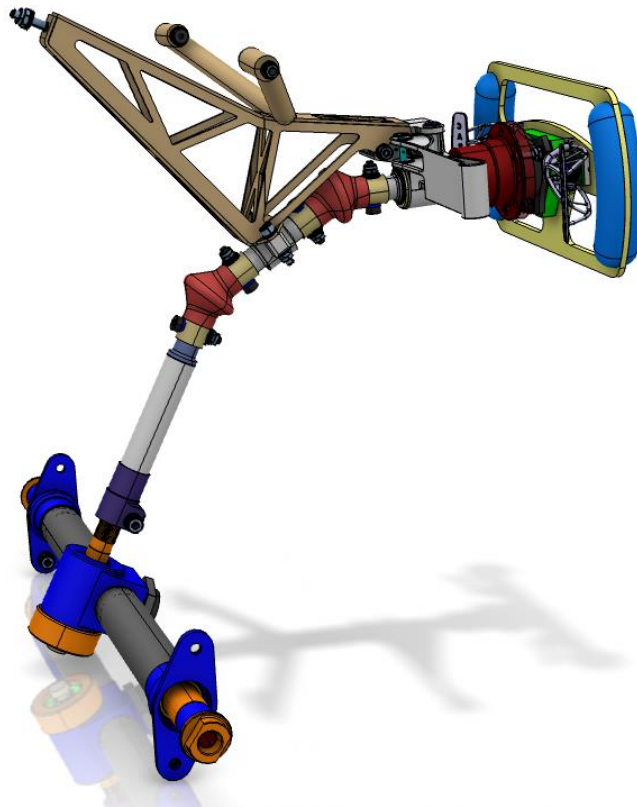


**Obrázok 5** Univerzálny samostatný kĺb so stredovým elementom v tvare kocky, s čapom a kolíkmi [4]



**Obrázok 6** Univerzálny samostatný kĺb s krížovým stredovým elementom s ihlovými ložiskami [5]

Na obr. 7 je znázornená zostava riadenia z vozu FS.06, kde boli použité dva samostatné kĺby. Uhol zlomu hriadeľov je  $30^\circ$ , pričom maximálny dovolený uhol zlomu u použitých kĺbov je  $33^\circ$ , takže v priebehu sezóny dochádzalo k ich nadmernému opotrebeniu, čo malo za následok vznik väčšej vôle, než je dovolené v pravidlách. Ďalším problémom bola poddajnosť zostavy, ktorú spôsobovali kĺby a preto, aby bola zostava dostatočne tuhá, muselo byť uchytenie stĺpiku k monokoku robustné. Uchytenie bolo vyrobené z oceľových výpalkov a trubiek a vážilo 0,557 kg. [6]

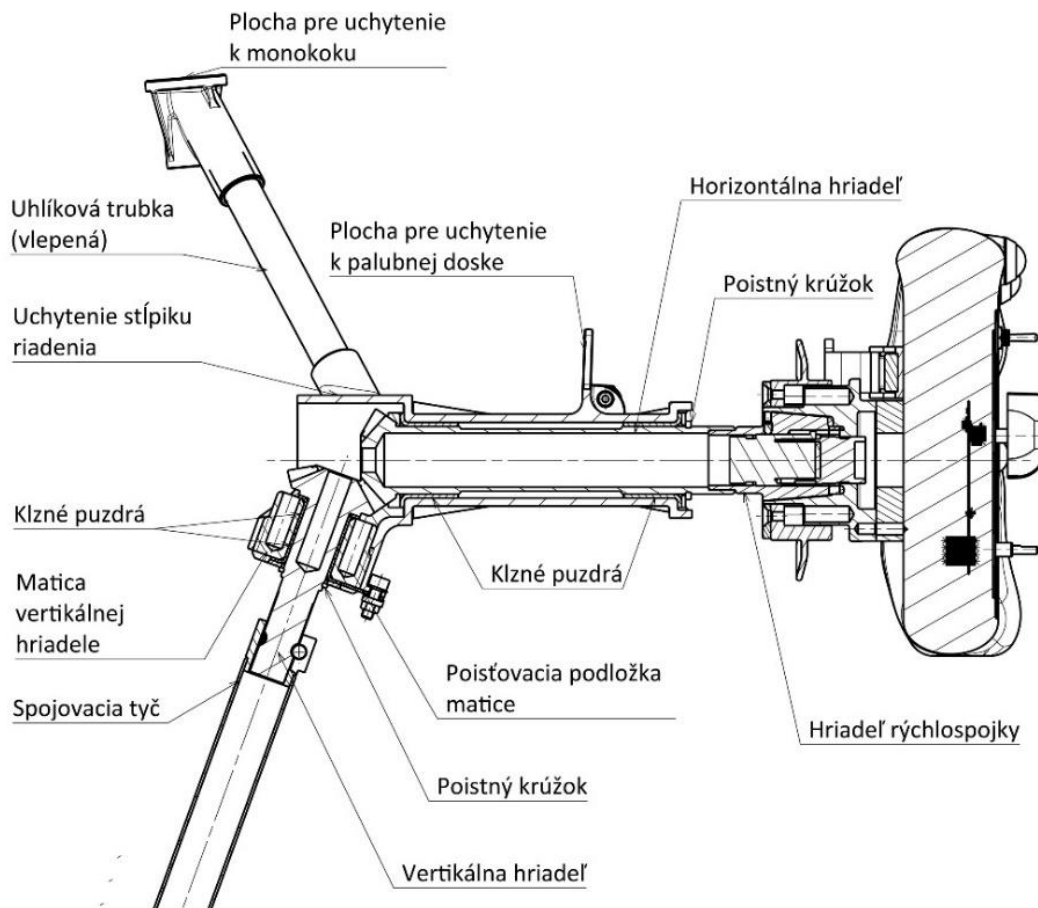


*Obrázok 7 Zostava stĺpiku riadenia vo voze FS.06*

## 4.2 Stĺpik riadenia vo voze FS.12

Na nasledujúcom obrázku je vidieť zalomenú tyč s prevodkou s kužeľovými ozubenými kolesami používanú v predošlom voze FS.12. Nevýhodou riešenia s prevodkou je, že ozubené kolesá sú náchylné na nepresnosti výroby, ktoré môžu zapríčiniť nesprávne zaberanie kolies, vďaka čomu sa môžu rýchlejšie opotrebovať. Preto musia byť všetky súčasti zostavy vyrobené s vysokou presnosťou, čo prináša ďalšiu nevýhodu, a to vyššie náklady na výrobu.

Pri montáži sa do domčeku vlisovali klzné puzdrá, následne sa do domčeku vložila horizontálna hriadeľ a jej poloha sa poistila poistným krúžkom. K horizontálnej hriadeľi sa prizvárala hriadeľ rýchlospojky, na ktorú sa napojil volant. Najväčšou nevýhodou tohto riešenia bolo, že po zvarení hriadele s rýchlospojkou už nebolo možné jednotlivé diely vybrať a v prípade opotrebenia ich vymeniť, čo bolo problémom hlavne u klzných puzdiel, ale taktiež vymedziť vôle vznikajúce v zostave v priebehu sezóny, a preto bolo potrebné túto konštrukciu upraviť.



**Obrázok 8** Zostava stájpiku riadenia vo voze FS.12

## 5. Návrh stájpiku riadenia pre voz FS.13

Požiadavky pre návrh:

- rozoberateľnosť sústavy
- zachovanie prevodového pomeru 1
- zníženie hmotnosti

Hlavnou podmienkou pre návrh stájpiku riadenia na voze FS.13 bolo, aby sa zostava mohla kedykoľvek v priebehu sezóny rozobrať, aby bolo možné vymeniť opotrebované diely za nové. Pre prenos momentu som sa rozhodovala medzi zachovaním prevodky s ozubenými kolesami alebo použitím kĺbov. U varianty s kĺbmi by som volila tie používané na voze FS.06 od výrobcu Apex Fasteners, a to buď ako dva samostatné alebo jeden dvojité kĺb, pretože sú vyrobené z vysokopevnostnej oceli, sú určené pre vojenský priemysel a pri porovnaní hmotnosti, pevnosti a životnosti s kĺbmi od iných výrobcov sú bezkonkurenčné. Pri rozhodovaní sa som brala do úvahy aj porovnanie nákladov a hmotností týchto dvoch riešení. Výroba horizontálnej a vertikálnej hriadele s ozubením na voze FS.12 stála dokopy 9 700 Kč. Cena dvoch kusov kĺbov alebo jedného dvojitého kĺbu sa pohybuje približne na úrovni 6 000 Kč, pričom pri uvažovaní len jednej náhrady v prípade poruchy a poplatkov spojených s dopravou, by cena dosahovala 15 000 Kč. V tab. 1 je uvedené porovnanie hmotností stájpikov riadenia na vozoch FS.06 a FS.12. Do výpočtu nezapočítavam hmotnosti rýchlospojky a volantu, pretože sa zameriavam na porovnanie hmotností tých dielov, ktoré závisia na danom konštrukčnom riešení stájpiku riadenia. [7]

*Tabuľka 1 Porovnanie hmotností zostáv stájpikov riadenia na vozoch FS.06 a FS.12*

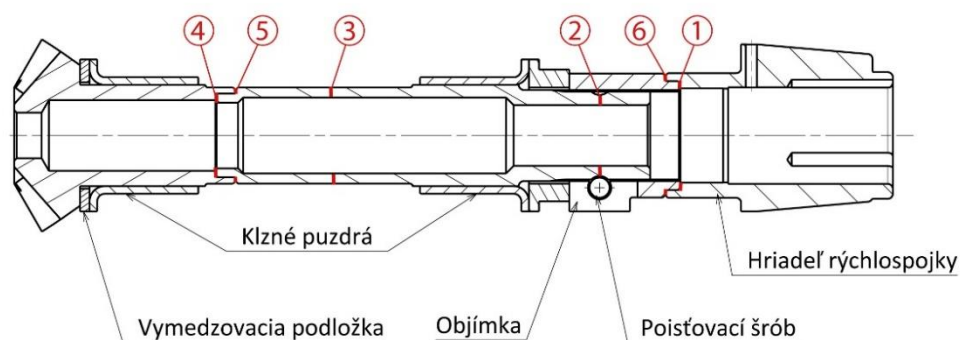
| FS.06                       |                 | FS.12                       |                 |
|-----------------------------|-----------------|-----------------------------|-----------------|
| Názov dielu                 | Hmotnosť m [kg] | Názov dielu                 | Hmotnosť m [kg] |
| Uchytenie stájpiku riadenia | 0,557           | Domček stájpiku riadenia    | 0,408           |
| Kĺby Apex MS 271 B12        | 0,164           |                             |                 |
| Hriadele                    | 0,378           | Hriadele (s ozubením)       | 0,399           |
| Páka spojky                 | 0,037           | Páka spojky                 | 0,049           |
| Insert                      | 0,03            | Matica vertikálnej hriadele | 0,048           |
| Protikus s drážkovaním      | 0,073           | Protikusy s drážkovaním     | 0,056           |
| Klzné puzdrá                | 0,044           | Klzné puzdrá                | 0,06            |
| Spojovací materiál          | 0,153           | Spojovací materiál          | 0,05            |
| <b>Celkom</b>               | <b>1,436</b>    | <b>Celkom</b>               | <b>1,07</b>     |



Pre prenos momentu na voze FS.13 som sa rozhodla zachovať prevodku s kužeľovými ozubenými kolesami s rovnakými parametrami ako na voze FS.12. Problém s nadmerným opotrebením kĺbov by sa síce dal vyriešiť použitím kĺbov s väčším priemerom, ale preto, aby sme mohli spoľahlivo určiť ich životnosť pri danom zaťažení, musel by sa postaviť testovací mechanizmus. Pretože výroba kĺbov trvá 12-14 týždňov, v čase, kedy sa s návrhom začínalo, to už nepripadalo do úvahy. Z konštrukčného hľadiska bolo problémom vyriešiť vedenie káblov napájajúcich volant, ktoré u prevodky s ozubenými kolesami prechádzajú dutým horizontálnym hriadeľom. Ďalším dôvodom bol zástavbový priestor, ktorý sa od vozu FS.06 zmenšil kvôli zníženiu hodnoty rázvoru z 1578 mm na 1530 mm. Pri maximálnom uhle zlomu kĺbov 30° by sa táto zmena musela kompenzovať pozíciou volantu, a to natočením o 4-5°, čo by nevyhovovalo pilotom. Ozubené kolesá vydržali celú sezónu FS.12 bez známok poškodenia.

Pre splnenie podmienky možnosti rozobratia zostavy, pripadali do úvahy dve možnosti návrhu stĺpiku riadenia. Prvou bol delený domček zložený z dvoch častí, ktoré by boli spojené šróbovými spojmi. Horizontálna hriadeľ by zostala zachovaná – spojila by sa s rýchlospojkou zvarom rovnako, ako tomu bolo na predošlom voze. Avšak aby bolo možné vymontovať klzné puzdrá a vymedzovacie podložky, museli by byť taktiež delené, čo prinieslo návrhové a technologické problémy spojené so zaistením ich správnej funkcie.

Druhou možnosťou bolo navrhnuť delenú horizontálnu hriadeľ. V tomto prípade by bol domček z jedného kusu a mohli by sa tak použiť bežne dostupné klzné puzdrá a vymedzovacie podložky. Z hľadiska konštrukcie domčeku a jednoduchšieho prístupu bolo najlepšou možnosťou rozdeliť hriadeľ medzi volantom a palubovou doskou, a to v mieste spoja hriadele a rýchlospojky. Pre prenos krútiaceho momentu sa zvolilo evolventné drážkovanie s čo najväčším počtom zubov, pre čo najpresnejšie nastavenie polohy volantu. Správnu vzdialenosť volantu od palubovej dosky vymedzuje podložka a hriadele sú zaistené svorným spojom so šróbom. Pre zjednodušenie výroby je horizontálna hriadeľ rozdelená na dve časti – časť s kužeľovým ozubeným kolesom a samotnú hriadeľ s drážkovaním. Tieto dve časti sú spojené zvarovým spojom. Vertikálnu hriadeľ s ozubením a jej zaistenie v domčeku pomocou matice a poistného krúžku ponechám bez zmeny.

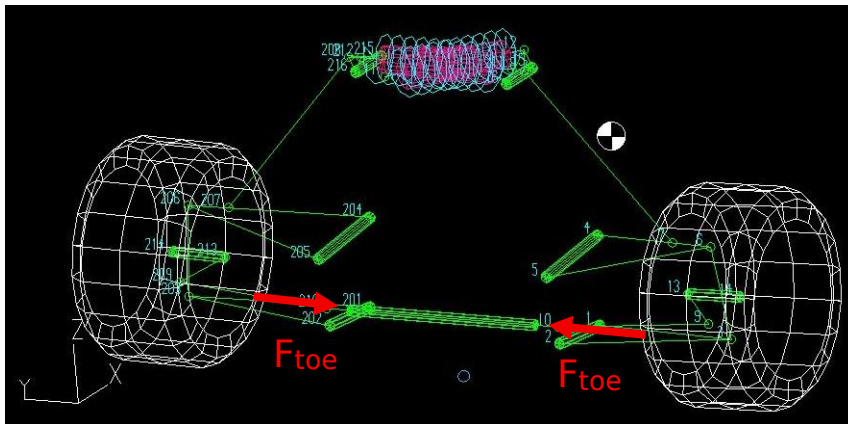


Obrázok 9 Zostava horizontálnej hriadele s vyznačenými miestami kontroly na krut

## 5.1 Analytický výpočet pevnosti jednotlivých dielov

### 5.1.1 Kontrola na krut u hriadelí

Hodnota maximálneho krútiaceho momentu, na ktorú sa zostava riadenia navrhuje je 65 Nm. Táto hodnota vychádza z namáhania hrebeňu od kolies silou  $F_{toe}$ , ktorá bola získaná z kinematického modelu náprav. Sila sa vynásobila hodnotou bezpečnosti 5, čo je zo skúsenosti z predošlých rokov dostatočná bezpečnosť pre návrh dielov zostavy riadenia.



Obrázok 10 Kinematická schéma náprav na voze FS.13



Obrázok 11 Hriadeľ rýchlospojky [8]

Obe časti horizontálnej hriadele a objímka sú vyrobené z ocele 42CrMo4 s medzou klzu 750 MPa, polotovarom pre rýchlospojku je kupovaný diel od výrobcu Krontec (obr. 11) vyrobený z oceli 25CrMo4 s medzou klzu 600 MPa. Podľa Trescovej podmienky pevnosti ( $\tau_{MAX}$ ) vyjde pre oceľ 42CrMo4 medzné šmykové napätie  $\tau_k = 375$  MPa a pre oceľ 25CrMo4 je  $\tau_k = 300$  MPa. Zo zvolenej bezpečnosti voči medzi klzu  $k = 2$  potom plynie, že maximálne dovolené šmykové napätie pre 42CrMo4 je  $\tau_D = 187,5$  MPa a pre 25CrMo4 je  $\tau_D = 150$  MPa.

Tabuľka 2 Pevnostné vlastnosti ocelí 25CrMo4 a 42CrMo4

| Materiál | Medza klzu $\sigma_k$<br>[MPa] | Medzné šmykové napätie $\tau_k$<br>[MPa] | Dovolené šmykové napätie $\tau_D$<br>[MPa] |
|----------|--------------------------------|--|--|
| 42CrMo4  | 750                            | 375                                      | <b>187,5</b>                               |
| 25CrMo4  | 600                            | 300                                      | <b>150</b>                                 |

#### Kontrola v kritických miestach

V tabuľke 3 sú uvedené hodnoty šmykového napätia v miestach s kritickým prierezom vyznačených na obr. 9, kde

krútiaci moment je  $M_k = 65\,000$  Nmm,

pre prierezový modul v krute platí

$$W_k = \frac{\pi \cdot D^3}{16} \left( 1 - \left( \frac{d}{D} \right)^4 \right) \quad (1)$$

a pre šmykové napätie platí

$$\tau_k = \frac{M_k}{W_k} \quad (2)$$

Tabuľka 3 Hodnoty šmykového napätia v miestach s kritickým prierezom

|                          | 1      | 2      | 3      | 4      | 5      | 6        |
|--------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|----------|
| D [mm]                   | 21,5   | 16,2   | 19     | 16,5   | 19     | 24,6     |
| d [mm]                   | 18,25  | 13     | 15,5   | 13     | 16,5   | 21,5     |
| $W_k$ [mm <sup>3</sup> ] | 938,62 | 488,62 | 750,27 | 542,15 | 580,79 | 1 217,56 |
| $\tau_k$ [MPa]           | 69,3   | 133    | 86,6   | 119,9  | 111,9  | 53,4     |

### 5.1.2 Výpočet dĺžky drážkovania

Pre prenos krútiaceho momentu som zvolila evolventné drážkovanie 18x0,5x9H ISO 4156. Minimálnu činnú dĺžku drážkovania som spočítala z rovnice

$$l_{min} = \frac{4 \cdot M_k}{s' \cdot (D + d) \cdot p_D} = 6,28 \text{ mm} , \quad (3)$$

kde  $M_k = 65\,000 \text{ Nmm}$ ,  $s' = 14,875 \text{ mm}^2$ ,  $D = 18,25 \text{ mm}$ ,  $d = 16,55 \text{ mm}$

a  $p_D$  som zvolila podľa tabuľky na obr. 12 pre nepohyblivé spojenie, tvrdený povrch a striedavé zaťaženie ako najnižšiu hodnotu daného rozmedzia, a to 80 MPa. [9]

Celková návrhová dĺžka drážkovania je  $l = 11 \text{ mm}$ .

|                                 | provozní režim | povrch    |           |
|---------------------------------|----------------|-----------|-----------|
|                                 |                | netvrzený | tvrzený   |
| spojení nepohyblivé             |                | 35 ÷ 50   | 40 ÷ 80   |
|                                 |                | 50 ÷ 80   | 80 ÷ 130  |
|                                 |                | 80 ÷ 120  | 130 ÷ 200 |
| spojení pohyblivé bez zatížení  |                | 10 ÷ 15   | 15 ÷ 30   |
|                                 |                | 15 ÷ 25   | 30 ÷ 50   |
|                                 |                | 25 ÷ 40   | 50 ÷ 70   |
| spojení pohyblivé pod zatížením |                |           | 3 ÷ 7     |
|                                 |                |           | 7 ÷ 15    |
|                                 |                |           | 15 ÷ 30   |

Obrázok 12 Hodnoty dovoleného tlaku na bokoch pier a drážok [9]

## 5.2 Voľba klzných ložísk

Na základe návrhových výpočtov som pre horizontálnu hriadeľ zvolila klzné puzdrá SKF PCMF 202321.5 E s dynamickou únosnosťou  $C = 31 \text{ kN}$  a statickou únosnosťou  $C_0 = 95 \text{ kN}$ .

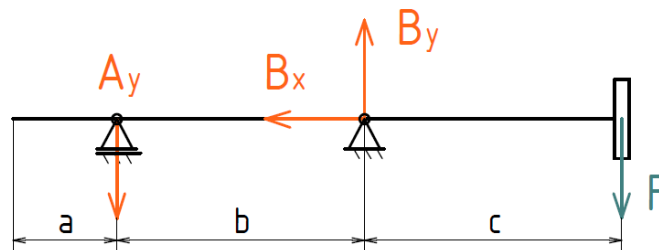
Zaťaženie ložísk som počítala z dvoch záťažných stavov:

- a) Prvým stavom je, keď sa pilot zavesí za volant, pričom vyvodí silu  $F$ .

Veľkosť tejto sily som získala vynásobením vrchnej časti tela pilota maximálnym zrýchlením  $a_{LAT} = 2,8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$  a koeficientom bezpečnosti  $k = 5$ .

$$F = m \cdot a_{LAT} \cdot k = 700 \text{ N} \quad (4)$$

$$F = 700 \text{ N}, a = 21 \text{ mm}, b = 67,5 \text{ mm}, c = 66,5 \text{ mm}$$



Obrázok 13 Horizontálna hriadeľ - zaťaženie od pilota

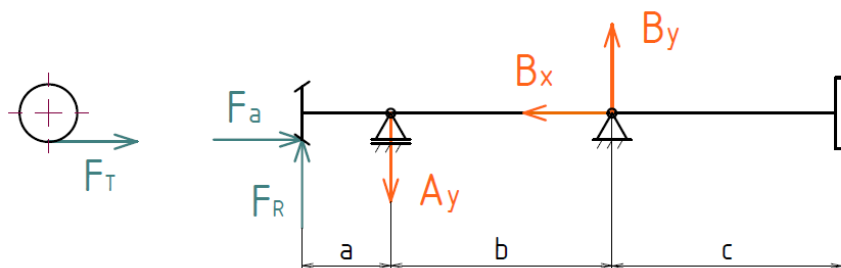
$$x: \quad B_x = 0 \quad (5)$$

$$y: \quad B_y = A_y + F = 1\,389,63 \text{ N} \quad (6)$$

$$M_B: \quad A_y = \frac{F \cdot c}{b} = 689,63 \text{ N} \quad (7)$$

- b) Druhým stavom je zaťaženie od síl vznikajúcich v ozubení pri pôsobení momentu  $M_k = 65 \text{ Nm}$ .

Parametre kužeľového ozubenia: stredný priemer  $d_m = 29 \text{ mm}$ , uhol osí hriadeľov  $\delta = 110^\circ$  a uhol záberu  $\alpha_z = 20^\circ$ .



Obrázok 14 Horizontálna hriadeľ - zaťaženie od ozubenia

Sily vznikajúce v ozubení:

Tangenciálna sila: 
$$F_T = \frac{2 \cdot M_k}{d_m} = 4\,482,76 \text{ N} \quad (8)$$

Axiálna sila: 
$$F_a = F_T \cdot \operatorname{tg} \alpha_z \cdot \sin \frac{\delta}{2} = 1\,336,52 \text{ N} \quad (9)$$

Radiálna sila: 
$$F_R = F_T \cdot \operatorname{tg} \alpha_z \cdot \cos \frac{\delta}{2} = 935,84 \text{ N} \quad (10)$$

Výpočet reakcií v podporách:

x: 
$$B_x + F_a = 0 \quad (11)$$

y: 
$$B_y + F_R - A_y = 0 \quad (12)$$

$M_B$ : 
$$-A_y \cdot b + F_R (a + b) - F_a \cdot \frac{d_m}{2} = 0 \quad (13)$$

**Tabuľka 4** Horizontálna hriadeľ - reakcie pri zaťažení od ozubenia

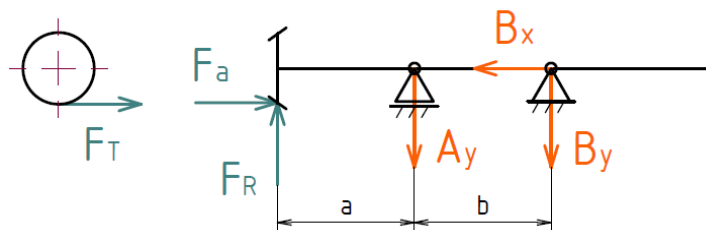
| Reakcia $B_x$ | Reakcia $B_y$ | Reakcia $A_y$ |
|---------------|---------------|---------------|
| 1 336,52 N    | 4,05 N        | 939,9 N       |

Tieto záťažové stavy nenastávajú spolu v jednom časovom okamihu, maximálna reakcia vzniká v podpore B od prvého záťažového stavu a jej veľkosť je  $B_y = 1\,389,63 \text{ N}$ . Táto hodnota je oveľa menšia ako hodnoty statickej a dynamickej únosnosti zvolených klzných puzdiar a môžu sa teda použiť.

Pre vertikálnu hriadeľ som ponechala klzné puzdrá SKF PCMF 161812 E s dynamickou únosnosťou  $C = 12,2 \text{ kN}$  a statickou únosnosťou  $C_0 = 38 \text{ kN}$ .

Výpočet reakcií v podporách od síl vznikajúcich v ozubení:

$a = 13,9 \text{ mm}$ ,  $b = 14 \text{ mm}$



**Obrázok 15** Vertikálna hriadeľ - zaťaženie od ozubenia

$$x : \quad B_x - F_a = 0 \quad (14)$$

$$y : \quad F_R - A_y - B_y = 0 \quad (15)$$

$$M_A : \quad F_a \cdot \frac{d_s}{2} - F_R \cdot a - B_y \cdot b = 0 \quad (16)$$

*Tabuľka 5 Vertikálna hriadeľ - reakcie pri zaťažení od ozubenia*

| Reakcia B <sub>x</sub> | Reakcia A <sub>y</sub> | Reakcia B <sub>y</sub> |
|------------------------|------------------------|------------------------|
| 1 336,52 N             | 480,74 N               | 455,1 N                |

Maximálne zaťaženie klzného púzdra v smere y je v podpere A, kde  $A_y = 480,74$  N, čo je pri statickej únosnosti  $C = 12,2$  kN a dynamickej únosnosti  $C_0 = 38$  kN zvolených puzdier dostatočne vyhovujúce.

### 5.3 Návrh domčeku stĺpiku riadenia

Kvôli zmenám v zostave horizontálnej hriadele a taktiež zmene tvaru monokoku bolo potrebné navrhnuť nové uchytenie stĺpiku riadenia, ktoré bolo na predošlom voze zbytočne predimenzované a naopak v určitých miestach vznikali extrémny napätia nad dovolené medze. Podmienkou pre návrh bolo, aby bol domček v celku – z jedného kusu. Keďže sa bude vyrábať technológiou aditívnej výroby (metódou SLM – Selective Laser Melting), pre návrh použijem metódu topologickej optimalizácie. Tvarová zložitosť dielu pri 3D tlači nie je takmer nijak obmedzená, a preto je spojenie topologickej optimalizácie s aditívnou výrobou pre návrh uchytenia stĺpiku riadenia výhodnou voľbou. Ďalšou výhodou 3D tlači je, že náklady na výrobu nezávisia na zložitosti tvaru dielu, ako je tomu u konvenčného obrábania, ale na objeme použitého materiálu. Materiál použitý na výrobu domčeku je hliníková zliatina AlSi10Mg (CL 31AL) vo forme prášku. Pevnostné vlastnosti závisia na tepelnom spracovaní dielu a sú uvedené v tabuľke 6. [10]

Tabuľka 6 Vlastnosti materiálu Cl31Al pri rôznych spôsoboch tepelného spracovania [11]

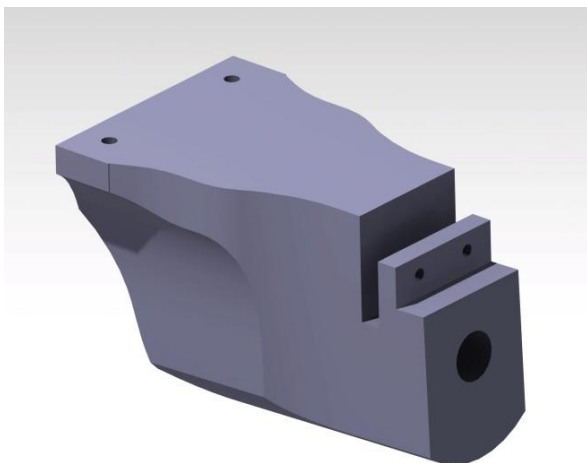
| Režim žihání  | R <sub>p0,2</sub> [MPa] | R <sub>m</sub> [MPa] | A [%]      | HV1     |
|---------------|-------------------------|----------------------|------------|---------|
| 0 (as-built ) | 246 ± 2                 | 402 ± 26             | 9,4 ± 2,9  | 132 ± 7 |
| T (240°C/6h)  | 261 ± 10                | 382 ± 16             | 9,8 ± 0,5  | 121 ± 3 |
| Z (240°C/2h)  | 257 ± 12                | 352 ± 21             | 10,2 ± 1,1 | 117 ± 2 |
| E (300°C/2h)  | 217 ± 4                 | 323 ± 5              | 11,6 ± 1,9 | 96 ± 5  |

Z tejto tabuľky určím maximálne dovolené napätie, na ktoré budem domček navrhovať. Pretože by pri tepelnom spracovaní hrozilo zdeformovanie tvaru, diel sa tepelne nespracuje a budem teda vychádzať z hodnôt bez tepelnej úpravy - 0 (as-built). Najnižšia medza klzu je potom  $\sigma_k = 246 - 2 = 244$  MPa a medza pevnosti  $\sigma_p = 402 - 26 = 376$  MPa. Uchytenie budem dimenzovať na medzu únavy, pre ktorú pri striedavom zaťažení platí

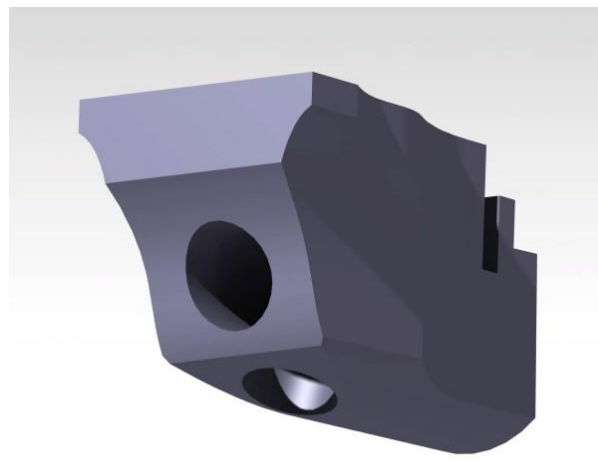
$$\sigma_c = 0,33 \cdot \sigma_p = \mathbf{124\ MPa} \quad (17)$$

### 5.3.1 Návrh pomocou topologickej optimalizácie

Diel som navrhovala pomocou programu Ansys Workbench. Vstupný model do optimalizácie som vytvorila na základe zástavbového priestoru, ktorý je obmedzený tvarom monokoku a priestorom určeným v pravidlách šablónami na obr. 2. Do modelu som doplnila len plochy, na ktoré budem zadávať okrajové podmienky a zaťaženie, a to diery pre hriadele a diery pre šróby, ktorými bude domček uchytený k palubnej doske a k monokoku.



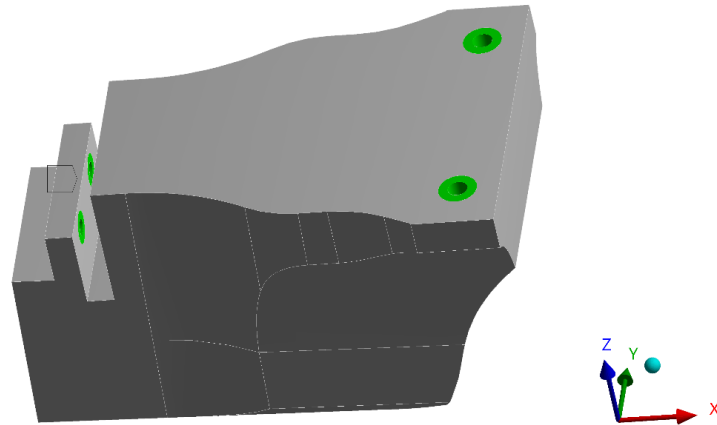
Obrázok 16 Vstupný model pre topologickú optimalizáciu



Obrázok 17 Vstupný model pre topologickú optimalizáciu

### 5.3.2 Okrajové podmienky

Domček bude pevne prišróbovaný k monokoku a nebude sa teda môcť posúvať alebo rotovať v akomkoľvek smere. Preto som plochy, ktorými bude pripevnený k monokoku zadala ako pevné podpory, ktoré mu odoberajú všetky stupne voľnosti.



Obrázok 18 Okrajové podmienky – vyznačené plochy zadané ako pevné podpory

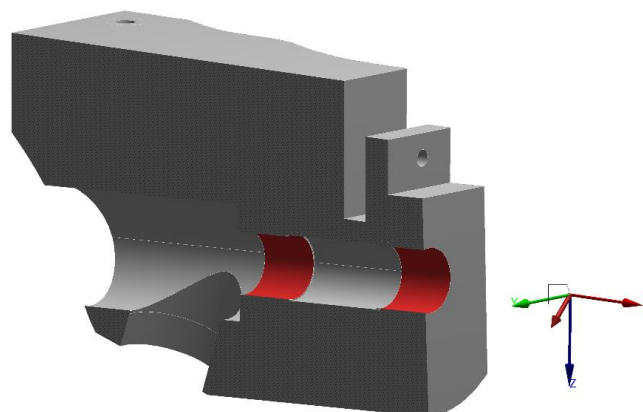
### 5.3.3 Zaťaženie

Diel som optimalizovala na dva záťažové stavy - zaťaženie od pilota a od síl vznikajúcich v ozubení pri pôsobení krútiaceho momentu  $M_k = 65 \text{ Nm}$ .

#### 1. Zaťaženie od pilota:

Nastávajú dve situácie, kedy sa pilot zavesí na volant, a to pri prejazde zákrutou (smer osy Y) a pri zaťažení smerom dolu (v smere osy Z), pričom v oboch prípadoch vyvodí silu  $F = 700 \text{ N}$ . Pôsobisko týchto síl som zadala do stredu volantu. Hriadeľ som uvažovala ideálne tuhú a ako namáhané plochy som vybrala plochy pod klznými puzdrami.

Remote Force: 989,95 N  
Components: 0,;700,;700, N  
Location: 0,, 0,, 0, mm

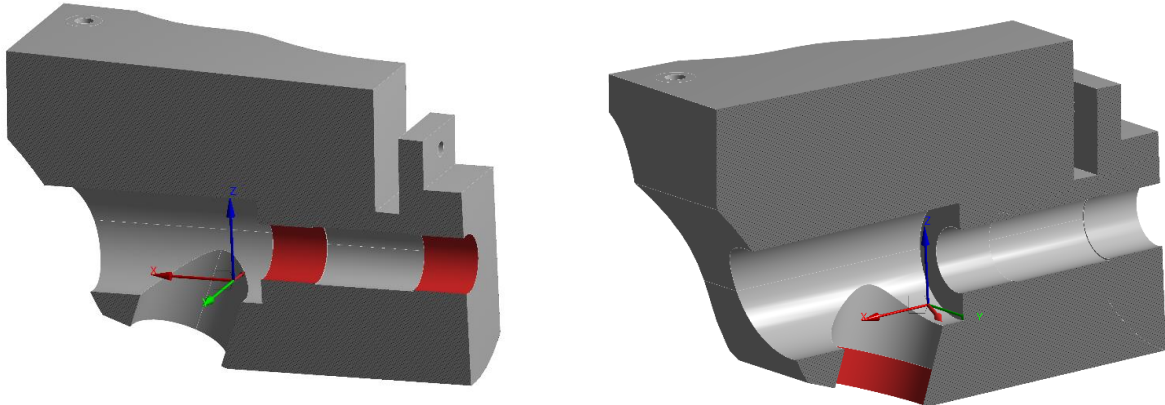


Obrázok 19 Zaťaženie silami od pilota zadaných ako remote force



## 2. Zaťaženie od ozubenia:

U zaťaženia od síl v ozubení som si najprv z modelu zostavy zistila bod záberu ozubených kolies. Následne som tento bod vložila do výpočtového modelu v Ansyse a použila ho ako pôsobisko pre jednotlivé zložky síl, ktoré som spočítala pomocou rovníc (8), (9) a (10). Prvú silu som zadala na plochy pod klznými puzdrami na horizontálnej hriadeľi (obr. 20 vľavo) a rovnako veľkú, ale opačne orientovanú reakciu som zadala na vertikálnu hriadeľ (obr. 20 vpravo).

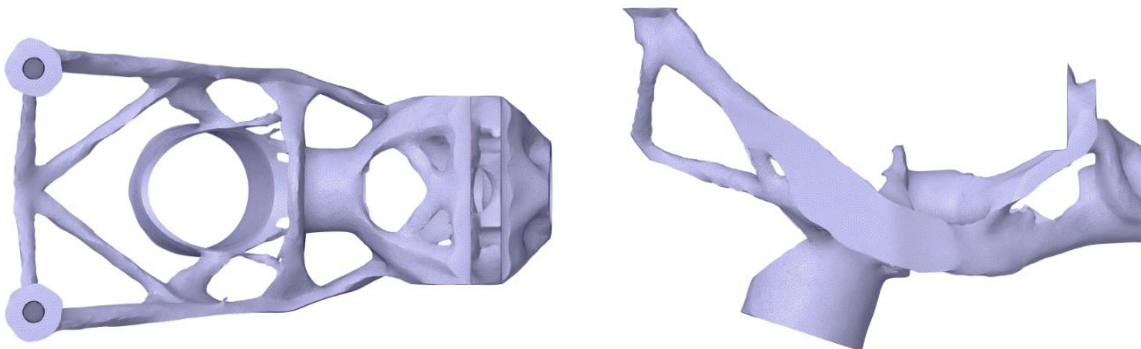


*Obrázok 20 Zaťaženie od ozubenia, silové zložky zadané ako remote force*

Kvôli zložitému tvaru dielu som použila univerzálnu sieťovacia metódu s elementami v tvare štvorstenu s veľkosťou elementu 3 mm. Ďalej som zadala podmienky topologickej optimalizácie. Za oblasti, ktoré majú byť zachované som zvolila plochy pre klzné puzdrá na horizontálnej a vertikálnej hriadeľi a diery úchytných bodov k monokoku a palubnej doske. Pre zachovanie optimálneho záberu ozubených kolies som na plochách klzných puzdier pripustila maximálnu deformáciu 0,2 mm. Nakoniec som vložila podmienku symetrie dielu podľa roviny XZ.

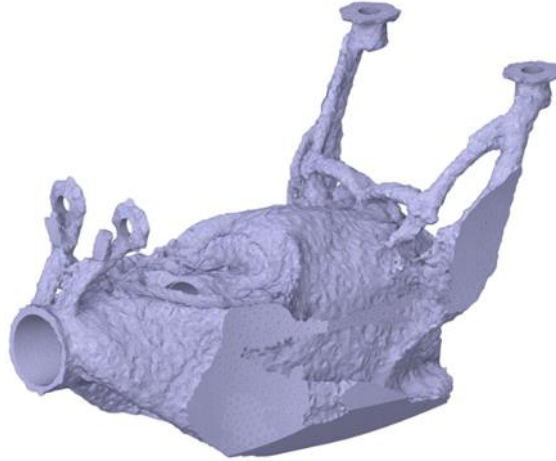
### 5.3.4 Výsledky topologickej optimalizácie

Na obrázku 21 je výsledok topologickej optimalizácie pri zaťažení od pilota, pričom hmotnosť dielu je 0,28 kg. Výsledok skonvergoval po 57 iteráciách.



*Obrázok 21 Výsledok topologickej optimalizácie pre zaťaženie od pilota*

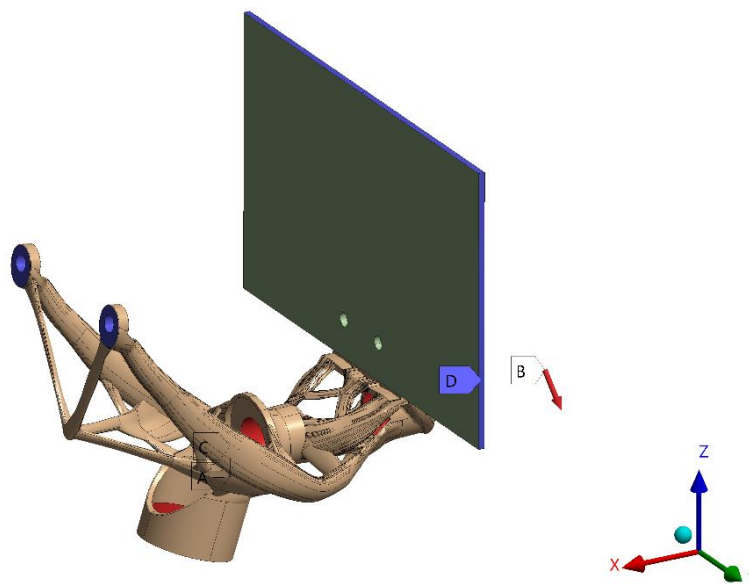
Optimalizovaný diel na druhý záťažový stav je vidieť na obr. 22. Tento výsledok má hmotnosť 0,49 kg a pre návrh nového domčeku ho považujem za nepoužiteľný. Preto som sa rozhodla vychádzať z výsledku optimalizácie pre prvý záťažový stav, ktorý následne podrobím MKP výpočtu pri zaťažení od ozubenia a upravím tak, aby tomuto zaťaženiu vyhovel.



*Obrázok 22* Výsledok topologickej optimalizácie pre zaťaženie od ozubených kolies

### 5.3.5 MKP výpočet

Výsledok topologickej optimalizácie som vyhladila pomocou softvéru SpaceClaim a vyexportovala obrysové plochy vo formáte stl. Súbor som vložila do CAD programu CATIA V5 a použila ho ako predlohu pre vytvorenie 3D modelu, ktorý už bolo možné použiť pre MKP výpočet. Záťažové stavy som uvažovala rovnaké ako pri topologickej optimalizácii. Pri MKP analýze som navyše zohľadnila poddajnosť palubnej dosky, pretože má nezanedbateľný vplyv na namáhanie dielu. V tomto prípade som zadala okraj palubnej dosky ako pevnú väzbu a dotýkajúce sa plochy domčeku



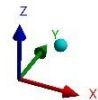
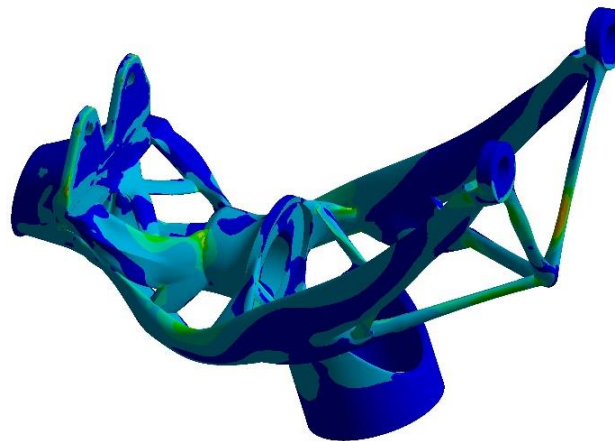
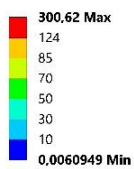
*Obrázok 23* Zadané okrajové podmienky a zaťaženie MKP výpočtu

a palubnej dosky som spojila pomocou väzby bonded, aby sa voči sebe nemohli posunúť, čo v skutočnosti odpovedá šróbovému spojeniu dielov. Pri analýze som sledovala napätie, kde maximálne dovolené napätie odpovedá medzi únavy  $\sigma_D = \sigma_c = 124 \text{ MPa}$  a celkovú deformáciu, ktorá by nemala prekročiť  $0,3 \text{ mm}$ .

### 5.3.6 Výsledky MKP výpočtu

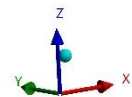
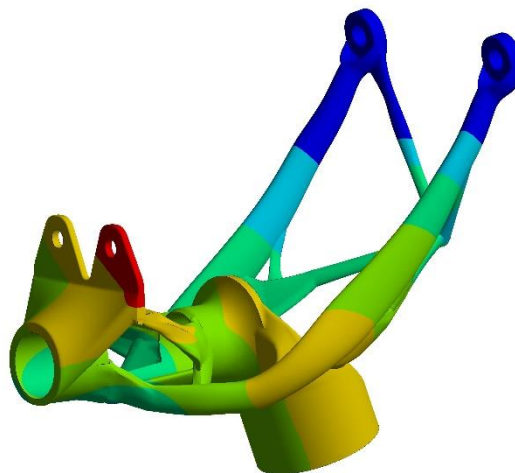
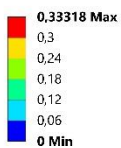
#### 1. Prvý záťažový stav - od pilota

**A: Static Structural**  
Equivalent Stress  
Type: Equivalent (von-Mises) Stress  
Unit: MPa



Obrázok 24 MKP analýza - napätie, zaťaženie od pilota

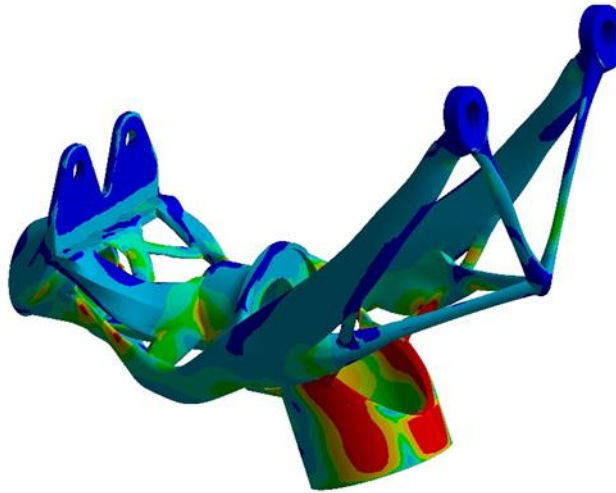
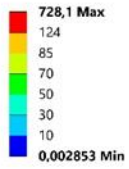
**A: Static Structural**  
Total Deformation  
Type: Total Deformation  
Unit: mm



Obrázok 25 MKP analýza - celková deformácia, zaťaženie od pilota

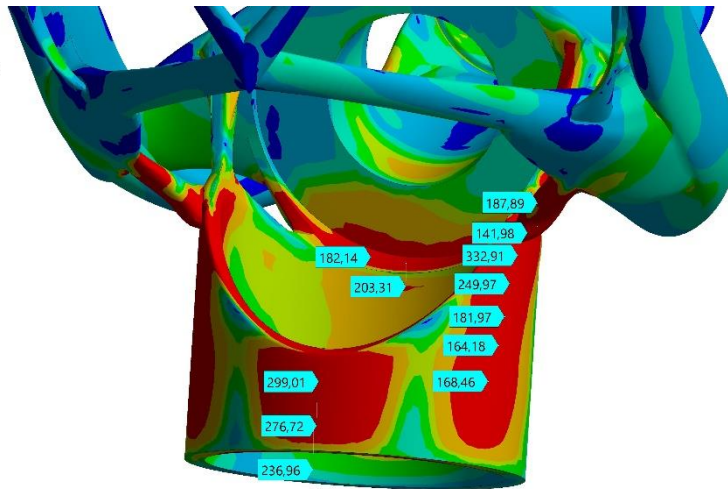
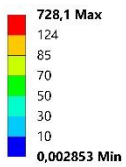
## 2. Druhý zátiažový stav – od ozubenia

C: Static Structural  
Equivalent Stress  
Type: Equivalent (von-Mises) Stress  
Unit: MPa



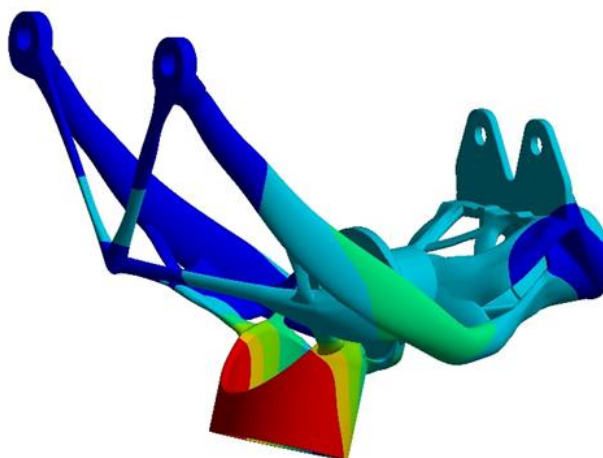
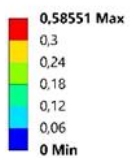
Obrázok 26 MKP analýza - napätie, zataženie od ozubenia

C: Static Structural  
Equivalent Stress  
Type: Equivalent (von-Mises) Stress  
Unit: MPa



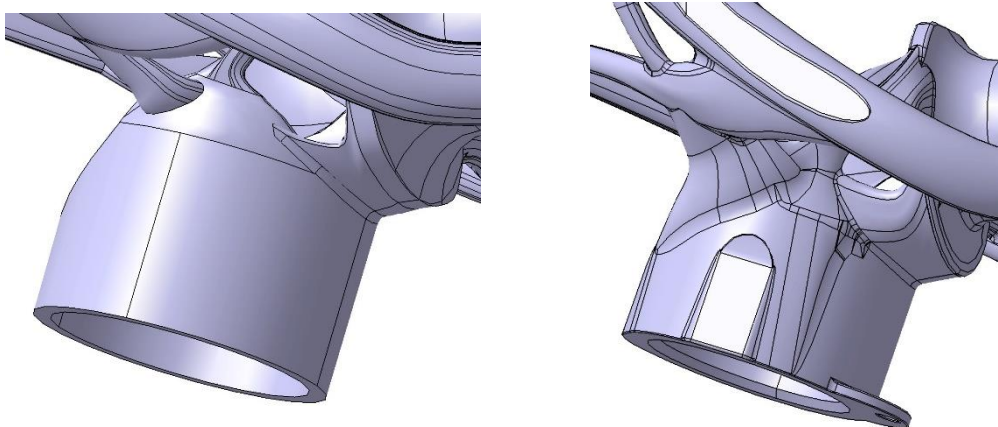
Obrázok 27 MKP analýza - napätie, zataženie od ozubenia

C: Static Structural  
Total Deformation  
Type: Total Deformation  
Unit: mm



Obrázok 28 MKP analýza – celková deformácia, zataženie od ozubenia

Pri zaťažení od pilota dosahuje napätie hodnoty pod dovoleným napätím, s výnimkou malej oblasti na uchytení k palubnej doske, kde na hrane uzlov vzniká napätie 300 MPa. Toto napätie však v blízkom okolí klesá pod hodnotu dovoleného napätia, a preto ho považujem za chybu výpočtu. Diel nebol optimalizovaný na druhý záťažový stav, a preto je zrejme, že napätie dosahuje niekoľko násobne väčšie hodnoty než je maximálne dovolené napätie a taktiež celková deformácia na zvislej valcovej časti presahuje maximálnu dovolenú hodnotu 0,3 mm. Na základe týchto výsledkov som diel upravila v kritických miestach, a to najmä zosilnením v oblasti spodnej valcovej plochy a časti spájajúcej horizontálnu a spodnú valcovú plochu. Následne som takto upravený model skontrolovala MKP výpočtom.

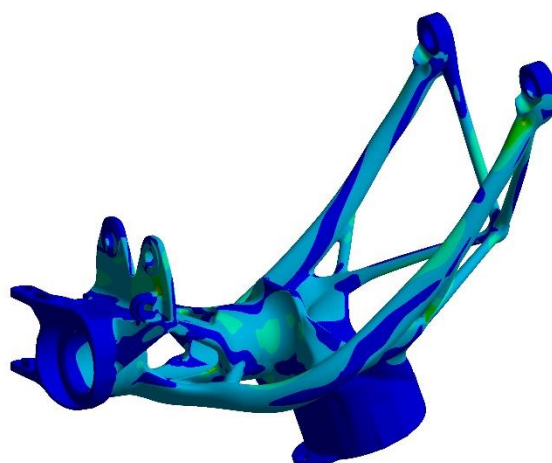
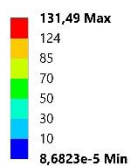


Obrázok 29 Model domčeku pred úpravou (vľavo) a po úprave (vpravo) podľa výsledkov MKP analýzy

### 5.3.7 Výsledky kontrolného MKP výpočtu

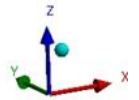
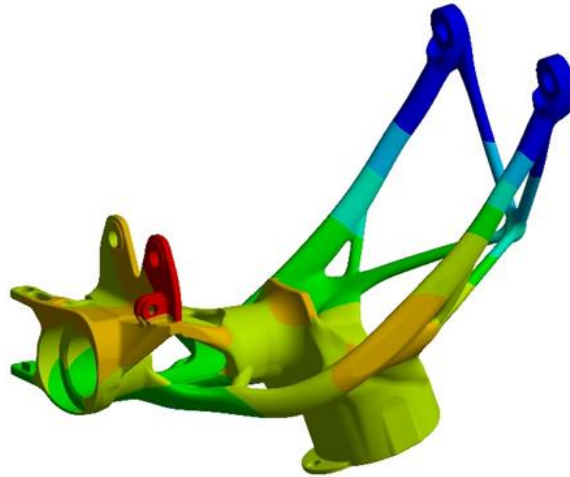
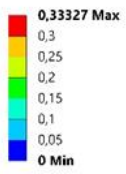
#### 1. Prvý záťažový stav - od pilota

A: Static Structural  
Equivalent Stress  
Type: Equivalent (von-Mises) Stress  
Unit: MPa



Obrázok 30 Kontrolný MKP výpočet - napätie, zaťaženie od pilota

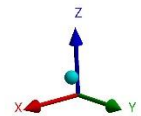
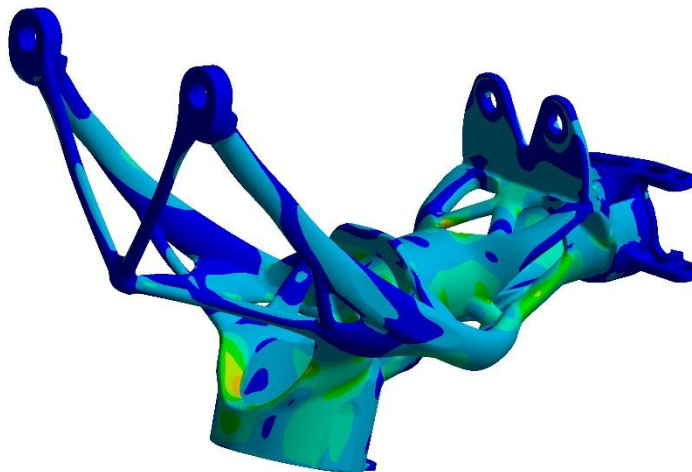
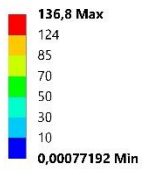
A: Static Structural  
Total Deformation  
Type: Total Deformation  
Unit: mm



Obrázok 31 Kontrolný MKP výpočet - celková deformácia, zaťaženie od pilota

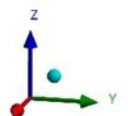
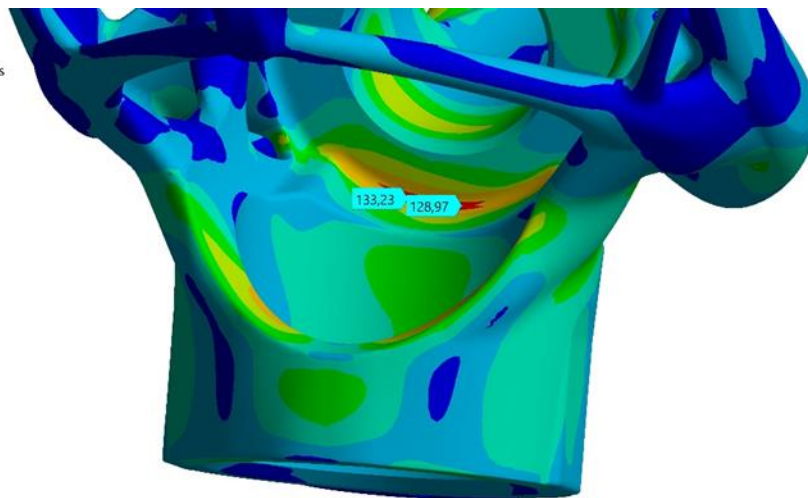
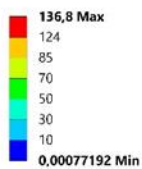
## 2. Druhý zátážový stav - od ozubenia

C: Static Structural  
Equivalent Stress  
Type: Equivalent (von-Mises) Stress  
Unit: MPa

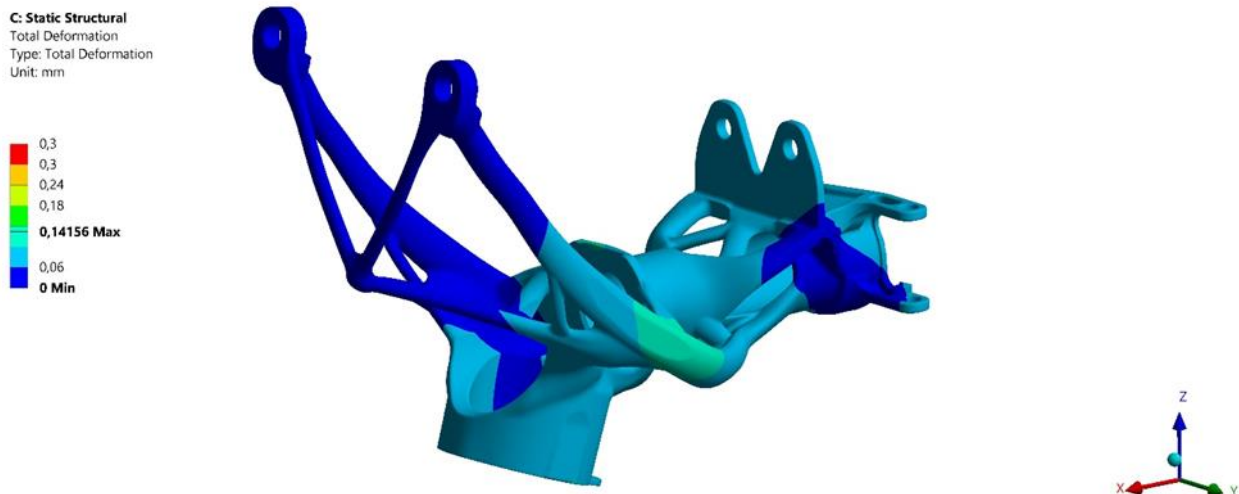


Obrázok 32 Kontrolný MKP výpočet - napätie, zaťaženie od ozubenia

C: Static Structural  
Equivalent Stress  
Type: Equivalent (von-Mises) Stress  
Unit: MPa



Obrázok 33 Kontrolný MKP výpočet - napätie, zaťaženie od ozubenia

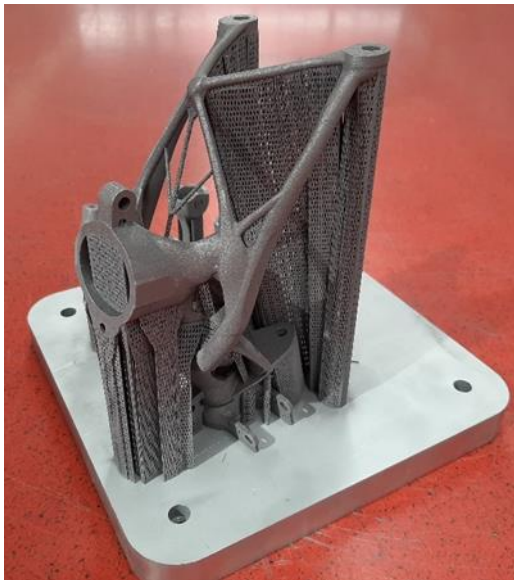


*Obrázok 34 Kontrolný MKP výpočet – celková deformácia, zaťaženie od ozubenia*

Po úprave domčeku v kritických miestach vyšli u prvého záťažového stavu napätie a deformácia podobne ako pri prvom MKP výpočte a výsledok pokladám za dostačujúci. Maximálne napätie pri zaťažení od ozubenia vyšlo o 10% vyššie než je maximálne dovolené napätie. Avšak s prihliadnutím na to, že diel je navrhovaný na medzu únavy a maximálne napätie pôsobí vo veľmi malej oblasti, v ktorej blízkom okolí sa znižuje pod 130 MPa, považujem tento výsledok za vyhovujúci. U takto upraveného dielu sa mi oproti hmotnosti pôvodného optimalizovaného dielu 0,28 kg podarilo dosiahnuť hmotnosť 0,29 kg.

### 5.3.8 Výroba domčeku stĺpiku riadenia

Uchytenie stĺpiku riadenia sa vyrábalo sintrovaním. Samotný proces sintrovania trval 2 dni 6 h a 34 min a následne sa z dielu odstránili podpory potrebné pri tlači. Pri návrhu bolo taktiež potrebné myslieť na vyrobiteľnosť dielu, a preto som do modelu doplnila úchyty, podľa ktorých sa vyrobil prípravok, ktorým sa diel upol na lícnu dosku obrábacieho stroju. Funkčné plochy – plochy pre lisovanie klzných puzdier a závit na spodnej valcovej ploche sa obrobili na 4-osej CNC frézke. Obrábací proces prebiehal tak, že najprv sa obrobili plochy pre klzné puzdrá, v ktorých je uložená horizontálna hriadeľ, potom sa diel otočil o požadovaný uhol a obrobil sa závit (výkres v prílohe). Úchytné body, za ktoré sa diel upol pri obrábaní spolu s prípravkom je vidieť na obrázku 36. Po skončení obrábacieho procesu sa pre zachovanie čo najnižšej hmotnosti úchyty odstránili.



**Obrázok 35** Diel s podporami po sintrovaní



**Obrázok 36** Diel v prípravku upnutom na lícnu dosku obrábacieho stroja



## 6. Záver

Cieľom tejto bakalárskej práce bolo upraviť stĺpik riadenia používaného na voze FS.12 tímu študentskej formule CTU CarTech tak, aby splnil požadované podmienky a pomocou topologickej optimalizácie a MKP analýzy navrhnuť nové uchytenie stĺpiku riadenia. Pri návrhu som sa rozhodovala medzi zachovaním prevodky s ozubenými kolesami a prenosom krútiaceho momentu pomocou kĺbov. Pretože u kĺbov bolo niekoľko obmedzení, čo sa týka zástavbového priestoru, spoľahlivosti kĺbov a problému s vedením káblov napájajúcich volant, rozhodla som sa zachovať prevodku s ozubenými kolesami z predošlého vozu, ktorú som upravila podľa požadovaných podmienok. Najdôležitejšou podmienkou bola rozoberateľnosť zostavy, ktorú som dosiahla rozdelením horizontálnej hriadele na dve časti spojené objímkou s poistovacím šróbom.

V dôsledku zmien v zostave stĺpiku riadenia a zmeny tvaru monokoku už nebolo možné použiť domček stĺpiku riadenia z predošlého vozu a musel sa preto navrhnuť nový. Pri návrhu som využila výhodu, že pri výrobe dielov sintrovaním nie je takmer vôbec obmedzený tvar dielu a využila som funkciu topologickej optimalizácie, ktorú som vyhodnocovala pre 2 záťažové stavy. Prvým stavom bolo zaťaženie vyvedené pilotom na volante a druhý stav predstavovali sily vznikajúce v ozubených kolesách pri pôsobení krútiaceho momentu. Topologická optimalizácia pre druhý stav nevyšla priaznivo, a preto som pri návrhu domčeku vychádzala z výsledku topologickej optimalizácie pre prvý záťažový stav, ktorý som analyzovala MKP výpočtom. Na základe MKP analýzy som diel upravila v kritických miestach tak, aby vyhovel v oboch záťažových stavoch dovoleným hodnotám napätia a deformácie.

Okrem splnenia podmienky rozoberateľnosti sa taktiež podarilo splniť podmienku zníženia hmotnosti. Nová zostava stĺpiku riadenia má hmotnosť 0,57 kg, čo je o 0,112 kg menej ako u vozu FS.12, pričom na samotnom uchytení stĺpiku riadenia sa ušetrilo 0,128 kg.

## Zdroje

1. Formula Student Czech 2019. FSCzech [online]. Nymburk: Formula Student Czech Republic, c2017, 2019 [cit. 2021-7-9]. Dostupné z: <https://fsczech.smugmug.com/Photo/2017/Friday/>
2. Rules: Formula SAE [online]. SAE International, 2020. [cit. 18. 6. 2021]. Dostupné z: [https://www.formulastudent.de/fileadmin/user\\_upload/all/2020/rules/FS-Rules\\_2020\\_V1.0.pdf](https://www.formulastudent.de/fileadmin/user_upload/all/2020/rules/FS-Rules_2020_V1.0.pdf)
3. ACHTENOVÁ, Gabriela. *Převodná ústrojí motorových vozidel*. V Praze: České vysoké učení technické, 2012. ISBN 978-80-01-05129-0.
4. Plain Bearing vs. Needle Bearing U-Joints. Belden Universal [online]. Hillside: Belden Tools, c2021 [cit. 2021-7-9]. Dostupné z: <https://www.beldenuniversal.com/knowledge/technical-information/plain-bearing-vs-needle-bearing-u-joints>
5. Universal Joint Failure: Friction and Heat Generation. *Belden Universal* [online]. Hillside: Belden Tools, c2021 [cit. 2021-6-18]. Dostupné z: <https://www.beldenuniversal.com/knowledge/technical-information/universal-joint-failure>
6. PÍTR, Tomáš. *Konstrukce a optimalizace systému řízení pro vůz Formula Student*. Praha, 2016. Diplomová. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní, Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel. Vedoucí práce Ing. Michal Vašíček Ph.D.
7. Universal Joints. Apex Fasteners [online]. Irwindale: Apex Fasteners, c2021, March 2007 [cit. 2021-7-9]. Dostupné z: <https://www.apexfasteners.com/fasteners/images/UJCatalogue.pdf>
8. Quick release for steering wheel catalogue. Krontec [online]. Obertraubling: KRONTEC Maschinenbau, c2021 [cit. 2021-7-9]. Dostupné z: [https://www.krontec.de/katalog/pdf/Kapitel13\\_ZubehoerundSpezialteile/13-QR03.pdf](https://www.krontec.de/katalog/pdf/Kapitel13_ZubehoerundSpezialteile/13-QR03.pdf)
9. ŠVEC, Vladimír. *Části a mechanismy strojů: spoje a části spojovací*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1997. ISBN 80-010-1701-X.
10. SAADLAOUI, Yassine, et al. *Topology optimization and additive manufacturing: Comparison of conception methods using industrial codes*. Journal of Manufacturing Systems, 2017, 43: 178-186.
11. RŮŽIČKOVÁ, Ludmila. *Vliv parametrů tepelného zpracování na užité vlastnosti slitiny AlSi10Mg vyrobené 3D tiskem*. Praha, 2020. Diplomová. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní, Ústav materiálového inženýrství. Vedoucí práce Doc. Ing. Jana Sobotová, Ph.D.

## Zoznam obrázkov

|  |    |
|--|----|
| <b>Obrázok 1</b> Formula Student Česko 2019 [1] .....  | 9  |
| <b>Obrázok 2</b> Šablóny vymedzujúce otvor kokpitu [2] .....   | 11 |
| <b>Obrázok 3</b> Konštrukčné riešenia stĺpiku riadenia vo vozoch Formula Student.....  | 12 |
| <b>Obrázok 4</b> Závislosť pomeru uhlových rýchlostí na polovici jednej otáčky vstupného hriadeľa pri rôznych uhloch zlomu [3] ..... | 13 |
| <b>Obrázok 5</b> Univerzálny samostatný kĺb so stredovým elementom v tvare kocky, s čapom a kolíkmi [4] .....                        | 13 |
| <b>Obrázok 6</b> Univerzálny samostatný kĺb s krížovým stredovým elementom s ihlovými ložiskami [5]...                               | 13 |
| <b>Obrázok 7</b> Zostava stĺpiku riadenia vo voze FS.06 .....  | 14 |
| <b>Obrázok 8</b> Zostava stĺpiku riadenia vo voze FS.12 .....  | 15 |
| <b>Obrázok 9</b> Zostava horizontálnej hriadeľa s vyznačenými miestami kontroly na krut .....  | 17 |
| <b>Obrázok 10</b> Kinematická schéma náprav na voze FS.13.....   | 18 |
| <b>Obrázok 11</b> Hriadeľ rýchlospojky [8].....  | 18 |
| <b>Obrázok 12</b> Hodnoty dovoleného tlaku na bokoch pier a drážok [9] .....   | 19 |
| <b>Obrázok 13</b> Horizontálna hriadeľ - zaťaženie od pilota .....   | 20 |
| <b>Obrázok 14</b> Horizontálna hriadeľ - zaťaženie od ozubenia.....  | 20 |
| <b>Obrázok 15</b> Vertikálna hriadeľ - zaťaženie od ozubenia .....   | 21 |
| <b>Obrázok 16</b> Vstupný model pre topologickú optimalizáciu .....  | 23 |
| <b>Obrázok 17</b> Vstupný model pre topologickú optimalizáciu .....  | 23 |
| <b>Obrázok 18</b> Okrajové podmienky – vyznačené plochy zadané ako pevné podpory.....  | 24 |
| <b>Obrázok 19</b> Zaťaženie silami od pilota zadaných ako remote force .....   | 24 |
| <b>Obrázok 20</b> Zaťaženie od ozubenia, silové zložky zadané ako remote force.....  | 25 |
| <b>Obrázok 21</b> Výsledok topologickej optimalizácie pre zaťaženie od pilota.....   | 25 |
| <b>Obrázok 22</b> Výsledok topologickej optimalizácie pre zaťaženie od ozubených kolies.....   | 26 |
| <b>Obrázok 23</b> Zadané okrajové podmienky a zaťaženie MKP výpočtu.....   | 26 |
| <b>Obrázok 24</b> MKP analýza - napätie, zaťaženie od pilota.....  | 27 |
| <b>Obrázok 25</b> MKP analýza - celková deformácia, zaťaženie od pilota.....   | 27 |
| <b>Obrázok 26</b> MKP analýza - napätie, zaťaženie od ozubenia.....  | 28 |
| <b>Obrázok 27</b> MKP analýza - napätie, zaťaženie od ozubenia .....   | 28 |
| <b>Obrázok 28</b> MKP analýza – celková deformácia, zaťaženie od ozubenia.....   | 28 |
| <b>Obrázok 29</b> Model domčeku pred úpravou (vľavo) a po úprave (vpravo) podľa výsledkov MKP analýzy.....                           | 29 |
| <b>Obrázok 30</b> Kontrolný MKP výpočet - napätie, zaťaženie od pilota.....  | 29 |
| <b>Obrázok 31</b> Kontrolný MKP výpočet - celková deformácia, zaťaženie od pilota.....   | 30 |
| <b>Obrázok 32</b> Kontrolný MKP výpočet - napätie, zaťaženie od ozubenia.....  | 30 |
| <b>Obrázok 33</b> Kontrolný MKP výpočet - napätie, zaťaženie od ozubenia.....  | 30 |
| <b>Obrázok 34</b> Kontrolný MKP výpočet – celková deformácia, zaťaženie od ozubenia.....   | 31 |
| <b>Obrázok 35</b> Diel s podporami po sintrovaní.....  | 32 |
| <b>Obrázok 36</b> Diel v prípravku upnutom na lícnu dosku obrábacieho stroja.....  | 32 |

## Zoznam tabuliek

|  |    |
|--|----|
| <b>Tabuľka 1</b> Porovnanie hmotností zostáv stĺpikov riadenia na vozoch FS.06 a FS.12.....        | 16 |
| <b>Tabuľka 2</b> Pevnostné vlastnosti ocelí 25CrMo4 a 42CrMo4 .....                                | 18 |
| <b>Tabuľka 3</b> Hodnoty šmykového napätia v miestach s kritickým prierezom .....                  | 19 |
| <b>Tabuľka 4</b> Horizontálna hriadeľ - reakcie pri zaťažení od ozubenia.....                      | 21 |
| <b>Tabuľka 5</b> Vertikálna hriadeľ - reakcie pri zaťažení od ozubenia .....                       | 22 |
| <b>Tabuľka 6</b> Vlastnosti materiálu Cl31Al pri rôznych spôsoboch tepelného spracovania [11]..... | 23 |

## Zoznam použitých veličín

|                  |  |                      |
|------------------|--|----------------------|
| $\alpha$         | Uhol zlomu osí hriadeľov spojených kĺbmi | [°]                  |
| $\omega_1$       | Uhlová rýchlosť vstupného hriadeľu       | [s <sup>-1</sup> ]   |
| $\omega_2$       | Uhlová rýchlosť výstupného hriadeľu      | [s <sup>-1</sup> ]   |
| $F_{toe}$        | Sila, ktorou je namáhaný hrebeň riadenia | [N]                  |
| $\sigma_k$       | Medza klzu                               | [MPa]                |
| $\tau_k$         | Medzné šmykové napätie                   | [MPa]                |
| $\tau_D$         | Dovolené šmykové napätie                 | [MPa]                |
| $M_k$            | Maximálny krútiaci moment na volante     | [Nmm]                |
| $W_k$            | Prierezový modul v krute                 | [mm <sup>3</sup> ]   |
| $l_{min}$        | Minimálna dĺžka drážkovania              | [mm]                 |
| $s'$             | Účinná styková plocha na 1 mm dĺžky      | [mm <sup>2</sup> ]   |
| $p_D$            | Dovolený tlak na bokoch pier a drážok    | [MPa]                |
| $C$              | Dynamická únosnosť                       | [kN]                 |
| $C_0$            | Statická únosnosť                        | [kN]                 |
| $F$              | Sila, ktorou pôsobí pilot na volant      | [N]                  |
| $a_{LAT}$        | Maximálne zrýchlenie vozu                | [m.s <sup>-2</sup> ] |
| $d_m$            | Stredný priemer kužeľového ozubenia      | [mm]                 |
| $\delta$         | Uhol osí kužeľových ozubených kolies     | [°]                  |
| $\alpha_z$       | Uhol záberu                              | [°]                  |
| $F_T$            | Tangenciálna zložka sily v ozubení       | [N]                  |
| $F_a$            | Axiálna zložka sily v ozubení            | [N]                  |
| $F_R$            | Radiálna zložka sily v ozubení           | [N]                  |
| $R_{p0,2}$       | Zmluvná medza klzu                       | [MPa]                |
| $R_m / \sigma_p$ | Medza pevnosti                           | [MPa]                |
| $A$              | Ťažnosť                                  | [%]                  |
| $\sigma_c$       | Medza únavy                              | [MPa]                |
| $\sigma_D$       | Maximálne dovolené napätie               | [MPa]                |

## Zoznam príloh

**Príloha 1** Přehled vlastností ocele 25CrMo4

**Príloha 2** Přehled vlastností ocele 42CrMo4

**Príloha 3** Výkresová dokumentácia

# Príloha 1

| Přehled vlastností oceli 25CrMo4 ( 25CrMoS4 )   |   |                    |                           |        |                      |                  |                       |                         |          |    |                 |    | 1.7218 (1.7213) |    |    |    |    |  |
|---|---|--------------------|---------------------------|--------|----------------------|------------------|-----------------------|-------------------------|----------|----|-----------------|----|-----------------|----|----|----|----|--|
| Druh oceli  | Nizkolegovaná ušlechtilá chrom - molybdenová ocel k zušlechťování   |                    |                           |        |                      |                  |                       |                         |          |    |                 |    |                 |    |    |    |    |  |
| TDP   | ČSN EN 10083-3: 2007  |                    |                           |        |                      |                  |                       |                         |          |    |                 |    |                 |    |    |    |    |  |
| Dřívější označení   | 25CrMo4 ( 25CrMoS4 ) podle ČSN EN 10083-1: 1991+A1: 1996; 25CrMo4 (25CrMoS4) podle DIN 17200; 15 130 podle ČSN  |                    |                           |        |                      |                  |                       |                         |          |    |                 |    |                 |    |    |    |    |  |
| Použití   | Ocel s nižší prokalitelností pro středně namáhané strojní díly. Je svařitelná a vhodná pro výrobu bezešvých trub. Po zakalení dosahuje tvrdosti přibližně 48 HRC. V zušlechťeném stavu dosahuje středních hodnot pevnosti a meze kluzu při relativně vysoké houževnatosti. Není náchylná k popouštěcí křehkosti.  |                    |                           |        |                      |                  |                       |                         |          |    |                 |    |                 |    |    |    |    |  |
| Chemické složení v % hmot. ( rozbor tavby )   | C   | Si max.            | Mn                        | P max. | S max. <sup>1)</sup> | Cr               | Mo                    | Ni                      | V        |    |                 |    |                 |    |    |    |    |  |
|   | 0,22-0,29   | 0,40               | 0,60-0,90                 | 0,025  | 0,035                | 0,90-1,20        | 0,15-0,30             | -                       | -        |    |                 |    |                 |    |    |    |    |  |
| Složení hotového výrobku <sup>2)</sup>  | 0,20-0,31   | 0,43               | 0,56-0,94                 | 0,030  | 0,040                | 0,85-1,25        | 0,12-0,33             | -                       | -        |    |                 |    |                 |    |    |    |    |  |
| Mechanické vlastnosti v zušlechťeném stavu. <sup>3)</sup>   | Průměr mm   |                    | Re min. MPa               |        | Rm MPa               |                  | A min. %              |                         | Z min. % |    | KV min. J       |    |                 |    |    |    |    |  |
|   | d ≤ 16  |                    | 700                       |        | 900 – 1100           |                  | 12                    |                         | 50       |    | -               |    |                 |    |    |    |    |  |
|   | 16 < d ≤ 40   |                    | 600                       |        | 800 - 950            |                  | 14                    |                         | 55       |    | 50              |    |                 |    |    |    |    |  |
|   | 40 < d ≤ 100  |                    | 450                       |        | 700 - 850            |                  | 15                    |                         | 50       |    | 50              |    |                 |    |    |    |    |  |
| Maximální hodnoty tvrdosti pro stav :   | Zpracováno na stříhatelnost   |                    |                           |        |                      |                  |                       |                         |          |    | Žihány na měkko |    |                 |    |    |    |    |  |
|   | HB max. 255   |                    |                           |        |                      |                  |                       |                         |          |    | HB max. 212     |    |                 |    |    |    |    |  |
| Prokalitelnost <sup>4)</sup>  | Vzdálenost od plochy kaleného čela zkušební tělesa v mm Tvrdost v HRC   |                    |                           |        |                      |                  |                       |                         |          |    |                 |    |                 |    |    |    |    |  |
|   | <sup>5)</sup>   | Mez                | 1,5                       | 3      | 5                    | 7                | 9                     | 11                      | 13       | 15 | 20              | 25 | 30              | 35 | 40 | 45 | 50 |  |
|   | +H  | max.               | 52                        | 52     | 51                   | 50               | 48                    | 46                      | 43       | 41 | 37              | 35 | 33              | 32 | 31 | 31 | 31 |  |
|   |   | min.               | 44                        | 43     | 40                   | 37               | 34                    | 32                      | 29       | 27 | 23              | 21 | 20              | -  | -  | -  | -  |  |
|   | +HH   | max.               | 52                        | 52     | 51                   | 50               | 48                    | 46                      | 43       | 41 | 37              | 35 | 33              | 32 | 31 | 31 | 31 |  |
|   |   | min.               | 47                        | 46     | 44                   | 41               | 39                    | 37                      | 34       | 32 | 28              | 26 | 24              | 23 | 22 | 22 | 22 |  |
|   | +HL   | max.               | 49                        | 49     | 47                   | 46               | 43                    | 41                      | 38       | 36 | 32              | 30 | 29              | 28 | 27 | 27 | 27 |  |
|   |   | min.               | 44                        | 43     | 40                   | 37               | 34                    | 32                      | 29       | 27 | 23              | 21 | 20              | -  | -  | -  | -  |  |
|   | <p>Popouštěcí křivka (referenční vzorek průměr 30 mm)</p> <p>Křivky prokalitelnosti</p>   |                    |                           |        |                      |                  |                       |                         |          |    |                 |    |                 |    |    |    |    |  |
|   | <b>Technologické vlastnosti</b>   |                    |                           |        |                      |                  |                       |                         |          |    |                 |    |                 |    |    |    |    |  |
| Tváření za tepla  | Doporučené rozmezí teplot pro tváření za tepla: 1100 až 850 °C  |                    |                           |        |                      |                  |                       |                         |          |    |                 |    |                 |    |    |    |    |  |
| Tepelné zpracování  | Normalizační žihání °C  | Žihání na měkko °C | Isotermické žihání °C     |        | Teplota kalení °C    | Kalící prostředí | Teplota popouštění °C | Zkouška kalením čela °C |          |    |                 |    |                 |    |    |    |    |  |
|   | 860 až 890  | 680 až 720         | 850 až 920<br>670 -1 hod. |        | 840 až 880           | voda nebo olej   | 540 až 680            | 850 ± 5                 |          |    |                 |    |                 |    |    |    |    |  |
|   | Uvedené podmínky jsou doporučeny s výjimkou zkoušky kalením čela (zkouška prokal.)<br>Teplota kalení při spodní hranici se doporučuje pro kalení do vody a při střední a horní hranici při kalení do oleje. Jako kalící prostředí lze použít i syntetické polymery. K docílení rovnoměrných hodnot po zušlechťení u větších průměrů (zejména kovaných) přispívá normalizační žihání před zušlechťením.<br>Body přeměny : Ac <sub>1</sub> = 745°C, Ac <sub>3</sub> = 830°C, Ms = 370°C |                    |                           |        |                      |                  |                       |                         |          |    |                 |    |                 |    |    |    |    |  |
| Obrobitelnost   | Obrábí se ve stavu žíhaném na měkko. Při nižších pevnostech lze obrábět i ve stavu zušlechťeném. Zlepšenou obrobitelnost vykazuje ocel 25CrMoS4 se zvýšeným obsahem S. Díly, které mají být zušlechťeny na vyšší pevnost se nejprve předhrubují ve stavu žíhaném a dokončí po zušlechťení.  |                    |                           |        |                      |                  |                       |                         |          |    |                 |    |                 |    |    |    |    |  |
| Stříhatelnost   | Pro docílení tvrdosti vhodné pro stříhání se ocel žihá nebo řízeně vychlazuje.  |                    |                           |        |                      |                  |                       |                         |          |    |                 |    |                 |    |    |    |    |  |
| <sup>1)</sup> obsah síry u oceli 25CrMoS4 je 0,020 až 0,040 % s dovolenou odchylkou v hotovém výrobku ± 0,005 %.<br><sup>2)</sup> u jedné tavby smí být překročena horní nebo spodní hranice rozmezí, ale nikoliv obě současně.<br><sup>3)</sup> uvedené hodnoty musí být dosažitelné po odpovídajícím tepelném zpracování (zušlechťení) též u oceli dodávané ve stavu po válcování nebo ve stavu měkce žíhaném. Prokazují se na referenčním vzorku odpovídajícího průměru.<br>Zkušební tělesa pro stanovení mechanických hodnot musí být odebrána v souladu s předpisem normy TDP.<br>R <sub>e</sub> –mez kluzu, R <sub>m</sub> – pevnost v tahu, A – tažnost ( počáteční délka L <sub>0</sub> = 5,65D <sub>0</sub> ), Z – kontrakce, KV – nárazová práce, zkušební těleso ISO s V- vrubem ( průměr ze tří naměřených hodnot, z nichž žádná nesmí být menší než 70% minimální střední hodnoty).<br><sup>4)</sup> |   |                    |                           |        |                      |                  |                       |                         |          |    |                 |    |                 |    |    |    |    |  |

pro ocel objednanou bez požadavků na prokalitelnost jsou hodnoty prokalitelnosti pouze informativní.

<sup>5)</sup>

+H – normální hodnoty pro celý pás prokalitelnosti, +HH - zúžený pás prokalitelnosti směrem k horní hranici, +HL – zúžený pás prokalitelnosti směrem ke spodní hranici.



## Príloha 2

| Přehled vlastností oceli 42CrMo4 ( 42CrMoS4 )             |  |           |                         |            |                      |             |             |    |                                    | 1.7225 (1.7227) |           |    |    |    |    |    |    |
|---|--|-----------|-------------------------|------------|----------------------|-------------|-------------|----|------------------------------------|-----------------|-----------|----|----|----|----|----|----|
| Druh oceli  | Nízkolegovaná ušlechtilá chrom - molybdenová ocel k zušlechťování  |           |                         |            |                      |             |             |    |                                    |                 |           |    |    |    |    |    |    |
| TDP   | ČSN EN 10083-3: 2007   |           |                         |            |                      |             |             |    |                                    |                 |           |    |    |    |    |    |    |
| Dřívější označení   | 42CrMo4 ( 42CrMoS4 ) podle ČSN EN 10083-1: 1991+A1: 1996; 42CrMo4 ( 42CrMoS4 ) podle DIN 17200, 15 142 podle ČSN   |           |                         |            |                      |             |             |    |                                    |                 |           |    |    |    |    |    |    |
| Použití   | Ocel s vyšší prokalitelností pro výše namáhané strojní díly. Po zakalení dosahuje tvrdosti přibližně 58 HRC. Do průměru 100 mm lze po zušlechťení docílit pevností nad 1000 MPa při ještě dostatečné houževnatosti. Není náchylná k popouštění křehkosti. Kalí se do méně razantního kalcího prostředí, poněvadž je náchylná ke vzniku kalcích trhlin v místech s vrubovým účinkem nebo povrchových vad. V kaleném stavu dobře odolává opotřebení. Patří k nejčastěji používané oceli k zušlechťování. |           |                         |            |                      |             |             |    |                                    |                 |           |    |    |    |    |    |    |
| Chemické složení v hmot. %<br>( rozbor tavby )            | C  | Si max.   | Mn                      | P max.     | S max. <sup>1)</sup> | Cr          | Mo          | Ni | V                                  |                 |           |    |    |    |    |    |    |
|   | 0,38 – 0,45  | max. 0,40 | 0,60 – 0,90             | max. 0,025 | max. 0,035           | 0,90 – 1,20 | 0,15 – 0,30 | -  | -                                  |                 |           |    |    |    |    |    |    |
| Složení hotového výrobku <sup>2)</sup>                    | 0,36 – 0,47  | max. 0,43 | 0,56 – 0,94             | max. 0,030 | max. 0,040           | 0,85 – 1,25 | 0,12 – 0,33 | -  | -                                  |                 |           |    |    |    |    |    |    |
| Mechanické vlastnosti v zušlechťeném stavu. <sup>3)</sup> | Průměr mm  |           | R <sub>e</sub> min. MPa |            | R <sub>m</sub> MPa   |             | A min. %    |    | Z min. %                           |                 | KV min. J |    |    |    |    |    |    |
|   | d ≤ 16   |           | 900                     |            | 1100 - 1300          |             | 10          |    | 40                                 |                 | -         |    |    |    |    |    |    |
|   | 16 < d ≤ 40  |           | 750                     |            | 1000 - 1200          |             | 11          |    | 45                                 |                 | 35        |    |    |    |    |    |    |
|   | 40 < d ≤ 100   |           | 650                     |            | 900 - 1100           |             | 12          |    | 50                                 |                 | 35        |    |    |    |    |    |    |
|   | 100 < d ≤ 160  |           | 550                     |            | 800 - 950            |             | 13          |    | 50                                 |                 | 35        |    |    |    |    |    |    |
| 160 < d ≤ 250   |  | 500       |                         | 750 – 900  |                      | 14          |             | 55 |                                    | 35              |           |    |    |    |    |    |    |
| Maximální hodnoty tvrdosti pro stav :                     | Zpracováno na stříhatelnost  |           |                         |            | Žháno na měkko       |             |             |    | Povrchově kaleno (tvrdost povrchu) |                 |           |    |    |    |    |    |    |
|   | HB max. 255  |           |                         |            | HB max. 241          |             |             |    | HRC min. 53                        |                 |           |    |    |    |    |    |    |
| Prokalitelnost <sup>4)</sup>                              | Vzdálenost od plochy kaleného čela zkušebního tělesa v mm  |           |                         |            |                      |             |             |    |                                    |                 |           |    |    |    |    |    |    |
|   | Tvrdost v HRC  |           |                         |            |                      |             |             |    |                                    |                 |           |    |    |    |    |    |    |
|   | <sup>5)</sup>  | Mez       | 1,5                     | 3          | 5                    | 7           | 9           | 11 | 13                                 | 15              | 20        | 25 | 30 | 35 | 40 | 45 | 50 |
|   | +H   | max.      | 61                      | 61         | 61                   | 60          | 60          | 59 | 59                                 | 58              | 56        | 53 | 51 | 48 | 47 | 46 | 45 |
|   |  | min.      | 53                      | 53         | 52                   | 51          | 49          | 43 | 40                                 | 37              | 34        | 32 | 31 | 30 | 30 | 29 | 29 |
|   | +HH  | max.      | 61                      | 61         | 61                   | 60          | 60          | 59 | 59                                 | 58              | 56        | 53 | 51 | 48 | 47 | 46 | 45 |
| min.  |  | 56        | 56                      | 55         | 54                   | 52          | 48          | 46 | 44                                 | 41              | 39        | 38 | 36 | 36 | 35 | 34 |    |
| +HL   | max.   | 58        | 58                      | 58         | 57                   | 56          | 54          | 53 | 51                                 | 49              | 46        | 44 | 42 | 41 | 40 | 40 |    |
|   | min.   | 53        | 53                      | 52         | 51                   | 49          | 43          | 40 | 37                                 | 34              | 32        | 31 | 30 | 30 | 29 | 29 |    |

**Popouštěcí křiv prů**

ka (referenční vzorek průměr 30 mm)

— R<sub>m</sub>  
— Rp<sub>0,2</sub>

Teplota popouštění

**Křivky prokalitelnosti**

Tvrdost v HRC

Vzdálenost od kaleného čela

H max HH max

H min HL min

HH min

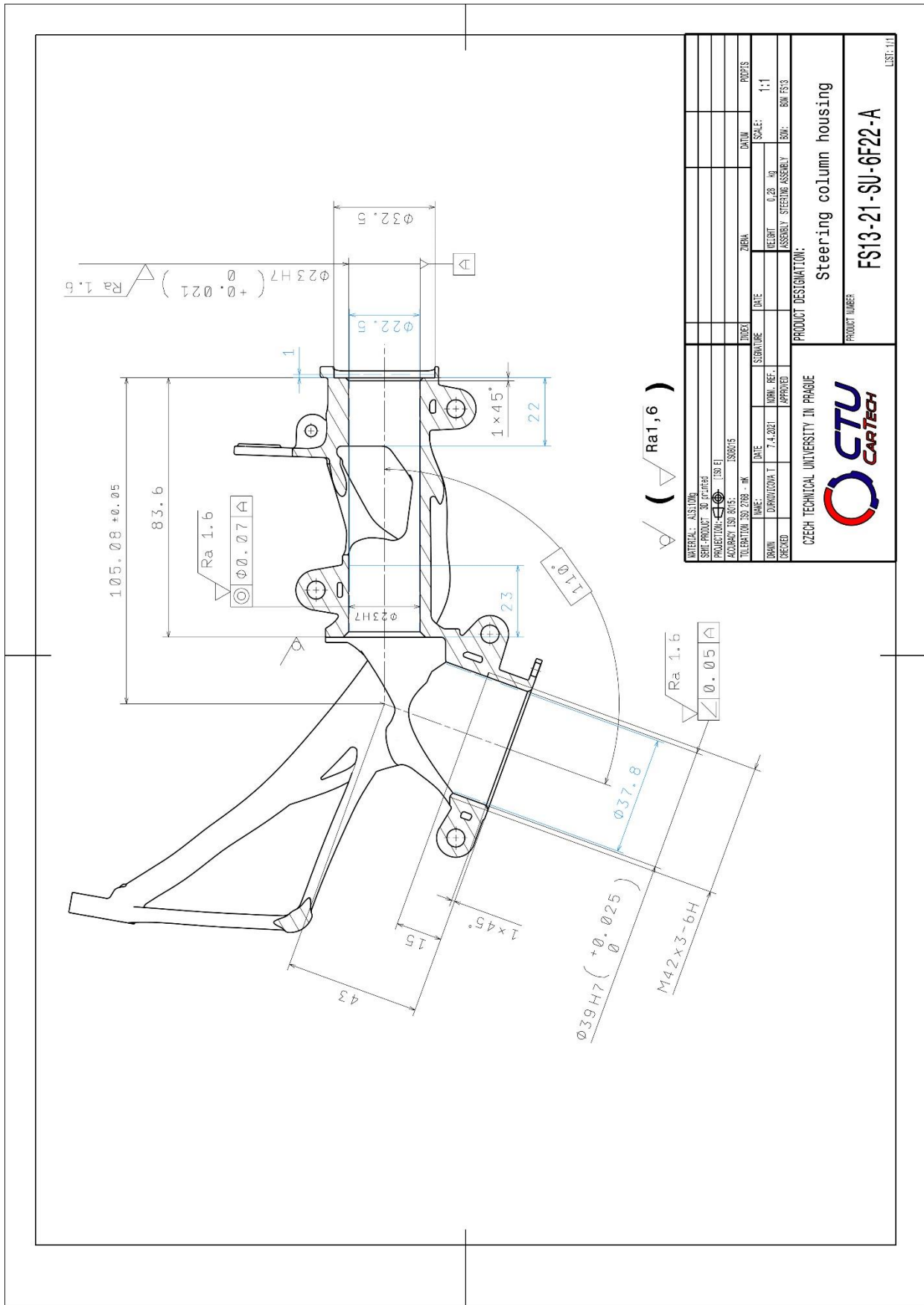
HL max

| Technologické vlastnosti |   |                   |                            |                   |                 |                       |                        |
|--------------------------|---|-------------------|----------------------------|-------------------|-----------------|-----------------------|------------------------|
| Tváření za tepla         | Doporučené rozmezí teplot pro tváření za tepla : 1100 až 850 °C   |                   |                            |                   |                 |                       |                        |
| Tepelné zpracování       | Normalizační žhání °C   | Žhání na měkko °C | Isotermické žhání °C       | Teplota kalení °C | Kalcí prostředí | Teplota popouštění °C | Zkouška kalení čela °C |
|                          | 850 až 880  | 680 až 720        | 800 až 900<br>670 - 3 hod. | 820 až 860        | olej nebo voda  | 540 až 680            | 850 ± 5                |
|                          | Uvedené podmínky jsou doporučeny s výjimkou zkoušky kalení čela (zkouška prokal.)<br>Jako kalcí prostředí se s ohledem na náchylnost ke kalcím trhlinám doporučují syntetické polymery a olej. K docílení rovnoměrných hodnot po zušlechťení u větších průměrů (zejména kovových) přispívá normalizační žhání před zušlechťením.<br>Body přeměny : Ac <sub>1</sub> = 745°C, Ac <sub>3</sub> = 790°C, Ms = 300°C |                   |                            |                   |                 |                       |                        |
| Obrobitelnost            | Obrábí se ve stavu žháném na měkko. Při nižších pevnostech lze obrábět i ve stavu zušlechťeném. Zlepšenou obrobitelnost vykazuje ocel 42CrMoS4 se zvýšeným obsahem S. Díly, které se zušlechťují na vyšší pevnost se nejprve předhrubují ve stavu žháném a dokončí po zušlechťení.  |                   |                            |                   |                 |                       |                        |
| Stříhatelnost            | Pro docílení tvrdosti vhodné pro stříhání se ocel žhává nebo řízeně vychlazuje.   |                   |                            |                   |                 |                       |                        |

- <sup>1)</sup> obsah síry u oceli 42CrMoS4 je 0,020 až 0,040 % s dovolenou odchylkou v hotovém výrobku  $\pm 0,005$  %.
- <sup>2)</sup> u jedné tavby smí být překročena horní nebo spodní hranice rozmezí, ale nikoliv obě současně.
- <sup>3)</sup> uvedené hodnoty musí být dosažitelné po odpovídajícím tepelném zpracování (zušlechtní) též u oceli dodávané ve stavu po válcování nebo ve stavu měkce žíhaném. Prokazují se na referenčním vzorku odpovídajícího průměru. Zkušební tělesa pro stanovení mechanických hodnot musí být odebrána v souladu s předpisem normy TDP.
- $R_e$  – mez kluzu,  $R_m$  – pevnost v tahu, A – tažnost ( počáteční délka  $L_0 = 5,65 \square S_0$  ), Z – kontrakce, KV – nárazová práce, zkušební těleso ISO s V-vrubem (průměr ze tří naměřených hodnot, z nichž žádná nesmí být menší než 70% minimální střední hodnoty).
- <sup>4)</sup> pro ocel objednanou bez požadavků na prokalitelnost jsou hodnoty prokalitelnosti pouze informativní.
- <sup>5)</sup> +H – normální hodnoty pro celý pás prokalitelnosti, +HH - zúžený pás prokalitelnosti směrem k horní hranici, +HL – zúžený pás prokalitelnosti směrem ke spodní hranici.

# Príloha 3



✓ (  $\nabla Ra 1,6$  )

|                         |  |           |  |                            |  |
|-------------------------|--|-----------|--|----------------------------|--|
| MATERIAL - NÁZOV        |  | ZIEHA     |  | DATUM                      |  |
| SCALE PROJECT - MÄŠKA   |  | TUBES     |  | PROFIS                     |  |
| PROJEKT - 139 F1        |  | DATE      |  | SCALE:                     |  |
| AUTORIT ETI BUI: 258015 |  | SIGNATURE |  | REL.BIT 0.28 / 80          |  |
| TOLERATION 132 208 - IN |  | DATE      |  | ASSEMBLY STEERING ASSEMBLY |  |
| NAME:                   |  | DATE      |  | DRAW: 80M FS3              |  |
| DRAWN: DUKOVICOVA T.    |  | 7.4.2021  |  | BOM FS3                    |  |
| CHECKED:                |  | APPROVED: |  | PRODUCT DESIGNATION:       |  |
|                         |  |           |  | Steering column housing    |  |
|                         |  |           |  | PRODUCT NUMBER             |  |
|                         |  |           |  | FS13-21-SU-6F22-A          |  |
|                         |  |           |  | LIST: 1/1                  |  |



CZECH TECHNICAL UNIVERSITY IN PRAGUE