



Bakalářská práce

Návrh konstrukce nového designu disku kola pro elektromobilní vozidla

Studijní program:

B0715A270008 Strojírenství

Autor práce:

Václav Salač

Vedoucí práce:

doc. Ing. Michal Petřů, Ph.D.

Katedra částí a mechanismů strojů

Liberec 2024



Zadání bakalářské práce

Návrh konstrukce nového designu disku kola pro elektromobilní vozidla

<i>Jméno a příjmení:</i>	Václav Salač
<i>Osobní číslo:</i>	S21000185
<i>Studijní program:</i>	B0715A270008 Strojírenství
<i>Zadávající katedra:</i>	Katedra částí a mechanismů strojů
<i>Akademický rok:</i>	2023/2024

Zásady pro vypracování:

Bakalářská práce se zabývá návrhem konstrukce nového designu disku kola pro elektromobilní vozidla. Disk bude navržen tak, aby byl lehký, aerodynamický, inovativní, budou využity lehké materiály. V práci bude uveden současný stav techniky, průzkum trhu a řešerše v oblasti nejen elektromobilních vozidel. Navrhnou se min. 3 koncepty nové konstrukce, které budou zhodnoceny a bude z nich vybrán jeden, který bude následně optimalizován až do funkční podoby. Poté budou provedeny potřebné výpočty a vyhotovení 3D modelu a technické dokumentace vybrané varianty disku kola pro elektromobilní vozidlo. Na konci práce bude provedeno ekonomické a závěrečné zhodnocení výsledné konstrukce disku kola.

1. Stav techniky současného stavu
2. Průzkum trhu a řešerše (jaké jsou zásady konstruování disků kol)
3. Navrhnout min. 3 koncepty řešení konstrukce disku kola
4. Provést pevnostní výpočty / simulace
5. Vyhotovení 3D modelu a technické dokumentace vybrané varianty disku kola pro elektromobilní vozidlo
6. Ekonomické posouzení
7. Závěrečné zhodnocení

<i>Rozsah grafických prací:</i>	5
<i>Rozsah pracovní zprávy:</i>	50
<i>Forma zpracování práce:</i>	tištěná/elektronická
<i>Jazyk práce:</i>	čeština

Seznam odborné literatury:

- [1] Petrů, M.; Mlýnek, J.; Martinec, T., Ryvolová, M.: Vybrané postupy konstruování kompozitu vyztuženého dlouhými vlákny. Technická univerzita v Liberci, 2019, 978-80-7494-477-2
- [2] Leister, G.: Car design : Passenger car tires and wheels : development – manufacturing – application. Cham, Switzerland : Springer, 2018, 978-3-319-50117-8
- [3] Lewin, T.; McGovern, G.: Car design: the history, principles and concepts behind modern car design. Minneapolis : Quarto Publishing Group USA Inc., 2017, 978-0-76036-206-8
- [4] Vlček, F.: Car design Podvozky motorových vozidel. Brno : Vlček, 2006, 80-239-6464-X
- [5] Mašín, I.; Petrů, M.; Novák, O.: Metody inovačního inženýrství na mikro-úrovni. Technická univerzita v Liberci, 2015, ISBN 978-80-7494-187-0
- [6] Bronček, J., Žarnay, M., Bašťovanský, R., Konstantova, V., Petrů, M.; Mašín, I.: Technologickost konstrukcí. Edis-vydavatel'ské centrum Žilinské univerzity, 2020, 978-80-554-1724-0
- [7] Pešík, L.: Části strojů. 1. díl. Liberec: TUL, 2010, ISBN 978-80-7372-573-0
- [8] Pešík, L.: Části strojů. 2. díl. Liberec: TUL, 2010, ISBN 978-80-7372-574-7
- [9] Petrů, M. a spol. Vybrané statě z částí strojů I – příklady pro cvičení, Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2015. ISBN 978-80-7494-203-7
- [10] Internetové podklady firem vyrábějících nebo prodávajících disky a kola (WWW stránky).

Vedoucí práce: doc. Ing. Michal Petrů, Ph.D.
Katedra částí a mechanismů strojů

Datum zadání práce: 14. listopadu 2023

Předpokládaný termín odevzdání: 15. května 2025

L.S.

doc. Ing. Jaromír Moravec, Ph.D.
děkan

doc. Ing. Jaromír Moravec, Ph.D.
garant studijního programu

V Liberci dne 14. listopadu 2023

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně jako původní dílo s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé bakalářské práce a konzultantem.

Jsem si vědom toho, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu Technické univerzity v Liberci.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti Technickou univerzitu v Liberci; v tomto případě má Technická univerzita v Liberci právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Současně čestně prohlašuji, že text elektronické podoby práce vložený do IS/STAG se shoduje s textem tištěné podoby práce.

Beru na vědomí, že má bakalářská práce bude zveřejněna Technickou univerzitou v Liberci v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů.

Jsem si vědom následků, které podle zákona o vysokých školách mohou vyplývat z porušení tohoto prohlášení.

Návrh konstrukce nového designu disku kola pro elektromobilní vozidla

Anotace

Tato bakalářská práce se zabývá návrhem disku kola s ohledem na současné požadavky a trendy v designu automobilových kol pro elektromobilní vozidla. V rešeršní části jsou nejprve představeny současné konstrukční typy disků kol osobních vozidel, jež jsou rozděleny do kapitol podle výrobního materiálu a konstrukčního provedení. Následuje přehled pokrokových přístupů a inovací v oblasti automotive a designu disků kol. V další části jsou popsány základní konstrukční zásady a přístupy, jež je třeba zohlednit při návrhu disku kola. Praktická část představuje samotný proces návrhu disku. Ten začíná představením několika navržených konstrukčních konceptů a následně výběrem a zhodnocením nejvhodnějšího z nich. Následuje kompletní rozpracování vybraného konceptu disku do finální podoby. Tento proces začíná vytvořením CAD modelu v softwaru PTC Creo. Dále je tento model podroben simulaci silového zatížení s využitím softwaru Ansys. Provedena je i analýza bezpečnosti při statickém a dynamickém namáhání. V závěru je disk kola ekonomicky zhodnocen včetně výsledné ceny disku kola. Technické výkresy jsou součástí přílohy.

Klíčová slova

disk, ráfek, elektromobil, kompozit, prepreg, CFRP, MKP

Design of a new wheel disk design for electric vehicles

Annotation

This bachelor's thesis deals with the design of a wheel disc considering current requirements and trends in the design of passenger car wheels for electric vehicles. Current design types of wheel discs of passenger cars are presented in the first section of research part, which are divided into chapters according to the type of material and design type. The following is an overview of advanced approaches and innovations in the field of automotive and wheel disc design. The next part describes the basic design principles and approaches that have to be considered when designing a wheel disc. The practical part presents the disc design process itself. It starts with the presentation of several proposed construction concepts and then selecting and evaluating the most suitable of them. This is followed by a complete development of the selected disc concept into its final form. This process starts with the creation of CAD model in PTC Creo software. Furthermore, this model is tested by an analysis of force load with the use of Ansys software. An analysis of static and dynamic force load is created too. In the end, the wheel disc is economically evaluated, including the final price of the wheel disc. Technical drawings are part of the attachment.

Keywords

disc, rim, electric car, composite, prepreg, CFRP, FEM

Poděkování

Poděkování bych rád vyjádřil panu doc. Ing. Michal Petřů, Ph.D. za vedení a cenné rady při psaní bakalářské práce. V neposlední řadě tímto děkuji své rodině a přátelům za podporu v průběhu dosavadního studia.

Obsah

Seznam obrázků	11
1 Úvod.....	13
2 Cíle bakalářské práce	14
3 Rešeršní část	14
3.1 Druhy disků kol	14
3.1.1 Ocelové disky.....	14
3.1.2 Kola z lehkých slitin	15
i. Odlévané disky.....	16
ii. Kované disky	17
3.1.3 Vicedílná kola	19
3.2 Současné trendy v designu kol a automotive.....	19
3.2.1 Elektromobilismus	19
3.2.2 Použití kompozitních materiálů	20
3.2.3 Generativní design	20
3.2.4 Využití umělé inteligence.....	21
3.3 Konstrukční zásady disků kol.....	22
3.3.1 Ráfky.....	22
3.3.2 Značení disků a názvosloví.....	24
3.3.3 Kolové šrouby a matice	25
3.4 Polymerní kompozitní materiály s vláknovou výztuží	26
3.4.1 Plnivo	26
3.4.2 Pojivo	27
3.4.3 Prepregy	27
4 Konstrukční návrh disku.....	29
4.1 Návrh konceptů.....	29
4.1.1 Koncept č. 1	30
4.1.2 Koncept č. 2	30
4.1.3 Koncept č. 3	30
4.2 Zhodnocení a výběr konceptu.....	31
4.3 Rozpracování vybraného konceptu.....	31
4.3.1 Příprava numerické simulace pro silové zatížení disku.....	33
i. Doplnující komponenty simulačního modelu.....	34
iii. Tvorba sítě.....	37

iv.	Kontaktní vazby	38
v.	Okrajové podmínky	38
4.3.2	Výsledky numerické simulace silového zatížení disku	38
4.3.3	Kontrola bezpečnosti navrženého disku	44
i.	Bezpečnost při statickém napětí.....	44
ii.	Bezpečnost při dynamickém napětí	45
4.4	Ekonomické zhodnocení.....	46
5	Vyhodnocení a diskuse výsledků	48
5.1	Výsledky rešeršní části	48
5.2	Výsledky praktické části.....	48
5.2.1	Zhodnocení návrhu kompozitního ráfku.....	49
5.2.2	Zhodnocení modelu pneumatiky využitého v simulaci	49
5.2.3	Problematika šroubových spojů.....	49
5.2.4	Aerodynamické vlastnosti disku kola	50
5.2.5	Vyhodnocení kontroly bezpečnosti	50
5.2.6	Vyhodnocení celkové kalkulace.....	50
6	Závěr.....	51
	Použitá literatura.....	52
	Seznam příloh	54

Seznam zkratk a symbolů

A_5	Poměrné prodloužení při lomu	[%]
ACP	Ansys Composite PrePost	
AI	Artificial intelligence (umělá inteligence)	
CAD	Computer Aided Design	
CB	Center Bore	
E	Modul pružnosti	[MPa]
ET	Einpresstiefe	
F	Síla	[N]
FEM	Finite Element Method	
I	Moment setrvačnosti	[kg.m ²]
M	Moment síly	[N.m]
MKP	Metoda konečných prvků	
PCD	Pitch Circle Diameter	
$R_{p0,2}$	Smluvní mez kluzu	[MPa]
a	Zrychlení	[m.s ⁻²]
d	Průměr	[m]
k	Součinitel bezpečnosti při statickém zatížení	[-]
k_a	Součinitel bezpečnosti vůči amplitudovému napětí	[-]
k_m	Součinitel velikosti součásti	[-]
k_{sf}	Součinitel jakosti povrchu	[-]
m	Hmotnost	[kg]
q	Součinitel vrubové citlivosti	[-]
t	Čas	[s]
v	Rychlost	[m.s ⁻¹]
r	Poloměr	[m]
α	Tvarový součinitel	[-]
β	Součinitel vrubu	[-]
ε	Úhlové zrychlení	[rad.s ⁻²]
μ	Poissonova konstanta	[-]
ρ	Hustota	[kg.m ⁻³]
σ_a	Hodnota amplitudového napětí	[MPa]
σ_a^*	Mezní hodnota amplitudového napětí skutečné součásti	[MPa]
σ_c	Mez únavy	[MPa]
σ_c^*	Mez únavy skutečné součásti	[MPa]
σ_{EQ}	Ekvivalentní napětí	[MPa]
σ_e	Mez kluzu v tahu	[MPa]
σ_h	Horní mezní napětí	[MPa]
σ_m	Mez pevnosti v tahu	[MPa]
σ_n	Dolní mezní napětí	[MPa]
ω	Úhlová rychlost	[rad.s ⁻¹]

Seznam obrázků

Obr. 3.1 Automobilové kolo vyrobené z ocelového plechu [1]	14
Obr. 3.2 Zobrazení různých způsobů provedení spoje disku a ráfku ocelových kol [1]	15
Obr. 3.3 Graf zobrazující závislost meze kluzu $R_{p0,2}$ [MPa] na poměrném prodloužení při lomu $A_5 \varepsilon$ [%] odlévaných a tvářených slitin hliníku (přeloženo autorem) [1]	16
Obr. 3.4 Schéma technologie nízkotlakého lití (upraveno autorem) [1]	17
Obr. 3.5 Disk kola Škoda VEGA ze slitiny hliníku [2]	17
Obr. 3.6 Proces výroby kol z kované hliníkové slitiny (přeloženo autorem) [1]	18
Obr. 3.7 Ilustrace kola před a po operaci flow forming [1]	18
Obr. 3.8 2-dílné kolo Brixton Carbon+ (vlevo) a 3-dílné kolo ESR Wheels (vpravo) [3], [4]	19
Obr. 3.9 Škoda Enyaq Coupe RS iV (vlevo) a Peugeot Inception Concept [5], [6]	20
Obr. 3.10 Celokompozitní disk kola [7]	20
Obr. 3.11 Disk kola navržený metodou generativního designu [8]	21
Obr. 3.12 Obrazové návrhy vygenerované prostřednictvím AI [9]	21
Obr. 3.13 Řez kola s popisem jeho základních částí [10]	22
Obr. 3.14 Řez uložením kola na nápravě automobilu [11]	22
Obr. 3.15 Názvoslovní ráfku [10]	23
Obr. 3.16 Výběr profilů dosedacích ploch ráfků [10]	23
Obr. 3.17 Příklad značení litých a plechových diskových kol [12]	24
Obr. 3.18 Základní konstrukční rozměry kola [12]	24
Obr. 3.19 Ilustrace kladného a záporného zápisu [10]	25
Obr. 3.20 Typy kolových šroubů a matic [10]	25
Obr. 3.21 Snímek porovnání velikosti průměru lidského vlasu a uhlíkového vlákna [14]	26
Obr. 3.22 Příklady typů vazeb vlákněných tkanin a) plátňová vazba b) keprová vazba c) atlasová (saténová) vazba [16]	27
Obr. 3.23 Proces kladení prepregových přířezů do formy tvořící celokompozitní disk kola automobilu [17]	28
Obr. 3.24 Dokončené ráfky kol připravené k vytvrzovacímu procesu v autoklávu [18]	28
Obr. 4.1 Skica provedení konceptu č. 1	30
Obr. 4.2 Skica provedení konceptu č. 2	30
Obr. 4.3 Skica provedení konceptu č. 3	31
Obr. 4.4 Render přední strany 3D modelu vybraného disku kola	32
Obr. 4.5 Render zadní strany 3D modelu vybraného disku kola	32
Obr. 4.6 Zobrazení šroubového spoje disku s ráfkem v řezu sestavou	33
Obr. 4.7 Model pneumatiky a náboje kola	34
Obr. 4.8 Výsledné schéma simulace s využitím různých modulů v softwaru Ansys	35
Obr. 4.9 Ráfek s vizualizovaným hlavním směrem vláken vybrané vrstvy prepregu	36
Obr. 4.10 Tabulka s orientacemi jednotlivých vrstev prepregů	36
Obr. 4.11 Hodnoty modulu pružnosti v závislosti na zkoumaném směru jednotlivé vrstvy prepregu (vlevo) a vrstveného laminátu (vpravo)	37
Obr. 4.12 Detail vygenerované sítě mesh	37
Obr. 4.13 Simulační model s okrajovými podmínkami situace stojícího vozidla	39
Obr. 4.14 Napěťová analýza disku stojícího vozidla	39

Obr. 4.15 Napěťová analýza ráfku stojícího vozidla.....	40
Obr. 4.16 Simulační model s okrajovými podmínkami	41
Obr. 4.17 Napěťová analýza disku	41
Obr. 4.18 Deformační analýza disku	42
Obr. 4.19 Napěťová analýza ráfku	42
Obr. 4.20 Deformační analýza ráfku	43
Obr. 4.21 Analýza bezpečnosti disku při statickém zatížení	44
Obr. 4.22 Graf závislosti mechanického napětí na čase představující dynamické namáhání [23]	45
Obr. 4.23 Pohled na rozloženou výslednou sestavu	47

1 Úvod

Kolo, jakožto jeden z nejdůležitějších vynálezů v technickém vývoji lidstva, má za sebou již tisíce let historie. Svého významnějšího rozvoje se však dočkalo až s nástupem automobilů poháněných spalovacími motory v období 2. průmyslové revoluce, kdy bylo nutné zamyslet se nad jeho zdokonalením a přizpůsobit kolo novému využití.

V současnosti se, již etablovaný, automobilový průmysl potýká s podobnou výzvou, a to nástupem elektrických pohonů automobilů. Otevírá se tak nový prostor pro inovace nejen v oblasti konstrukčního a materiálového inženýrství. Již dnes můžeme pozorovat nová designová provedení kol stávajících elektromobilů na silnicích či koncepčních vozidlech. Kupříkladu automobilka Škoda Auto a. s. nedávno představila koncepční vůz Škoda Vision 7S, jenž má představovat nový designový jazyk společnosti směřující k elektromobilitě. Právě na discích kol je patrná novinka ve formě tzv. aero krytů, jejichž funkce spočívá v podpoření aerodynamických vlastností vozidla s ohledem na designové kvality automobilu. Toto řešení lze pozorovat již i na současných vozech Škoda. Jedná se tak o jeden z mnoha dalších příkladů inovačních možností v oblasti disků kol. U elektromobilů je v současnosti obecně kladen důraz na co nejnižší odpor vzduchu tak, aby byl v návaznosti na výdrž poměrně hmotné baterie zaručen co nejdelší dojezd. Zároveň je snižování spotřeby v souladu s motivem snižování uhlíkové stopy. Na to samé má však vliv i hmotnost samotného kola, která díky svému principu ovlivňuje i jeho moment setrvačnosti a následně dynamické vlastnosti vozidla. Proto se zároveň s rozvojem materiálového inženýrství dostávají do popředí velice komplexní materiály, které napomáhají snížit hmotnost při zachování potřebné pevnosti. Jedná se především o různé druhy kompozitních materiálů, převážně CFRP (Carbon Fibre Reinforced Polymer), což je označení pro polymery vyztužené uhlíkovými vlákny. Pro porovnání, měrná hmotnost oceli je obecně uváděna jako $7850 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. U kompozitů vyztužených uhlíkovými vlákny se však dostáváme až na hodnoty kolem $1600 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. V současné době převládá využití součástí vyrobených z kompozitních materiálů primárně v leteckém a kosmickém inženýrství převážně z důvodu ekonomicky náročné výroby. Neutuchajícím tempem se však kompozity rozšiřují i do dalších oblastí průmyslu, jako včetně automotive. Nejen v této oblasti nachází uplatnění i celá řada netradičních druhů kompozitů, jako jsou třeba polymery vyztužené lněnými vlákny, tedy vlákny organického původu. Tyto materiály se nazývají biokompozity a společně s dalšími převážně recyklovanými materiály jsou hojně zastupovány v podobě dílů karoserií, či v interiérech elektromobilních vozidel.

S postupným vývojem kompozitních materiálů, lze tedy do jisté míry očekávat rozvoj jejich hromadné výroby společně s postupem v řešení otázek ekologické výroby a recyklace podobných materiálů zároveň s řešením zdravotních rizik souvisejících s jejich produkcí. Tato skutečnost umožní rozšíření využití kompozitních materiálů v aplikacích, které si jejich výhodné vlastnosti přímo žádají, jen se na ně prozatím nedostala řada.

2 Cíle bakalářské práce

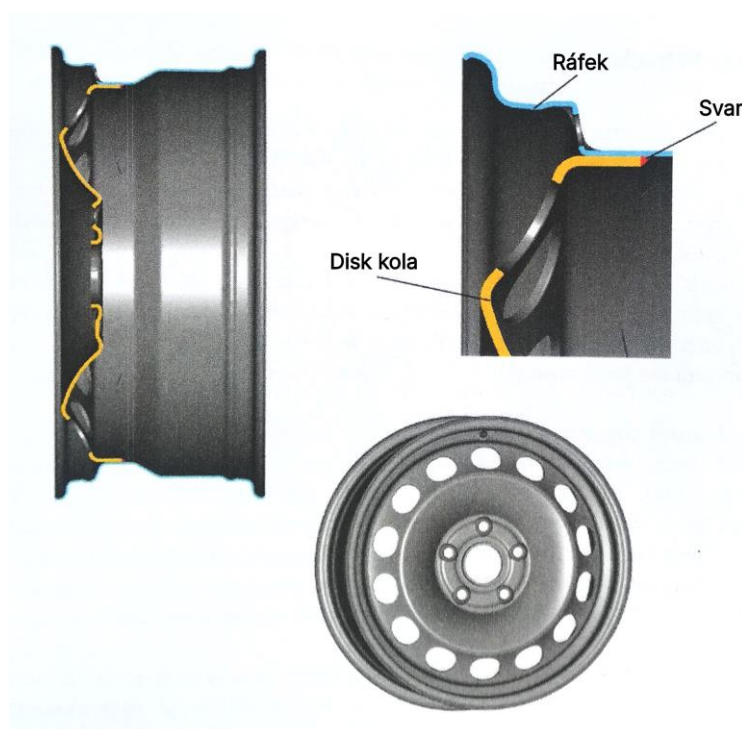
Cílem bakalářské práce je navrhnout disk kola s ohledem na současné konstrukční požadavky elektromobilních vozidel, primárně docílení co nejdelšího dojezdu. Vycházeno je z rešerše v současnosti vyráběných disků kol. Pracováno je s lehkými materiály včetně materiálů kompozitních. Součástí návrhu je vytvoření kompletního CAD modelu finální verze disku, včetně provedení analýzy jeho silového zatížení v softwaru Ansys. Nechybí ani ekonomické zhodnocení výroby disku a vypracovaná technická dokumentace.

3 Rešeršní část

3.1 Druhy disků kol

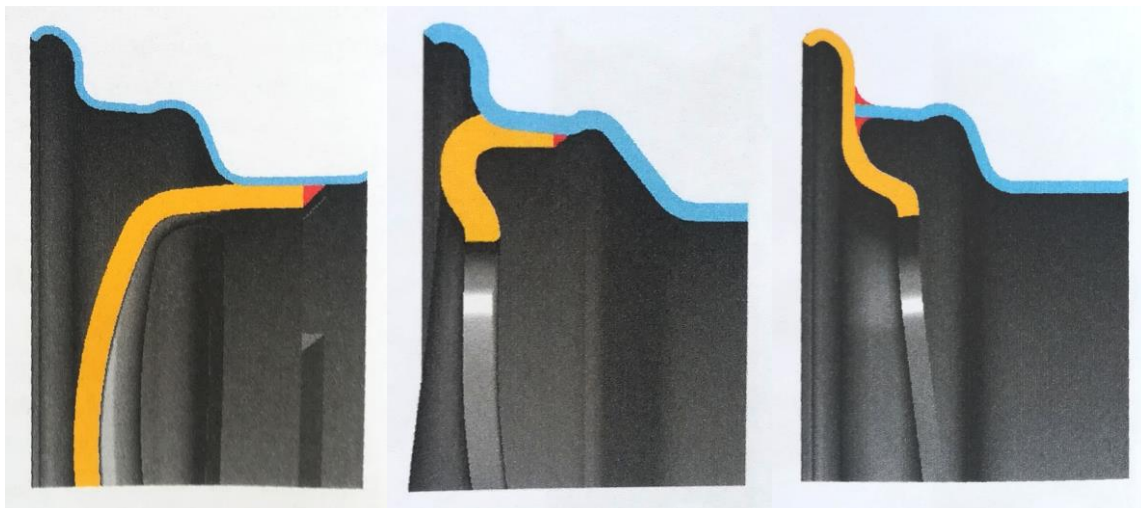
3.1.1 Ocelové disky

Lisovaná kola z ocelových plechů patří k nejzákladnějším a nejlevnějším typům automobilových kol. Jejich výroba je levná a snadno automatizovatelná. Vyžívají se také jako tzv. dojezdová kola nebo tam, kde není kladen nárok na jejich dokonalé technické parametry. Ocelová kola sestávají ze dvou částí, a to ráfku a disku, které jsou v jeden celek spojeny svářením (**Obr. 3.1**). Obě části jsou vyráběny z ocelových plechů válcovaných za tepla, které jsou následně tvarovány válcováním a tvářením. Pro běžná kola se využívají mořené pásové ocelové plechy odvíjené z cívky. Díky dobrým mechanickým vlastnostem tohoto materiálu je možné vyrábět tenkostěnná kola s dostatečnými tolerančními požadavky. Mezi nejpřesněji kalibrované části disku patří válcová plocha středové díry, tak aby byla zaručena co nejmenší házivost. Díry pro šrouby jsou konstruovány soustředně vzhledem ke středové díře [1].



Obr. 3.1 Automobilové kolo vyrobené z ocelového plechu [1]

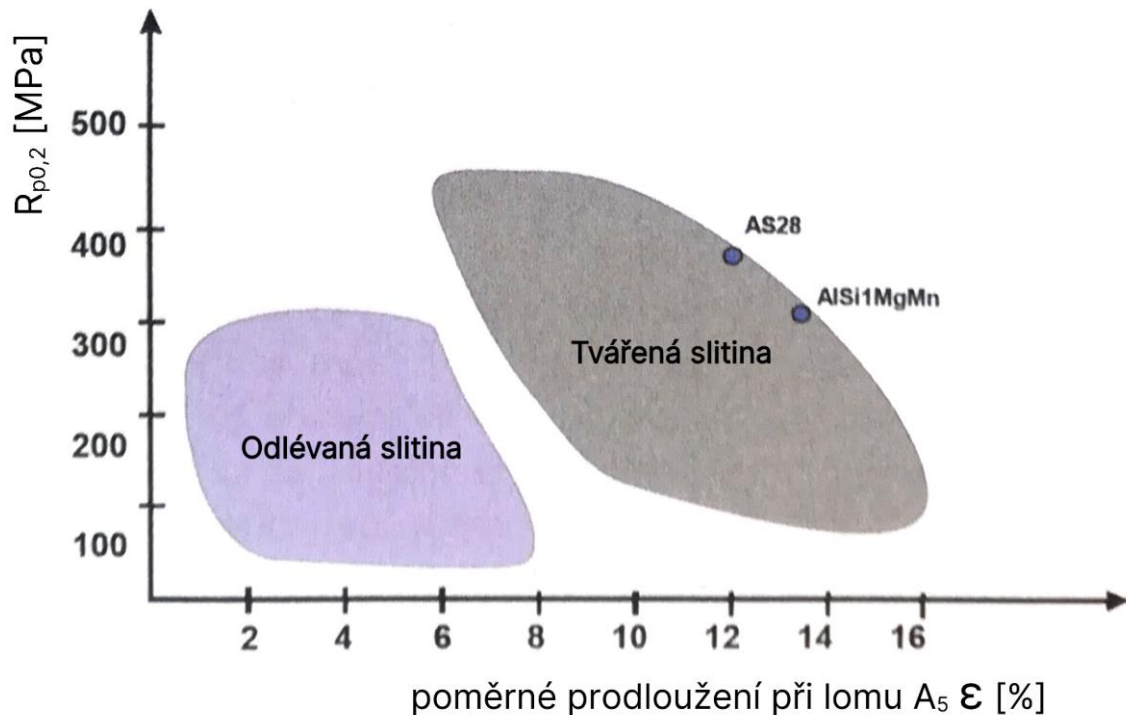
Napojení disku a ráfku může být provedeno různými způsoby. Svarový spoj může být ve standardním provedení umístěn na spodní stranu prohloubení ráfku nebo na spodní stranu ráfku v místě dosednutí pneumatiky. Existuje i varianta, kdy funkci patky ráfku přebírá disk kola a ráfek samotný je připojen k disku koutovými svary. Při vnějším pohledu na kolo automobilu s tímto typem konstrukce je tak viditelný prakticky jen disk (**Obr. 3.2**) [1].



Obr. 3.2 Zobrazení různých způsobů provedení spoje disku a ráfku ocelových kol [1]

3.1.2 Kola z lehkých slitin

Kola z lehkých slitin jsou ve většině případů koncipována jako kola paprsková. To znamená, že střed disku obsahující středovou díru a díry pro šrouby je spojen podlouhlými částmi různého průřezu s ráfkem kola v místě patky ráfku, přičemž vše je oproti diskům plechovým vyráběno v jednom celku. V porovnání s ocelovými koly spočívá jejich výhoda v nižší hmotnosti, což má za následek nižší spotřebu paliva a lepší jízdní vlastnosti prokazující se lepší ovladatelností vozidla. Jejich nespornou výhodou je i možnost výběru z mnoha designových provedení, jenž tato technologie výroby nabízí. S porovnáním s ocelovými koly je však jejich pořizovací cena vyšší a zároveň jsou náročnější na údržbu. Přesto se dnes kola z lehkých slitin těší velké popularitě. Hlavní složkou lehkých slitin pro výrobu kol je ve většině případů hliník, popř. hořčík. Hořčíková kola se používají převážně u závodních automobilů, jelikož disponují ještě nižší hmotností než kola z hliníkových slitin. Kola z hliníkových slitin se dle použitého typu slitiny a způsobu zpracování rozdělují na tzv. litá (cast) a kovaná (forged).

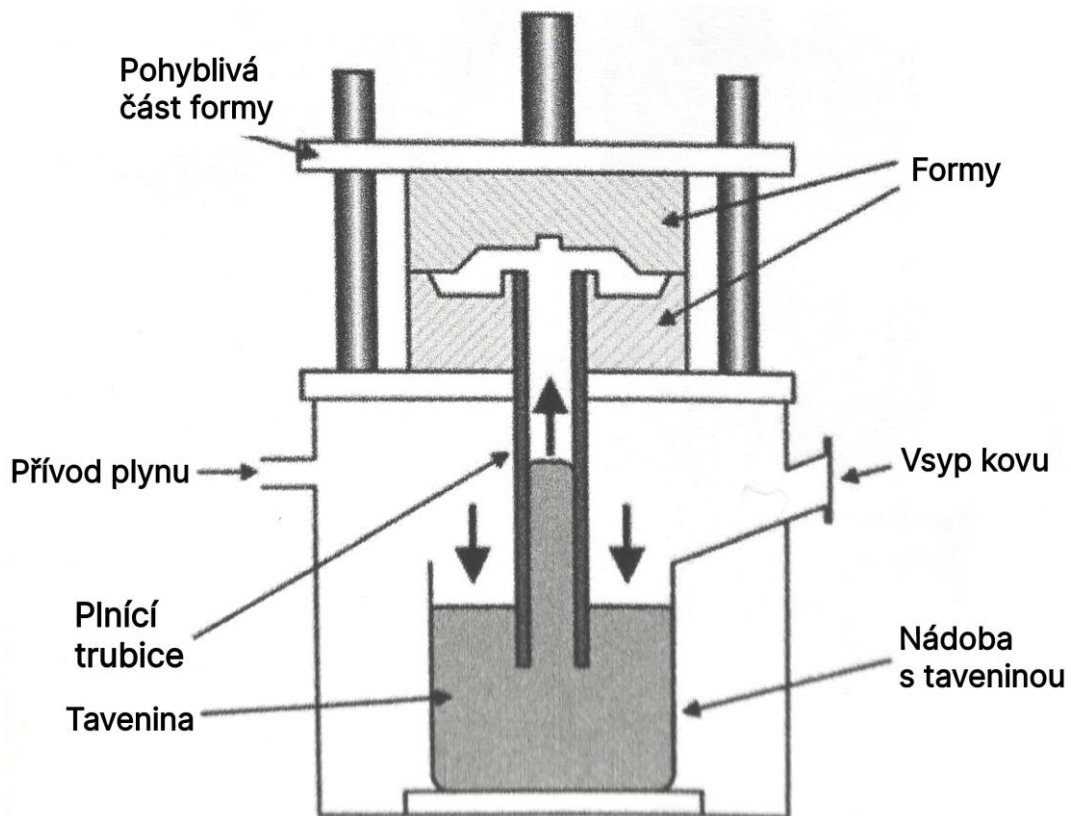


Obr. 3.3 Graf zobrazující závislost meze kluzu $R_{p0,2}$ [MPa] na poměrném prodloužení při lomu $A_5 \epsilon$ [%] odlévaných a tvářených slitin hliníku (přeloženo autorem) [1]

i. Odlévané disky

Lité disky kol z hliníkových slitin jsou v současnosti velmi rozšířenou alternativou, k diskům ocelovým. Tyto disky díky své hmotnosti poskytují vozu lepší jízdní vlastnosti a celkový lepší estetický vzhled automobilu. V počátcích výroby kol z hliníkových slitin v 60. letech 20. století byly disky zprvu odlévány do pískových forem. Postupem času se i s nárůstem sériové výroby se prověřila dokonalejší technologie tlakového lití. Tlakové lití je obecně jednou z nejrozšířenějších technologií pro výrobu součástí z hliníkových slitin. Proces začíná vyplněním ocelové formy vysokou rychlostí pod vysokým tlakem. Díky tomu jsou odlitky velice geometricky přesné a mají výbornou kvalitu povrchu. Nevýhoda této metody však spočívá v možných metalurgických defektech odlitků. Proto se v současnosti již nejedná o vhodnou technologii pro výrobou součástí s důrazem na vysokou bezpečnost jako jsou právě kola automobilů. V současnosti je více než 90% kol z hliníkových slitin odlévaných technologií nízkotlakého lití. Jedná o výhodnou technologii pro součásti, které vyžadují rotační symetrii. V této technologii je roztažená slitina tlačena pod tlakem 1 bar plnicí trubicí směrem do formy [1] (**Obr. 3.4**).

Výhodou disků z hliníkových slitin je možnost jejich povrchové úpravy lakováním s cílem vytvořit tak nejen odolnou vrstvu proti okolním vlivům ale i atraktivní design kol (**Obr. 3.5**).



Obr. 3.4 Schéma technologie nízkotlakého lití (upraveno autorem) [1]

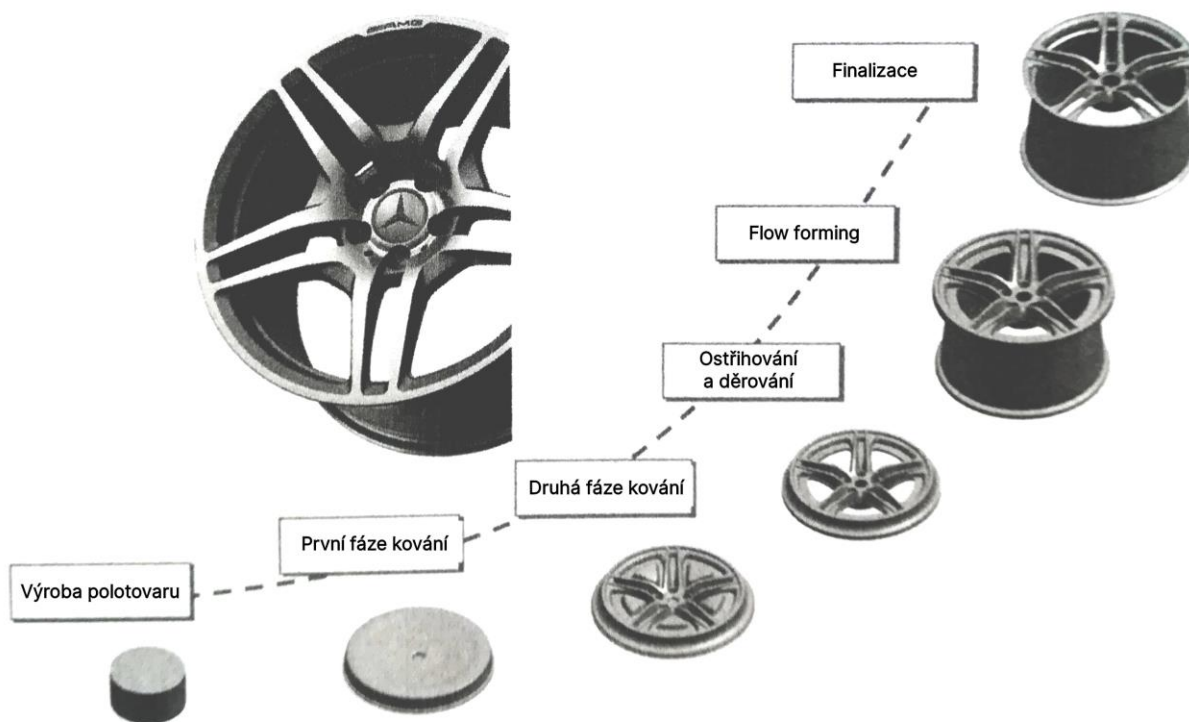


Obr. 3.5 Disk kola Škoda VEGA ze slitiny hliníku [2]

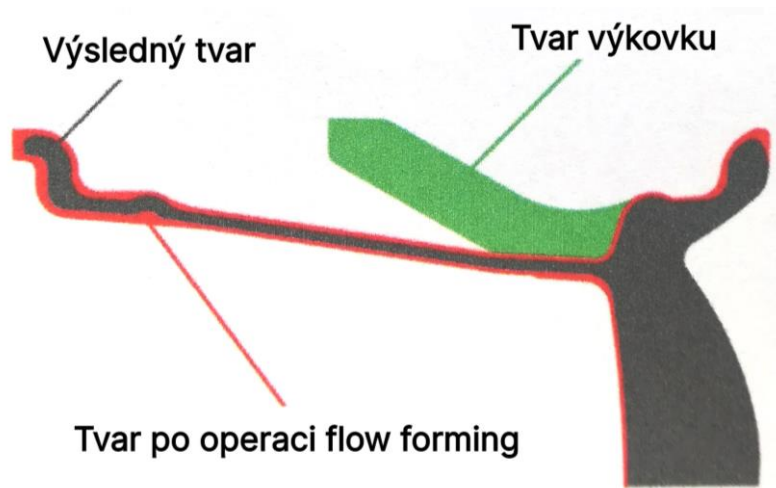
ii. Kované disky

Disky vyrobené ze slitin určených pro kovaná kola jsou obecně lehčí, tudíž nabízí ještě lepší jízdní vlastnosti než kola litá. Tyto slitiny jsou v porovnání s litými pevnější, tudíž je možné dosáhnout subtilnějších konstrukcí disků, což například nabízí i více místa pro brzdové kotouče. Jak je zřejmé, tato kola patří již k méně běžným i kvůli své ceně a používají se na vozidlech vyznačujících se spíše sportovními jízdními vlastnostmi. Postup výroby je následující (**Obr. 3.6**). Výchozím polotovarem pro kovaná kola jsou tyče kruhového průřezu o průměru 254–303mm

dlouhé 6m vyrobené kontinuálním litím ze slitiny AlSi1Mg. Tyto tyče jsou následně děleny kotoučovou pilou na válcové tvary. Tyto válce jsou poté tvářeny za tepla na automatizované kovací lince. Výsledkem je tak plochý tvar, který připomíná pouze část kola a to disk. Následuje operace zvaná flow forming, jejíž účelem je při rotaci ohřátého výkovku rozválcovat jeho okrajovou část do tvaru ráfku (**Obr. 3.7**). Zelou barvou je zobrazena část ráfku před rozválcováním a tvar s červeným obrysem znázorňuje finální tvar kola po dokončené operaci flow forming [1].



Obr. 3.6 Proces výroby kol z kované hliníkové slitiny (přeloženo autorem) [1]



Obr. 3.7 Ilustrace kola před a po operaci flow forming [1]

3.1.3 Vícedílná kola

Kola nemusí sestávat jen z jednoho monolitu. Jedním z konstrukčních řešení je varianta, kdy je disk a ráfek vyráběn samostatně a v jeden celek je posléze spojen šrouby. Takový typ kola je nazýván dvoudílný. Tato varianta nabízí variabilitu materiálu ráfku a disku. Je tak tedy možné, aby byl ráfek vyroben například z CFRP a disk z hliníkové slitiny (**Obr. 3.8**). Použitím lehkého materiálu na výrobu ráfku je docíleno vysoké úspory z hlediska momentu setrvačnosti kola, což má za důsledek zlepšení jízdních vlastností a úsporu paliva. Nejvytříbenější možností jsou třídílná kola, která mají oproti dvoudílným dělený i ráfek samotný. Dělí se tak na vnitřní ráfek, vnější ráfek a disk. Tyto komponenty jsou dohromady spojeny šrouby. Mezi jejich nevýhody však patří vyšší cena a kvůli počtu šroubů mohou mít vyšší hmotnost, než 2-dílná nebo jedno-dílná.



Obr. 3.8 2-dílné kolo Brixton Carbon+ (vlevo) a 3-dílné kolo ESR Wheels (vpravo) [3], [4]

3.2 Současné trendy v designu kol a automotive

3.2.1 Elektromobilismus

Stále častěji je v současnosti slyšán pojem elektromobilita. Bezesporu se tak tedy jedná o jeden z nejprogresivnějších, směrů právě v automobilovém průmyslu. Tento nový směr v sobě skrývá mnoho nových možných inovačních a konstrukčních možností. Je tak tedy nutné zvážit dosavadní koncepční návrh vozidel a přizpůsobit budoucí konstrukce automobilů právě elektrickým pohonům. Jedním z důležitých parametrů při návrhu kol pro elektromobil je právě aerodynamika s cílem zajištění co nejvyššího dojezdu automobilu. Při návrhu designu kol je zlepšení aerodynamiky vozidla dosahováno obecně plochým designem disků. Jsou však hledány i další způsoby pro dosažení zmíněného, jako např. polymerní kryty disků (**Obr. 3.9**).



Obr. 3.9 Škoda Enyaq Coupe RS iV (vlevo) a Peugeot Inception Concept [5], [6]

3.2.2 Použití kompozitních materiálů

Kompozitní materiály nachází stále častější uplatnění nejen v automobilovém průmyslu. Díky svým vytříbeným mechanickým vlastnostem představují skvělý alternativní materiál k výrobě disků automobilových kol. Jejich použití se ovšem výrazně projevuje v ceně.



Obr. 3.10 Celokompozitní disk kola [7]

3.2.3 Generativní design

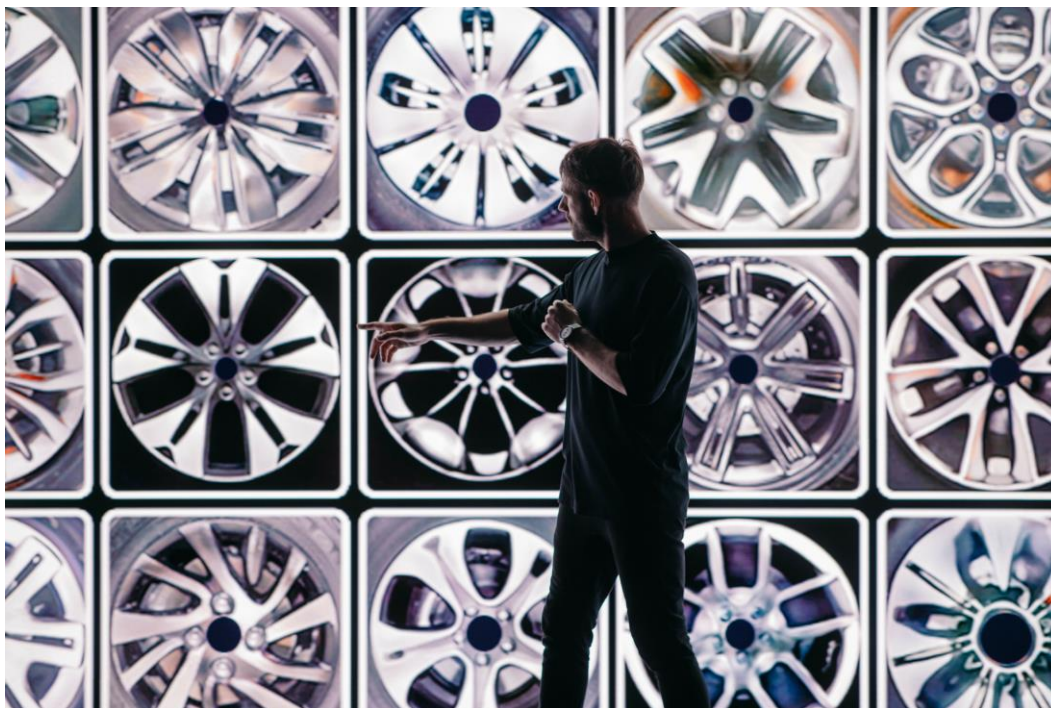
U elektromobilů, které obvykle váží díky své hmotné baterii více, než podobná vozidla se spalovacími motory je třeba kompenzovat jejich hmotnost v různých komponentech vozidla. Tento účel skvěle plní generativní design (optimalizace topologie). Volkswagen v rámci vozidla Type 20 Microbus Concept navrhl kola vytvořená právě s využitím generativního designu [8].



Obr. 3.11 Disk kola navržený metodou generativního designu [8]

3.2.4 Využití umělé inteligence

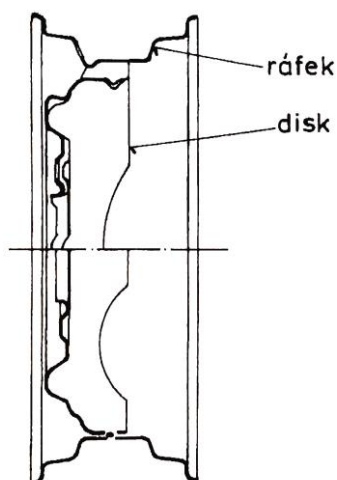
„Audi využívá AI k designu kol budoucnosti“ [9] – přeloženo autorem
Audi vyvíjí software s názvem FelGAN, který designéři využívají při vývoji nového výrazu disku. Jeho výstupem jsou obrazové návrhy disků kol. Designéři takto mohou hledat inspiraci při dalším vývoji [9].



Obr. 3.12 Obrazové návrhy vygenerované prostřednictvím AI [9]

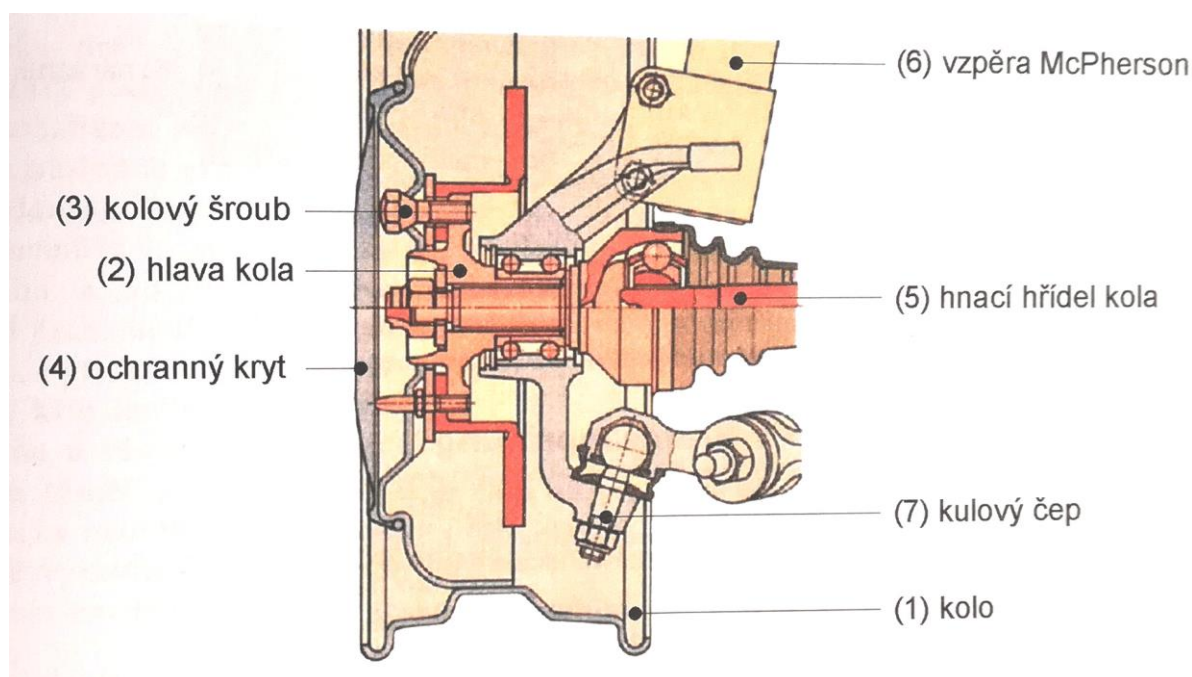
3.3 Konstrukční zásady disků kol

Kola osobních automobilů jsou s hlavami kol na nápravách spojena kolovými šrouby. Obecně sestávají z pneumatiky a disku (ráfku). Tyto dva termíny jsou v běžné diskuzi zaměňovány.



Obr. 3.13 Řez kola s popisem jeho základních částí [10]

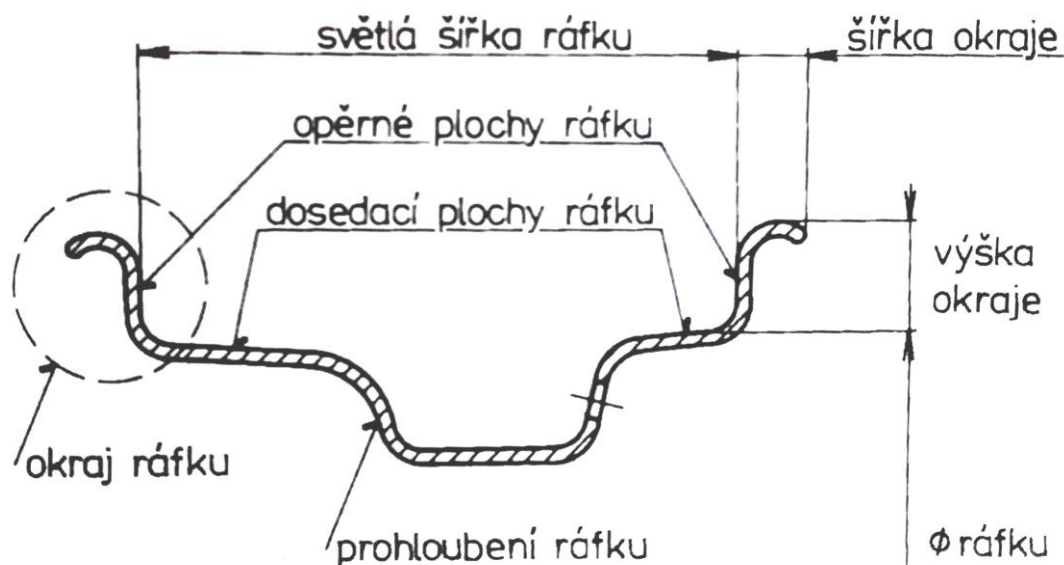
Kolo lze rozdělit na jeho dvě hlavní části, a to ráfek a disk (**Obr. 3.13**). Ty mohou být vyrobeny buď samostatně a následně svařeny (plechová kola) nebo v rámci jednoho kusu (alu kola).



Obr. 3.14 Řez uložením kola na nápravě automobilu [11]

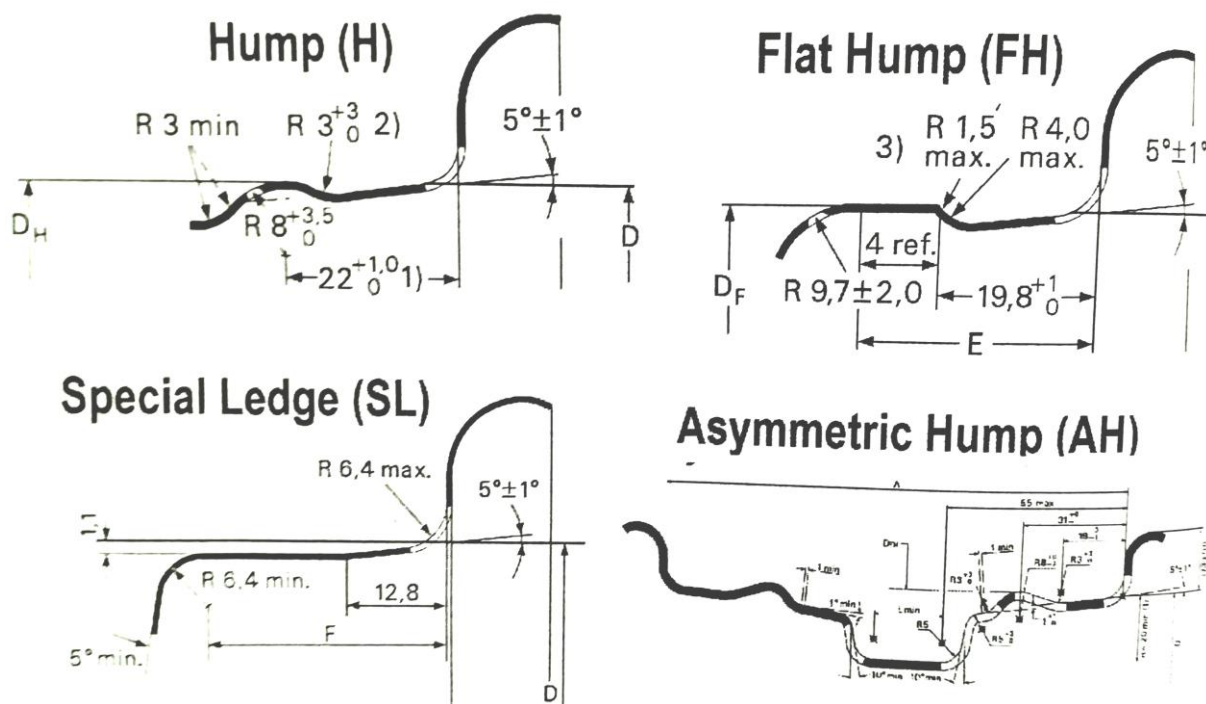
3.3.1 Ráfky

Ráfek je část kola, která je v přímém styku s pneumatikou. Přenáší svislé, boční i obvodové síly a současně tak zamezuje vzájemnému pohybu mezi ráfkem a nasazenou pneumatikou [10].



Obr. 3.15 Názvosloví ráfku [10]

Ráfek sestává z opěrných ploch ráfku, které spolu s plochami dosedacími slouží jako dorazy pro patky pneumatik. Jejich vzájemnou vzdáleností je určena šířka ráfku. Dosedací plochy jsou skloněny o $5^\circ \pm 1^\circ$. Ráfky s tímto sklonem jsou konstruovány s průměrem ráfku 10" až 24". Prohloubení ráfku plní účel snadné montáže pneumatiky na nedělený ráfek. Přítlakem pneumatiky k dosedacím plochám ráfku je zajištěn přenos obvodových sil. Ráfky vybavené obvodovým hrbolkem (hump) v místě dosedací plochy zamezují sesmeknutí bezdušové pneumatiky z místa v případě podhuštěného stavu [10].



Obr. 3.16 Výběr profilů dosedacích ploch ráfků [10]

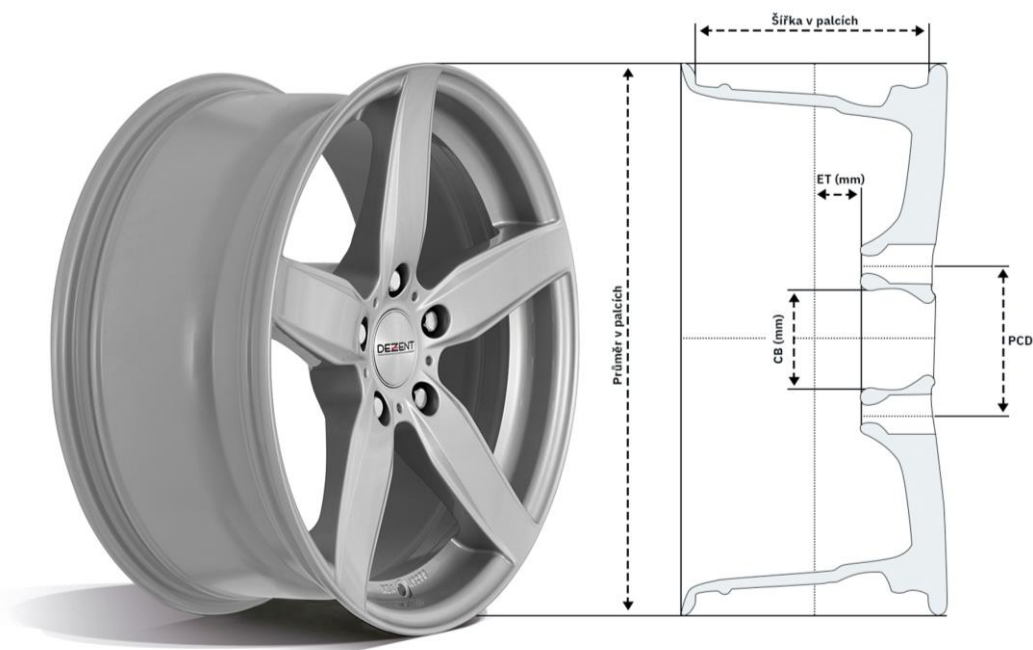
3.3.2 Značení disků a názvosloví

Každý disk je konstruován s určitými rozměry, tak aby bylo možné ho identifikovat a použít pro konkrétní typ vozidla. Pro v současnosti nejčastější typy automobilových kol (plechová kola a litá kola) je používáno následující značení (**Obr. 3.17**).



Obr. 3.17 Příklad značení litých a plechových diskových kol [12]

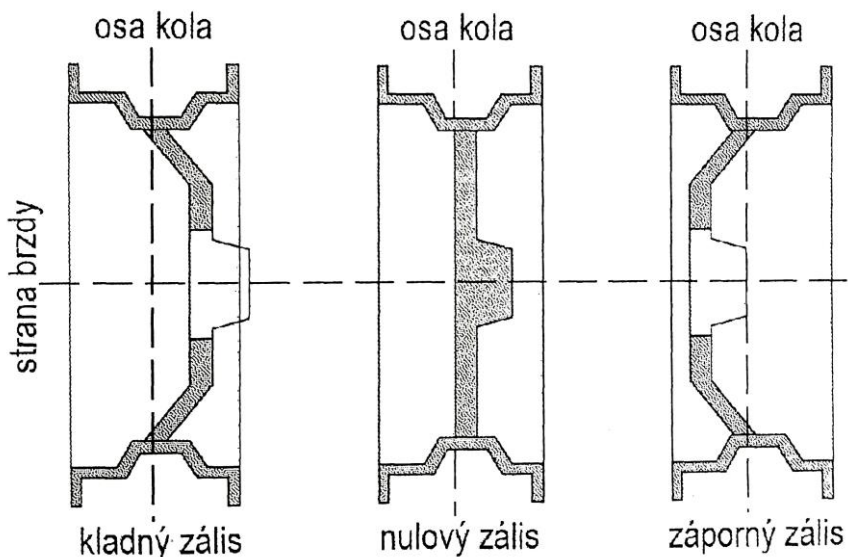
Prvním údajem zleva je označována šířka ráfku a je udávána v palcích. Za ním může následovat označení profilu bočnice ráfku. Znak ‚x‘ je používán pro značení ráfků s hlubokým prolisem. Dělené ráfky jsou označovány znakem ‚-‘. Dalším údajem je průměr ráfku (někdy označován jako PCD – Pitch Circle Diameter), jenž je také uváděn v palcích. Následuje údaj popisující počet děr a průměr roztečné kružnice děr. Posledním údajem je zális (ET), který je uváděn v milimetrech. V neposlední řadě může být v označení uváděn také typ profilu dosedací plochy na straně ráfku (H2, CH, apod.) [10, 12].



Obr. 3.18 Základní konstrukční rozměry kola [12]

Na **Obr. 3.18** je zobrazen řez litým kolem s kótami základních rozměrů. ET (mm) značí zális. Zkratka pochází z Německého výrazu „Einpress Tiefe“. Zkratka PCD skrývá anglický výraz Pitch Circle Diameter a znamená průměr roztečné kružnice. Středový otvor (CB - Centre Bore) je hodnota průměru díry měřené v zadní části kola. Tímto otvorem je kolo centrováno na náboj na podvozku [12].

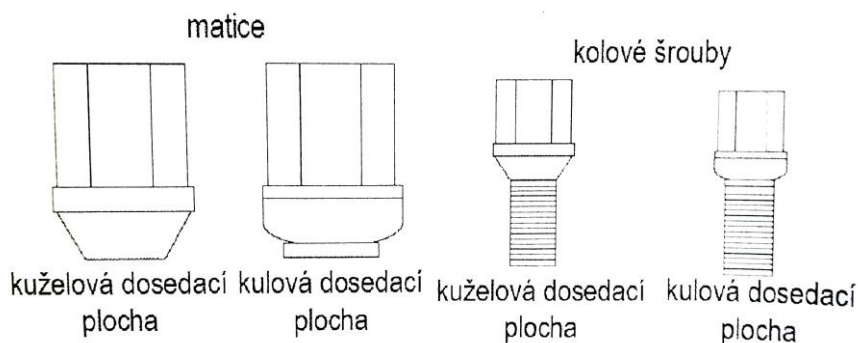
Zális je vzdálenost mezi dosedací plochou disku a geometrickým středem kola. Rozlišován je kladný a záporný zális. Je-li zális záporný, ráfek je posunut směrem ven z podběhu. Naopak je-li zális kladný, je ráfek posunut směrem dovnitř, tedy do středu nápravy [10, 12]



Obr. 3.19 Ilustrace kladného a záporného zálisu [10]

3.3.3 Kolové šrouby a matice

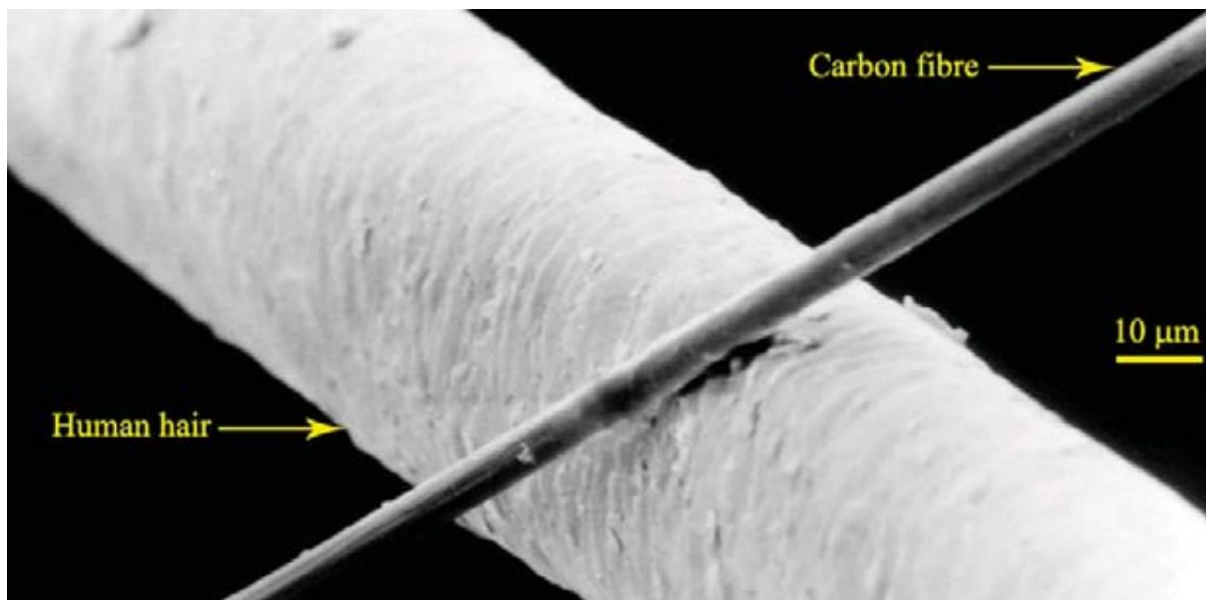
Spojení kola s nábojem na podvozku automobilu je zajištěno šroubovými spoji. Zároveň je prostřednictvím spoje pojištěno centrování kola s nábojem. Pro spojení kola s nábojem, jehož přímo součástí jsou kolové šrouby, jsou využívány kolové matice. Ve druhém případě jsou v náboji kola závitové díry, do kterých jsou zašroubovány kolové šrouby. Šrouby (matice) se vyrábí ve dvou typech a to s kuželovou dosedací plochou a kulovou dosedací plochou. Šrouby či matice mohou být opatřeny plastovou krytkou [10].



Obr. 3.20 Typy kolových šroubů a matic [10]

3.4 Polymerní kompozitní materiály s vláknovou výztuží

Kompozit je materiál složený ze dvou strukturálních fází, jejichž kombinací vzniká synergický efekt, v jehož důsledku má výsledný materiál lepší vlastnosti než jednotlivé fáze odděleně. Sestává z fáze disperzní (plnivo) a fáze spojité (pojivo). Na přechodu mezi jednotlivými fázemi vzniká mezifázové rozhraní. Zajištění adheze na tomto rozhraní patří ke klíčovým hlediskům kvality kompozitu [13].



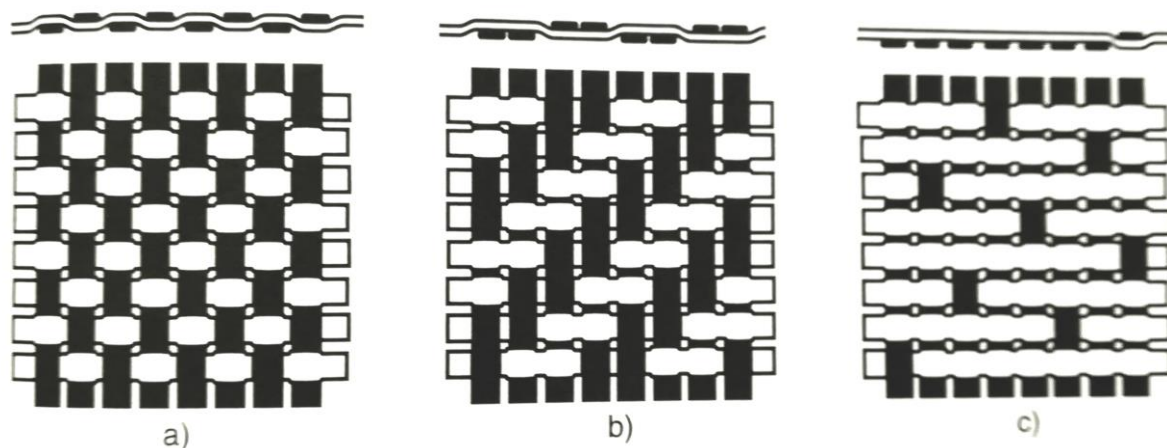
Obr. 3.21 Snímek porovnání velikosti průměru lidského vlasu a uhlíkového vlákna [14]

3.4.1 Plnivo

Plnivo plní v kompozitu funkci výztuhy a významně se podílí na jeho výsledné pevnosti. V případě vláknových kompozitů představují plnivo dlouhá vlákna organického či anorganického původu. Obecně tuto funkci mohou plnit ale i plniva ve formě částic nebo krátkých vláken. Mezi anorganická vlákna patří například uhlíková, skleněná, aramidová, nebo basaltová. Ze skupiny organických vláken se jako plnivo polymerních kompozitních materiálů používají vlákna obsahující celulózu, tedy například: lněná, konopná, nebo jutová. V technické praxi jsou pro jejich vysokou pevnost a tuhost pro mechanicky namáhané díly využívány kompozity jejichž plnivem jsou dlouhá uhlíková vlákna. Průměr samotného uhlíkového vlákna se pohybuje mezi 5 až 10 μm . U kompozitních materiálů vyztužených dlouhými vlákny se projevují z principu uspořádaného směru vláken anizotropní vlastnosti. Z tohoto důvodu se v mnohých aplikacích z jednotlivých vláken skládají pramence sestávající z 20 až 60 konců, z nichž jsou následně tvořeny tkaniny. Tyto tkaniny jsou dále aplikovány v několika vzájemně pootočených vrstvách tvořících tzv. lamináty [15, 16].

Dle vzájemného uspořádání pramenců lze rozdělit tkaniny na několik typů (**Obr. 3.22**). Základním druhem je plátňová vazba, jež se projevuje malým otřepem při řezání. Dalším typem je vazba keprová (anglicky „twill“) jejíž výhody spočívají ve vyšší pevnosti a tuhosti výsledného laminátu díky menšímu zvlnění jednotlivých pramenců ve vazbě. Zároveň je díky své ohebnosti tento typ vazby vhodný pro tvarově složitější výrobky. Atlasové (saténové) vazby jsou dobrou

volbou pro prvky s velice geometricky složitým povrchem. Zároveň díky nízkému vychýlení vláken ze směru lze touto vazbou dosáhnout velmi hladkého povrchu [16].



Obr. 3.22 Příklady typů vazeb vlákenných tkanin a) plátnová vazba b) keprová vazba c) atlasová (saténová) vazba [16]

3.4.2 Pojivo

Pojivo, neboli matrice je složka kompozitního materiálu zajišťující soudržnost plniva. Mezi jeho účely patří zajištění tvarové stálosti výrobku, přenos zatěžovacích sil mezi vlákny a ochrana vláken před vnějšími vlivy okolí. Pro polymerní kompozity se používají dva druhy matrice a to termoplastové a reaktoplastové [16].

Mezi reaktoplastové matrice patří epoxidové pryskyřice využité při výrobě tzv. prepregů (viz kapitola 3.4.3 *Prepregy*).

3.4.3 Prepregy

Prepreg (z anglické zkratky „preimpregnated fibres“) je předimpregnovaný kompozitní polotovar určený ke stavbě kompozitních dílů. Výhoda prepregů spočívá v tom, že jsou již od výroby nasyceny epoxidovou pryskyřicí, kterou zbývá po kompletaci dílu vytvrdit v autoklávu nebo výrobek vylisovat ve vakuu. Odpadá tak náročný proces prosycování uhlíkových tkanin matricí. Běžným postupem při tvorbě dílu z prepregů je vytvoření nástřihového plánu a následné vyřezání jednotlivých tvarů. Tento postup je vhodný při tvorbě dílů geometricky složitých tvarů, jako mohou být např. celokompozitní disky kol automobilů. Kompozitní díly lze tvořit z prepregů ručně či s využitím automatizace kladení. Jednou z nevýhod je však jejich omezená životnost. Pro prodloužení jejich životnosti jsou např. prepregy s reaktivním termosetickým pojivem skladovány při teplotě -20°C . Tím je docíleno prodloužení jejich životnosti až na délku šesti měsíců od výroby [16].

Na **Obr. 3.23** je vyobrazen ruční proces kladení přířezů do formy, jež odpovídá tvaru disku kola. Jelikož je povrch prepregů lehce lepivý, lze je tak na sebe snadno vrstvit a tvarovat dle formy. Jedná se o časově náročný proces. V konečné fázi jsou kola pokryta vakuovací fólií a následně vytvrzena v autoklávu (**Obr. 3.24**).



Obr. 3.23 Proces kladení prepregových přířezů do formy tvořící celokompozitní disk kola automobilu [17]



Obr. 3.24 Dokončené ráfky kol připravené k vytvrzovacímu procesu v autoklávu [18]

4 Konstrukční návrh disku

Po zhodnocení vypracované rešerše a seznámení se konstrukčními zásadami disků kol automobilů byly na základě technických požadavků vhodných pro elektromobilní vozidla vypracovány tři koncepty. Mezi základní požadavky bylo zařazeno snížení hmotnosti, které má za následek následně i snížení momentu setrvačnosti, v konečném důsledku tak snížení energie nutné k uvedení vozidla do pohybu. Vycházeno je tak z následujících vztahů:

$$\vec{F} = m\vec{a} \quad (4.1)$$

$$I = \int_{(m)} r^2 dm \quad (4.2)$$

$$M = I \cdot \varepsilon \quad (4.3)$$

F [N]Síla

m [kg]Hmotnost

a [m.s⁻²].....Zrychlení

I [m².kg]Moment setrvačnosti

M [N.m].....Moment síly

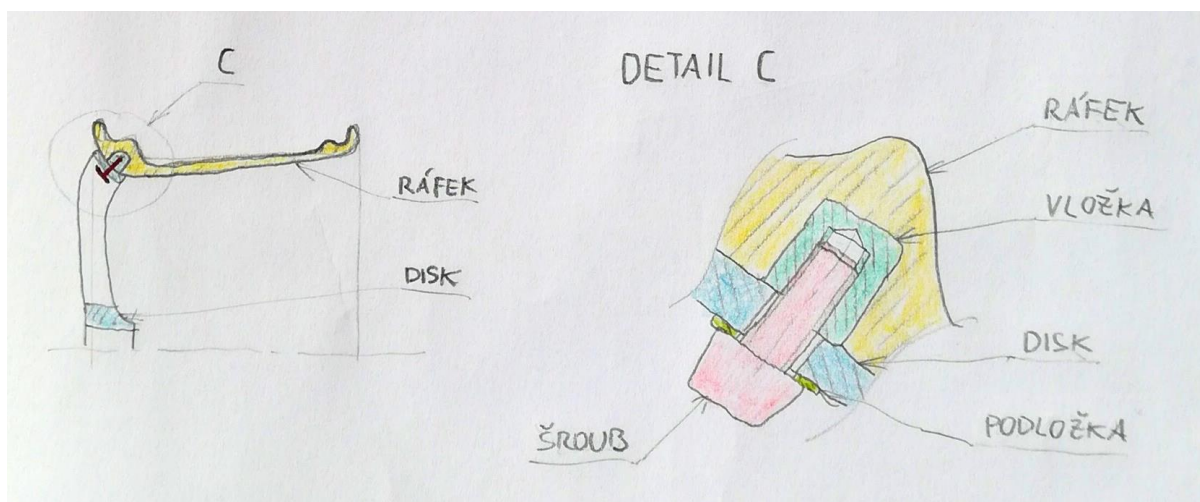
ε [rad.s⁻²]Úhlové zrychlení

4.1 Návrh konceptů

Na základě provedené rešerše bylo rozhodnuto pro variantu dvoudílného kola sestávajícího z disku z hliníkové slitiny a kompozitního ráfku. Tento způsob konstrukčního provedení kombinuje výhodné mechanické vlastnosti kompozitního materiálu s designovou variabilitou konvenční hliníkové slitiny. Jde o kompromis mezi kolem z hliníkové slitiny a kolem celokompozitním. Hliníková slitina má vyšší hmotnost, ale je levnější a zároveň je výroba kol z tohoto materiálu snadno automatizovatelná. Výroba kompozitních kol je již náročnější jak z hlediska automatizace, tak z hlediska ekonomického. Zato tento materiál disponuje velmi dobrými vlastnostmi kombinující vysokou pevnost při zachování nízké hmotnosti. Z **rovnice 4.2** lze pozorovat, že moment setrvačnosti se zvyšuje se vzdáleností od osy rotace s druhou mocninou. Volba kompozitního ráfku je tedy obzvlášť výhodná, jelikož je hmota ráfku s porovnáním s diskem rozložena nejdál od ose rotace. Následující tři koncepty představují rozdílné provedení spoje těchto dvou komponentů pozorované na v současnosti vyráběných discích.

4.1.1 Koncept č. 1

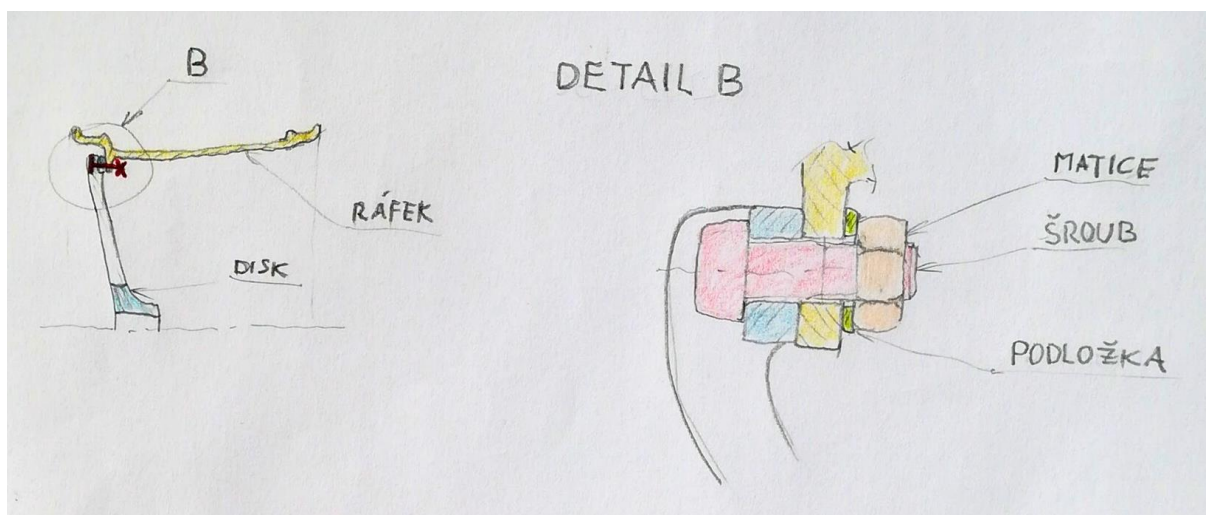
První z možností, jak lze spoj provést je integrovat přímo do kompozitního ráfku vložku se závitem. Spojení tak lze zaručit několika šroubovými spoji (**Obr. 4.1**).



Obr. 4.1 Skica provedení konceptu č. 1

4.1.2 Koncept č. 2

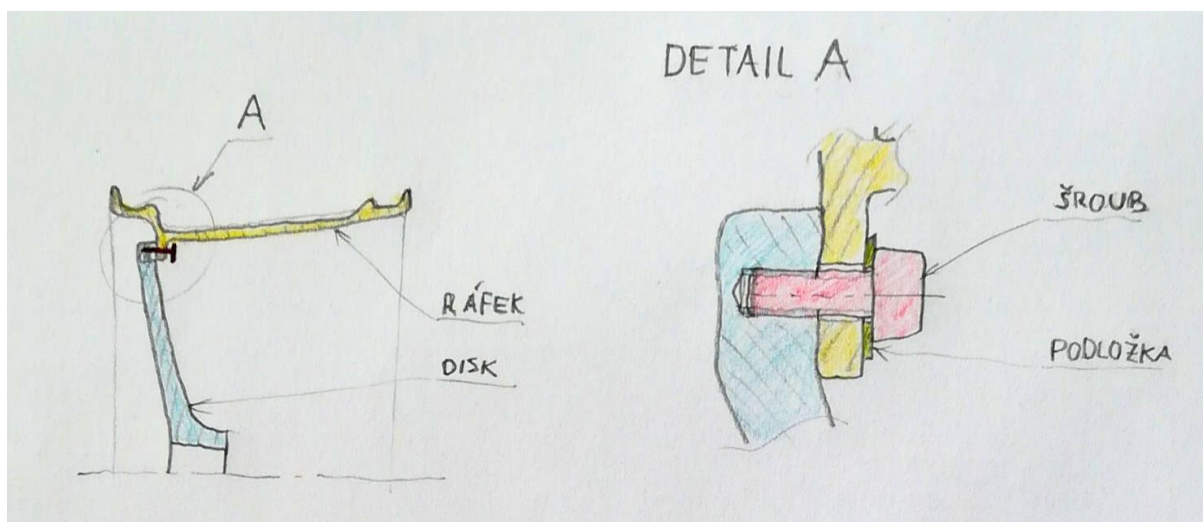
Součástí ráfku druhého konceptu je obvodová obruč ležící pod jedním z tzv. humpů. Obsahuje vyvrtané díry, jenž tak umožňují vytvoření šroubových spojů mezi diskem a ráfkem kola prostřednictvím šroubu a matice s podložkou (**Obr. 4.2**).



Obr. 4.2 Skica provedení konceptu č. 2

4.1.3 Koncept č. 3

Koncept č.3 představuje stejné řešení ráfku jako koncept předchozí. Liší se však v provedení disku, ve kterém jsou vyvrtány díry se závity. Oproti konceptu č. 2 zde tak nejsou využity matice. Zároveň hlavy šroubů směřují na opačnou stranu a jsou tak z vnějšího pohledu skryty. (**Obr. 4.3**).



Obr. 4.3 Skica provedení konceptu č. 3

4.2 Zhodnocení a výběr konceptu

Pro vyhodnocení nejvhodnějšího konstrukčního provedení disku byla na základě několika kritérií sestavena rozhodovací tabulka.

	Koncept č. 1	Koncept č. 2	Koncept č. 3
Jednoduchost konstrukce	•	••	•••
Nízké výrobní náklady	•	••	•••
Nízká hmotnost	•••	•••	•••
Nenáročnost montáže	•••	••	•••
Součet	8	9	12

Tab. 4.1 Rozhodovací tabulka

Jelikož se koncepty mezi sebou liší prakticky jen v provedení šroubového spoje jsou rozdíly mezi jednotlivými variantami nepatrné. Nejvyšší počet bodů i přes to získal koncept č. 3. Proto byl zvolen jako vítězný a v následujících kapitolách je podroben detailnímu zpracování a analýze.

4.3 Rozpracování vybraného konceptu

Pro výrobu ráfku byly zvoleny uhlíkové prepregy, jenž jsou vrstveny na sebe v různých orientacích tak, aby bylo dosaženo nejlepších mechanických vlastností. Pro disk byla zvolena hliníková slitina EN-AW 6061 T6, která nabízí vysokou pevnost, díky čemuž je možné navrhovat disky subtilnějších konstrukcí, což v konečném důsledku snižuje hmotnost kola. Samotný disk sestává z pěti paprsků ve tvaru písmene Y přecházejících po obvodu do obruče obsahující z její zadní strany závitové díry. Ke spojení disku a ráfku bylo zvoleno použití titanových šroubů z důvodu zachování nízké hmotnosti a zároveň vysoké pevnosti. Šroubů typu M6 se po obvodu nachází celkem 45. Výsledná hmotnost sestavy byla s využitím CAD softwaru vypočtena na

7,35 kg, což je na disk o rozměru 20“ velice dobrá hodnota. Pro porovnání, váha jednodílných kol ze stejného typu hliníkové slitiny se pohybuje okolo hodnoty 12 kg.



Obr. 4.4 Render přední strany 3D modelu vybraného disku kola



Obr. 4.5 Render zadní strany 3D modelu vybraného disku kola

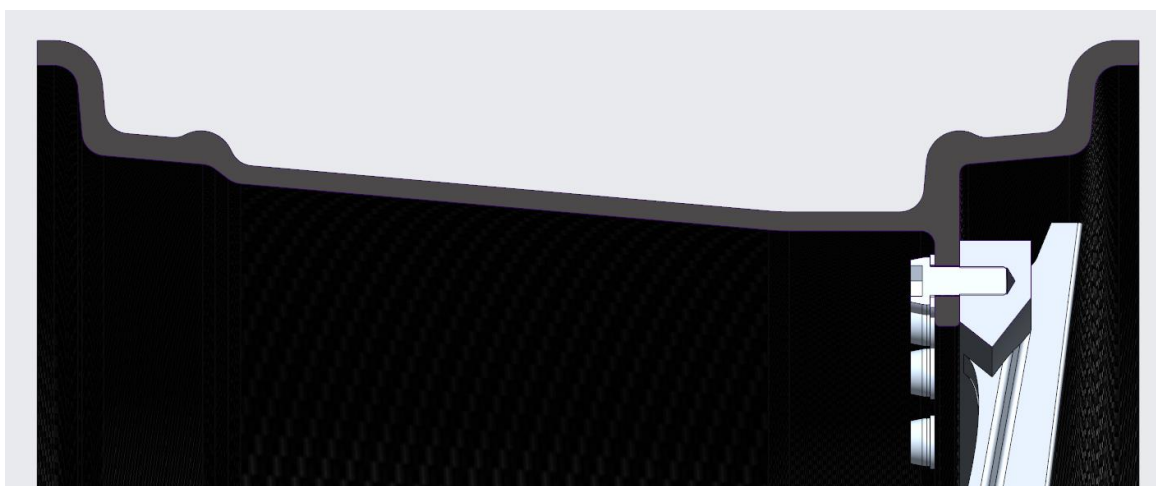
Následující tabulka zobrazuje hodnoty jednotlivých základních konstrukčních rozměrů disku. Při volbě rozměrů byl brán v úvahu konkrétní model vozidla a to Tesla Model Y dle webové stránky s rozměry [19].

Průměr disku	20“
Šířka disku	8“
Zális	41,6mm
Počet děr	5
Průměr roztečné kružnice děr (PCD)	114,3mm
Středový otvor (CB)	64,1mm

Tab. 4.2 Konstrukční rozměry disku kola

Při návrhu ráfku bylo vycházeno z konstrukčních zásad ráfků. Výslednému profilu byla aplikována tloušťka odpovídající výsledné tloušťce navrstvených prepregů. Profil ráfku zahrnuje hrbolek proti sesmeknutí pneumatiky tzv. hump a prolis sloužící k usnadnění obutí pneumatiky.

Okraj ráfku odpovídá rozměrům typu JJ dle [20]. Pod jedním z humpů se nachází obruč s dírami pro šrouby sloužící k uchycení disku kola.



Obr. 4.6 Zobrazení šroubového spoje disku s ráfkem v řezu sestavou

4.3.1 Příprava numerické simulace pro silové zatížení disku

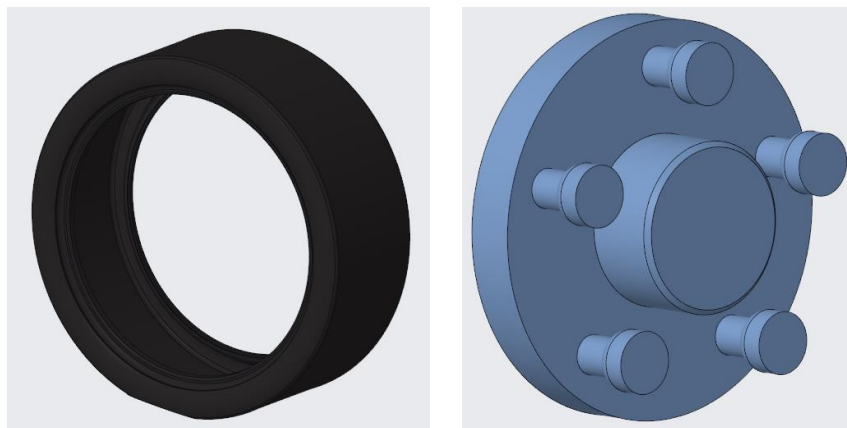
Navržený model disku je dále podroben silové analýze, která prověří jeho chování v provozu. Prostřednictvím napěťové analýzy je zjištěno rozložení napětí v disku. Dalším analytickým prostředkem je deformační analýza podávající informace o posuvu jednotlivých uzlů simulačního modelu. Patříčné je i určení součinitele bezpečnosti v závislosti na mezi kluzu materiálu. Simulace je rozdělena do dvou modelových situací předpokládající dva způsoby namáhání.

První modelovou situací je případ stojícího vozidla. Jedná se o základní způsob zatížení. V této situaci, které simuluje vozidlo v klidu, je uvažována pouze normálová síla působící kolmo na osu rotace kola. Jedná se o reakci od vozovky, která je dána jako $\frac{1}{4}$ tíhy vozidla tak, aby byla jeho váha rovnoměrně rozložena na všechna čtyři kola. Pro vozidlo Tesla Model Y, jenž má hmotnost 2000kg bude tedy normálová síla rovna 5000N. Toto zjednodušení odpovídá případu, kdy se těžiště vozidla nachází na průsečíku úhlopříček náležící obdélníku tvořeného styčnými body kola s vozovkou.

Kolo je pochopitelně při jízdě zatěžováno složitějšími silovými účinky, na které je nutné jej dimenzovat. V tomto případě je normálová síla rozšířena o další dva silové účinky, a to v podélném a axiálním směru. Axiální síla působící ve směru rovnoběžném s osou rotace kola vzniká například při průjezdu zatáčkou vlivem působení normálového zrychlení. Síla podélná může vznikat vlivem zrychlení, či zpomalení vozidla. V neposlední řadě lze zmínit také silové účinky vznikající vlivem rázů například přejezdem nerovností, či výmolů. Jak je patrné, problematika silových účinků působících na kolo automobilu vznikající při jízdě je poměrně komplexní. Touto oblastí se zabývá obor dynamika vozidel. Pro případ této práce je tak pro volbu zatěžovacích účinku při jízdě použit výstup kapitoly věnující se analýze silových účinků působících na disk kola diplomové práce [21].

i. Doplnující komponenty simulačního modelu

Před importováním CAD modelu do simulačního softwaru je nejprve nutné zamyslet se nad způsobem aplikace jednotlivých silových účinků a vazeb a přiblížení tak simulačního modelu co nejlépe realitě. Fixování disku kola v prostoru je zajištěno zjednodušeným modelem náboje kola s kolovými šrouby. Pro věrnější přenos sil na ráfek je vytvořen model pneumatiky, která simuluje dotyk s vozovkou rovinnou plochou v místě kontaktu (**Obr. 4.7**).



Obr. 4.7 Model pneumatiky a náboje kola

ii. Přiřazení materiálů

Dalším krokem je přiřazení materiálů jednotlivým komponentům sestavy. Náboj kola slouží primárně ke stanovení okrajových podmínek a není předmětem zkoumání deformačně-napětové analýzy. Této součásti byl tak přiřazen materiál z knihovny Ansys pod názvem „Structural Steel“ neboli konstrukční ocel. Tento materiál zároveň dostatečně odpovídá materiálu skutečného náboje kola.

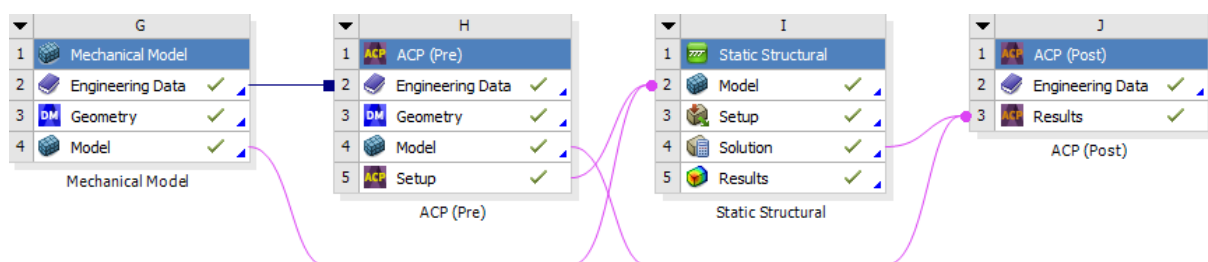
Pneumatika je v běžných simulacích velice komplexním prvkem. Převládajícím materiálem je pryž, která se řadí mezi hyperelastické materiály, jejichž deformace vykazuje nelineární chování a významně tak prodlužuje výpočetní čas simulace. Kromě toho pneumatika obsahuje několik prvků spojených s pryží, které upravují její tuhost, a to hned v několika místech. Jedná se o ocelový drát v oblasti patky a nárazníky tvořené vlákny. Pneumatika v této simulaci však představuje primárně objekt sloužící k přenesení vnějších sil na ráfek a následně disk kola. Modelu pneumatiky je tak v simulačním modelu přidělen stejný typ materiálu z materiálové knihovny Ansys jako modelu náboje kola s následně upravenými vlastnostmi. Hodnota modulu pružnosti byla snížena na $7,1 \cdot 10^4$ MPa. Poissonova konstanta byla nastavena na hodnotu 0,48 vycházející z hodnoty pro pryž samotnou, tedy 0,5.

Pro zkoumaný model disku kola byl zvolen materiál s označením EN AW-6061 T6. Jedná se o slitinu hliníku s vysokou pevností a dobrou obrobitelností. Díky těmto vlastnostem je slitina vhodná pro účel výroby disku kola. Modelu disku byl přiřazen materiál z materiálové knihovny Ansys pod názvem „Alluminium Alloy“ s následně upravenými vlastnostmi (**Tab. 4.3**).

ρ – Měrná hmotnost	2700 kg.m ⁻³
E – Modul Pružnosti	6,89.10 ⁴ MPa
μ – Poissonova konstanta	0,33
σ_e – Mez kluzu v tahu	276 MPa
σ_m – Mez pevnosti v tahu	310 MPa

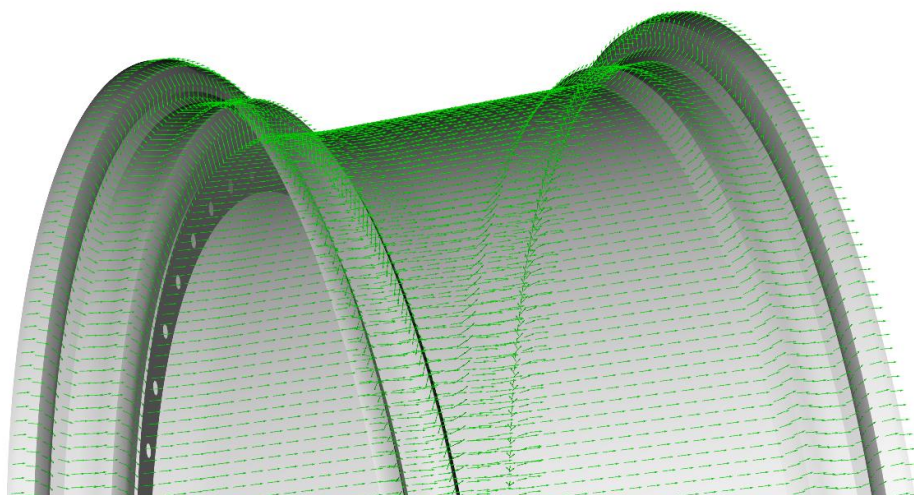
Tab. 4.3 Vlastnosti hliníkové slitiny EN AW-6061 T6

Zbývajícím komponentem, jenž je spolu s diskem nejdůležitějším předmětem analýzy je ráfek. Pro co nejvěrnější simulaci tohoto kompozitního komponentu byl využit modul ACP (Ansys Mechanical Composite PrePost), který je určen právě pro tvorbu simulačních modelů součástí z kompozitních a vrstvených materiálů. Kompletní schéma simulace celé sestavy je zobrazeno na **Obr. 4.8**.



Obr. 4.8 Výsledné schéma simulace s využitím různých modulů v softwaru Ansys

Postup tvorby simulačního modelu ráfku je v porovnání s ostatními komponenty sestavy odlišný. Nelze přiřadit součásti materiál přímo, tak jak tomu bylo u předchozích komponentů, jelikož se v tomto případě jedná o kompozitní materiál. Pro přesnou simulaci je vhodné přesně stanovit počet a směry vláken jednotlivých vrstev. Tento postup navíc lze aplikovat pouze na plošnou geometrii. Z tohoto důvodu byl simulační model kompozitního ráfku vytvořen na základě geometrie povrchu, jež přichází do styku s pneumatikou a tloušťka daná skladbou kompozitního materiálu byla následně generována softwarem do vnitřního normálového směru ráfku (**Obr. 4.9**).



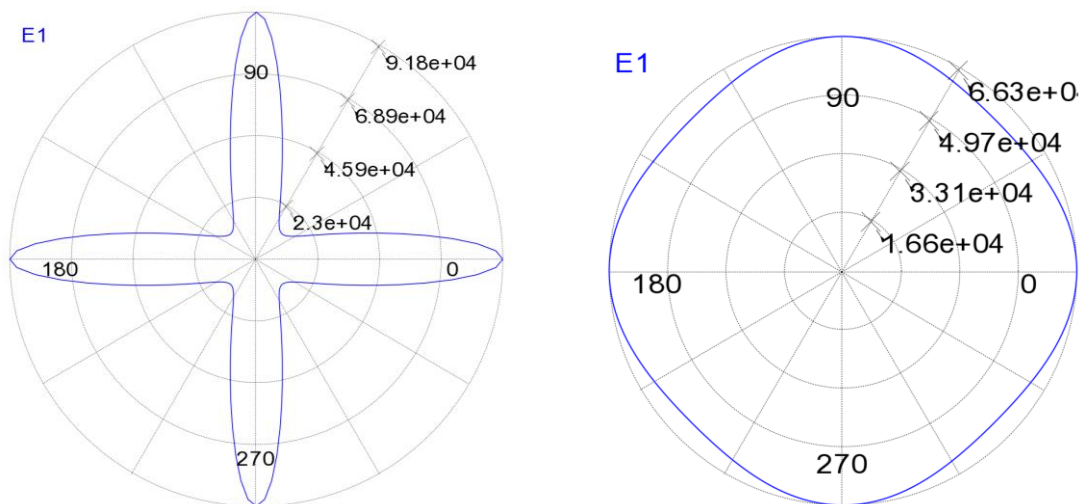
Obr. 4.9 Ráfek s vizualizovaným hlavním směrem vláken vybrané vrstvy prepregu

Materiálem prepregu byl zvolen předdefinovaný materiálový model z knihovny softwaru Ansys „Epoxy Carbon Woven (395 GPa) Prepreg“. Výsledná tloušťka stěny ráfku byla stanovena na 5,2mm při tloušťce jedné vrstvy prepregu 0,4mm. To odpovídá vrstvení celkem 13 vrstev prepregu. Pro dosažení kvazi-izotropického stavu materiálu byl hlavní směr jednotlivých vrstev prepregu modifikován (**Obr. 4.10**).

Fabric	Angle
Prepreg	0.0
Prepreg	45.0
Prepreg	90.0
Prepreg	-45.0
Prepreg	0.0
Prepreg	45.0
Prepreg	90.0
Prepreg	-45.0
Prepreg	0.0
Prepreg	45.0
Prepreg	90.0
Prepreg	-45.0
Prepreg	0.0

Stackup Properties	
Thickness:	5.2
Price/Area:	0.0
Weight/Area:	7.696000000000003e-09

Obr. 4.10 Tabulka s orientacemi jednotlivých vrstev prepregů

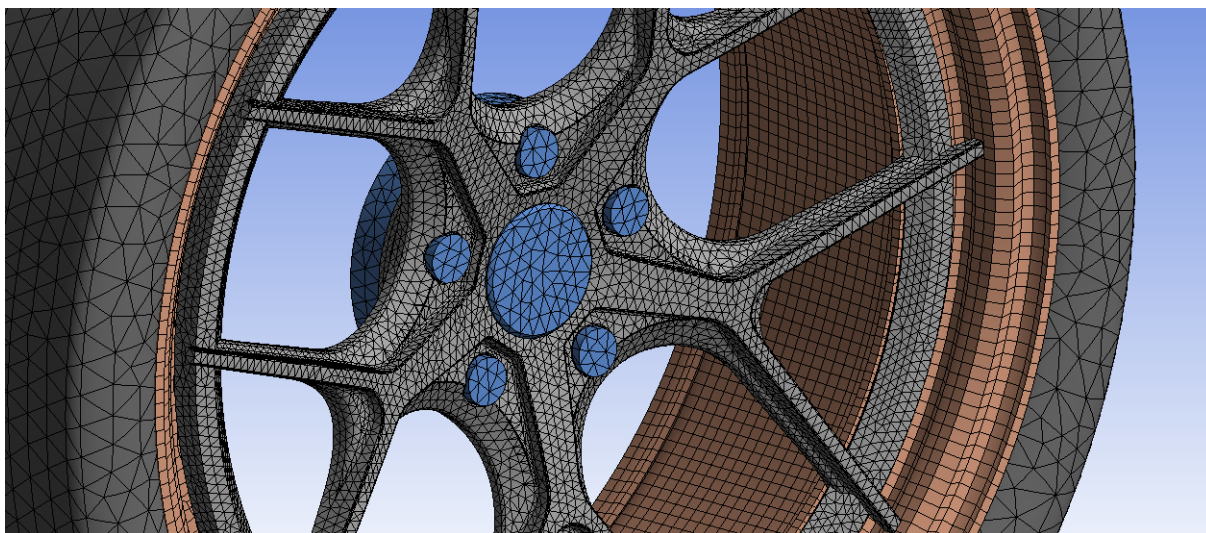


Obr. 4.11 Hodnoty modulu pružnosti v závislosti na zkoumaném směru jednotlivé vrstvy prepregu (vlevo) a vrstveného laminátu (vpravo)

Grafy na **Obr. 4.11** zobrazují závislost modulu pružnosti na zkoumaném směru. V případě izotropního materiálu by ke změně hodnoty modulu pružnosti nedocházelo a grafem by tak byla kružnice. Cílem vrstvení prepregů v různých orientacích je přiblížit se tomuto stavu.

iii. Tvorba sítě

Po volbě materiálů všech komponentů a definování složení kompozitního ráfku byla vygenerována síť prvků, neboli mesh. Tvar prvků ráfku byl s ohledem na rotační tvar geometrie zvolen na tzv. „quad“. Zbytek komponentů sestavy byl ponechán defaultnímu nastavení typu tvaru prvku, tudíž tzv. „tet“. Velikosti jednotlivých prvků byly modifikovány zvlášť pro každou součást tak, aby odpovídala složitosti tvaru daného komponentu, výpočetním nárokům a její důležitosti v rámci zkoumaného vlivu silových účinků.



Obr. 4.12 Detail vygenerované sítě mesh

iv. Kontaktní vazby

Jelikož simulační model tvoří sestava několika dílů je potřeba stanovit vazby mezi nimi tak, aby docházelo k vzájemnému přenosu silových účinků. Prakticky všechny kontaktní vazby jsou nastaveny jako tzv. „bonded“, což definuje nepohyblivý spoj a jsou pro tuto simulaci dostačující. Tento typ spoje je aplikován i na styčné plochy dvou různých ploch ráfku, a to ráfku samotného a obruče s dírami pro šrouby. Tímto způsobem je definován dokonalý přechod vrstev laminátu mezi dvěma úseky. Šrouby spojující disk s ráfkem jsou z výpočtového modelu vyjmuty. Spoj disku s ráfkem prostřednictvím šroubů je uvažován jako dokonalý, tudíž „bonded“. Je tedy uvažováno, že šroubové spoje zaručují mezi diskem a ráfkem nepohyblivý spoj.

v. Okrajové podmínky

Poslední částí procesu tvorby simulačního modelu tzv. pre-processingu je stanovení okrajových podmínek. Jedná se o stanovení vnějších silových účinků a vazeb těles v prostoru. Vazba typu „Fixed support“ simulující vetknutí je aplikována na zadní čelo náboje kola. Tím stanovuje ukotvení sestavy v prostoru. Silové reakce v této ploše řezu tak teoreticky představují vnitřní statické účinky ve skutečnosti pokračujícího hřídele nápravy kola. Vnější silové vlivy, tak jak byly představeny v kapitole 4.3.1 *Příprava numerické simulace pro silové zatížení disku*, jsou aplikovány na rovinnou plochu pneumatiky představující styk s vozovkou. Jedná se o sílu normálovou, podélnou a axiální. Ansys obsahuje i funkci zatížit model vlivem odstředivých sil způsobených rotačním pohybem. Toho je pro tento případ využito a sestavě je aplikována úhlová rychlost v ose rotace kola v hodnotě $120 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$ odpovídající rychlosti vozidla $138,24 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ dle výpočtu 4.4, kde v označuje rychlost vozidla a d vnější průměr pneumatiky.

$$\omega = \frac{2 \cdot v}{d} = \frac{2 \cdot 38,4}{0,64} = 120 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1} \quad (4.4)$$

4.3.2 Výsledky numerické simulace silového zatížení disku

První simulací, kterou je sestava ověřena je situace stojícího vozidla. Popis působení silových účinků na sestavu je popsán v kapitole 4.3.1 *Příprava numerické simulace pro silové zatížení disku*. Aplikované okrajové podmínky jsou zobrazeny na **Obr. 4.13**.

I: Static Structural

Static Structural
Time: 1, s
06.05.2024 2:43

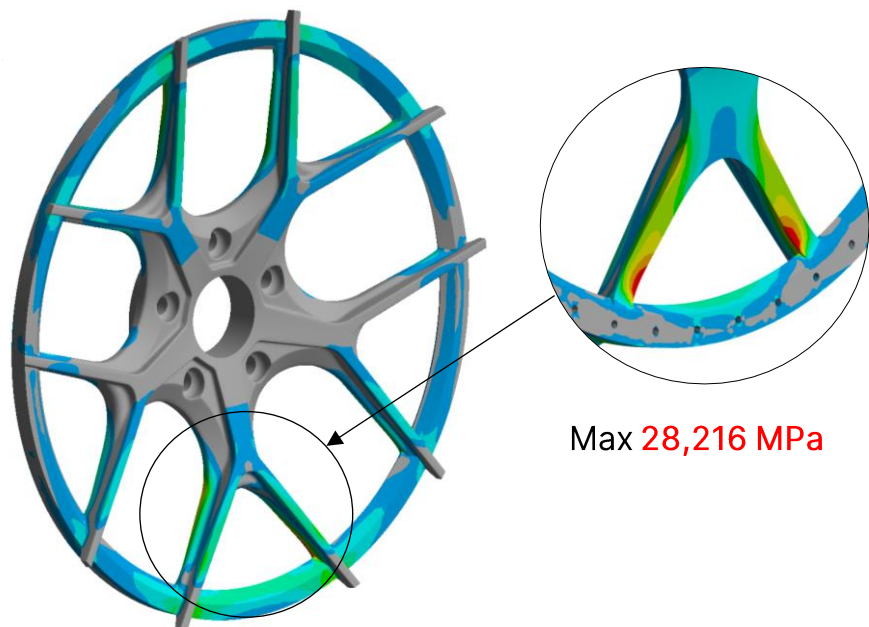
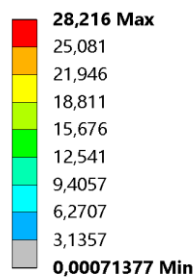
- A** NORMÁLOVÁ SÍLA: 5000, N
- B** Fixed Support



Obr. 4.13 Simulační model s okrajovými podmínkami situace stojícího vozidla

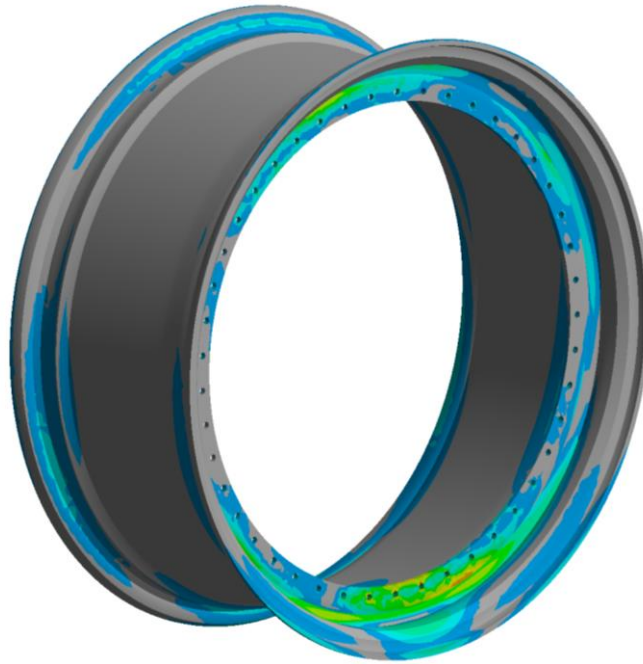
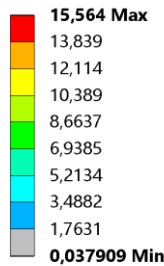
I: Static Structural

Equivalent Stress 2
Type: Equivalent (von-Mises) Stress
Unit: MPa
Time: 1
11.05.2024 19:33



Obr. 4.14 Napěťová analýza disku stojícího vozidla

I: Static Structural
Equivalent Stress 3
Type: Equivalent (von-Mises) Stress
Unit: MPa
Time: 1
11.05.2024 19:49



Obr. 4.15 Napěťová analýza ráfku stojícího vozidla

Z výsledků první simulace (**Obr. 4.14**, **Obr. 4.15**) je patrné, že maximální ekvivalentní napětí vzniká na disku, a to v hodnotě 28,216 MPa. Oblast výskytu maximálního napětí se nachází ve dvou paprscích disku poblíž obruče (**Obr. 4.14**). Ekvivalentní napětí je tedy několikanásobně menší než mez kluzu materiálu disku a je tak splněna podmínka: $\sigma_{EQ} < \sigma_e$. Na ráfku se nachází v porovnání s diskem napětí menší o hodnotě 15,564 MPa. Jelikož oba komponenty vyhovují danému zatížení, je přistoupeno ke druhé variantě simulace silového namáhání.

Druhou simulací, kterou je sestava ověřena, je situace jízdy po nerovné vozovce. Jedná se již o plné provozní zatížení kola. Na **Obr. 4.16** jsou zobrazeny aplikované okrajové podmínky na základě kapitoly 4.3.1 *Příprava numerické simulace pro silové zatížení disku*. V této variantě zatížení jsou již uvažovány tři působící silové účinky o různých hodnotách, a to síla normálová, axiální a podélná. Tyto síly simulují silové působení na kolo při průjezdu vozovky s nerovným terénem. Jejich hodnoty vycházejí z výstupu kapitoly věnující se analýze silových účinků působících na disk kola diplomové práce [21]. Normálová síla je nastavena na hodnotu 6810N, axiální síla na 1459N a podélná síla má hodnotu 1367N (**Obr. 4.16**).

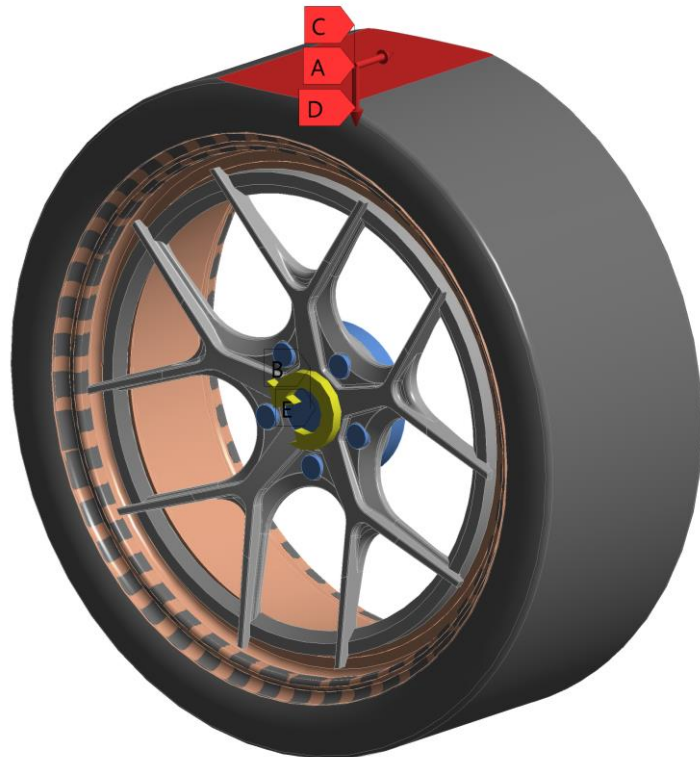
I: Static Structural

Static Structural

Time: 1, s

06.05.2024 1:47

- A** PODÉLNÁ SÍLA: 1367, N
- B** Úhlová rychlost: 120, rad/s
- C** AXIÁLNÍ SÍLA: 1459, N
- D** NORMÁLOVÁ SÍLA: 6810, N
- E** Fixed Support



Obr. 4.16 Simulační model s okrajovými podmínkami

I: Static Structural

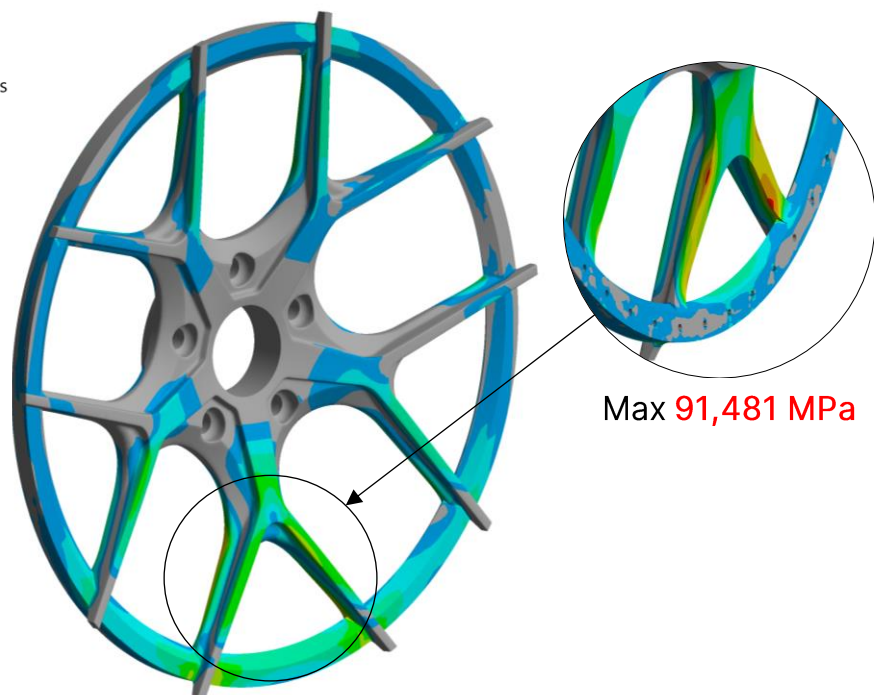
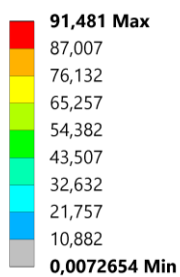
DISK - STRESS

Type: Equivalent (von-Mises) Stress

Unit: MPa

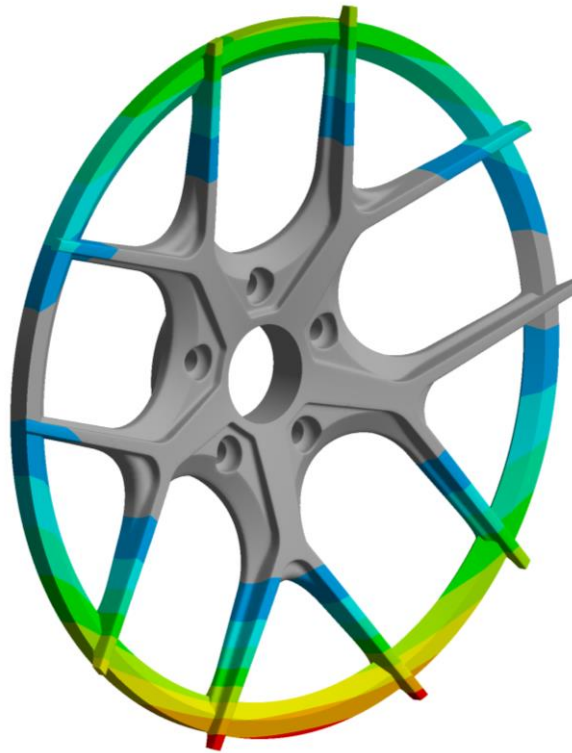
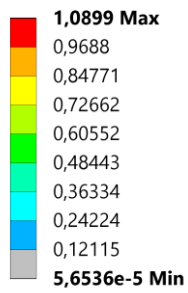
Time: 1

06.05.2024 1:43



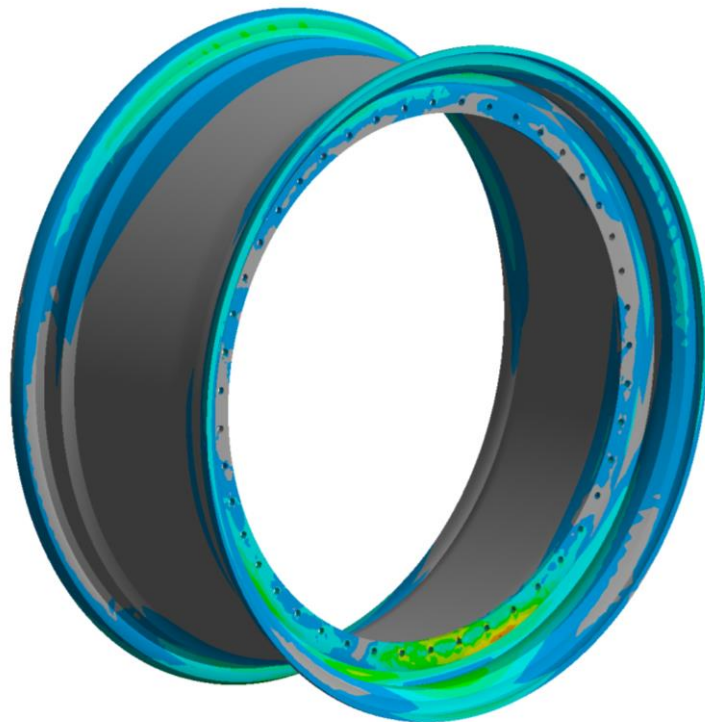
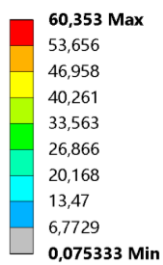
Obr. 4.17 Napěťová analýza disku

I: Static Structural
DISK - DEFORMATION
Type: Total Deformation
Unit: mm
Time: 1
06.05.2024 1:30



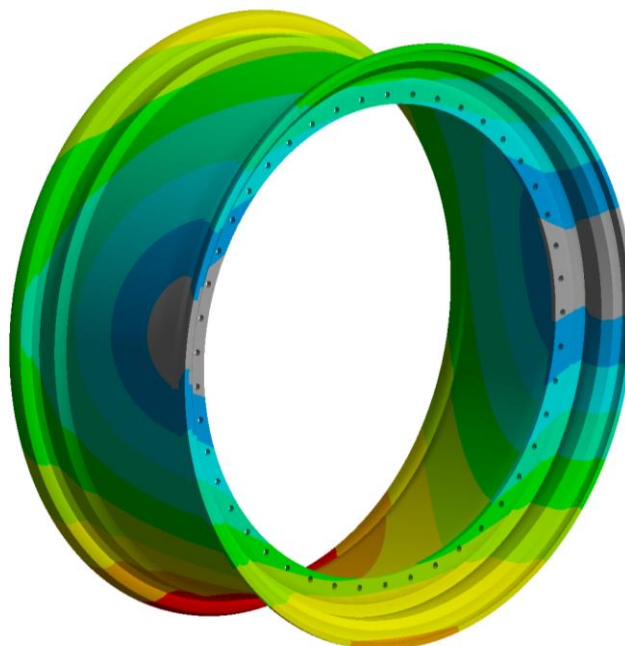
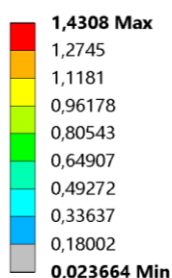
Obr. 4.18 Deformační analýza disku

I: Static Structural
RIM - STRESS
Type: Equivalent (von-Mises) Stress
Unit: MPa
Time: 1
06.05.2024 1:27



Obr. 4.19 Napěťová analýza ráfku

I: Static Structural
RIM - DEFORMATION
Type: Total Deformation
Unit: mm
Time: 1
06.05.2024 1:06



Obr. 4.20 Deformační analýza ráfku

Po kontrole výsledků analýzy silového zatížení dle situace jízdy po nerovné vozovce bylo zjištěno maximální napětí vyskytující se na hranách dvou paprsků dosahující hodnoty 91,481 MPa (**Obr. 4.17**). Z deformační analýzy je patrná maximální celková deformace o hodnotě 1,0899 mm, která se projevuje na samotném okraji disku (**Obr. 4.18**). Druhým zkoumaným komponentem je samotný kompozitní ráfek kola. Při jeho kontrole byla provedena taktéž napěťová a deformační analýza (**Obr. 4.19**, **Obr. 4.20**). Maximální ekvivalentní napětí bylo zjištěno v oblasti límce sloužícího k upevnění disku v hodnotě 60,353 MPa. Tuto část tak lze označit za kritickou. Je však nutné brát v úvahu simulační zjednodušení napojení tohoto límce na zbytek ráfku, které může mít patrný vliv na výsledek. Napětí se na rozhraní límce a ráfku skokově mění, což může být v tomto případě dáno neprovázaností jednotlivých vrstev prepregů v simulačním modelu. Deformační analýza ráfku odhalila největší celkovou deformaci v hodnotě 1,4308 mm vyskytující se na jedné z patek ráfku (**Obr. 4.20**).

4.3.3 Kontrola bezpečnosti navrženého disku

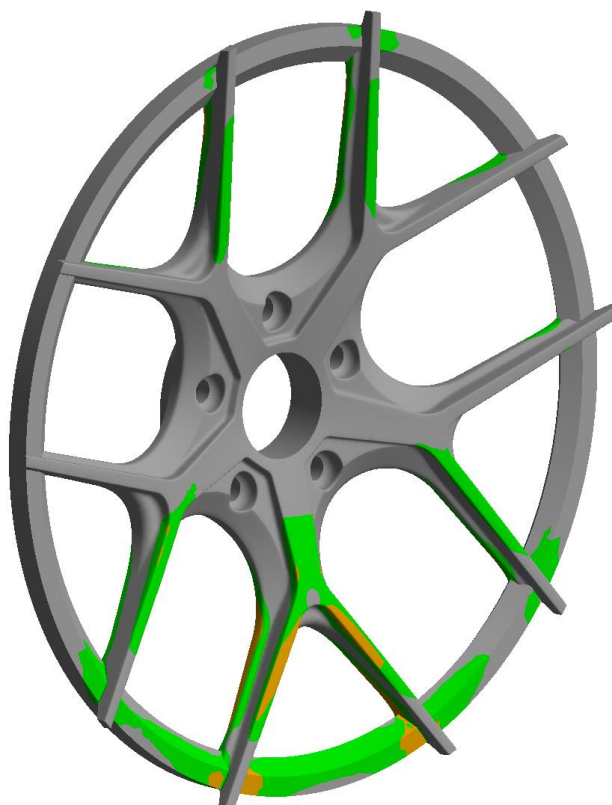
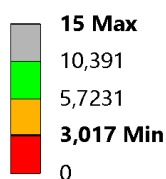
i. Bezpečnost při statickém napětí

Bezpečnostní analýza zjišťuje rozložení hodnoty součinitele bezpečnosti v součásti. Bezpečnost je dána vztahem 4.5, kde σ_e představuje mez kluzu zvoleného materiálu a σ_{EQ} ekvivalentní napětí v daném místě součásti. Minimální bezpečnost lze ověřit dosazením maximálního ekvivalentního napětí (viz **Obr. 4.17**) a hodnoty meze kluzu materiálu disku, v tomto případě slitiny EN AW-6061 T6 (**vztah 4.6**).

$$k = \frac{\sigma_e}{\sigma_{EQ}} \quad (4.5)$$

$$k = \frac{276}{91,481} = 3,017 \quad (4.6)$$

I: Static Structural
RIM-SAFETY
Type: Safety Factor
Time: 1
05.05.2024 23:06



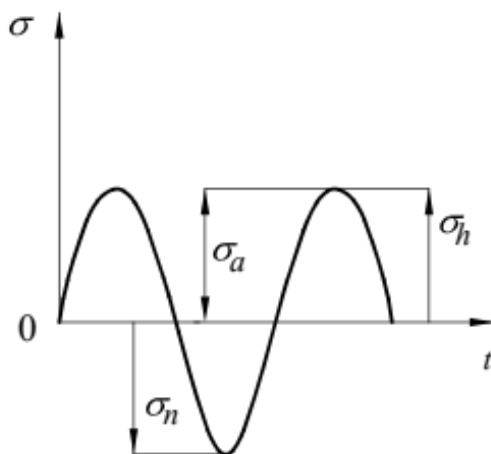
Obr. 4.21 Analýza bezpečnosti disku při statickém zatížení

Výpočet minimální hodnoty bezpečnosti při statickém zatížení je shodný s kontrolou bezpečnosti v softwaru Ansys. Výsledná hodnota je tedy 3,017.

ii. Bezpečnost při dynamickém napětí

Disk kola je ve skutečnosti zatěžován daleko složitěji než jen statickým napětím. Pro zpřesnění výsledků bezpečnosti je provedena kontrola při dynamické změně napětí pomocí analytických výpočtů. V následujícím modelovém příkladě je s pomocí zdroje [22] vypočítána bezpečnost vůči amplitudovému napětí na základě znalosti maximální hodnoty deformace získané prostřednictvím MKP v kapitole 4.3.2 *Výsledky numerické simulace disku*.

Je uvažováno střídavé souměrné napětí (**Obr. 4.22**), jenž je dáno předpisem: $\sigma(t) = \sigma_a \cdot \sin(\omega t)$, tedy platí: $\sigma_a = \sigma_n = \sigma_h$.



Obr. 4.22 Graf závislosti mechanického napětí na čase představující dynamické namáhání [23]

Nejprve je na základě známého součinitele vrubové citlivosti $q[-]$ a tvarového součinitele $\alpha[-]$ dle [22] pomocí vztahu 4.7 vypočten součinitel vrubu $\beta[-]$.

$$\beta = 1 + q \cdot (\alpha - 1) = 1 + 0,5 \cdot (1,1 - 1) = 1,05 \quad (4.7)$$

Následně je určena mez únavy skutečné součásti při amplitudovém napětí σ_a^* [MPa], při zvolené hodnotě meze únavy slitiny hliníku.

$$\sigma_a^* = \sigma_c \cdot \frac{k_{sf} \cdot k_m}{\beta} = 200 \cdot \frac{0,8 \cdot 0,95}{1,05} = 144,76 \text{ MPa} \quad (4.8)$$

Nakonec je vypočten součinitel bezpečnosti vůči amplitudovému napětí $k_a[-]$, který je dán poměrem meze únavy skutečné součásti při amplitudovém napětí σ_a^* [MPa] a hodnoty amplitudového napětí σ_a [MPa], jenž je rovno maximální hodnotě zjištěného ekvivalentního napětí pomocí MKP (**Obr. 4.17**).

$$k_a = \frac{\sigma_a^*}{\sigma_a} = \frac{144,76}{91,48} = 1,58 \quad (4.9)$$

Výsledná hodnota součinitele bezpečnosti vůči amplitudovému napětí k_a je 1,58. Jelikož je tato hodnota vyšší než 1 lze návrh disku kola považovat za pevnostně vyhovující.

- β [-]součinitel vrubu
- q [-].....součinitel vrubové citlivosti
- α [-]tvarový součinitel
- σ_c [MPa].....Mez únavy
- σ_c^* [MPa].....Mez únavy skutečné součásti
- k_{sf} [-]součinitel jakosti povrchu
- k_m [-].....součinitel velikosti součásti
- σ_a [MPa]hodnota amplitudového napětí
- σ_a^* [MPa]mez únavy skutečné součásti při amplitudovém napětí
- k_a [-].....součinitel bezpečnosti vůči amplitudovému napětí

4.4 Ekonomické zhodnocení

Cílem ekonomického zhodnocení je odhadnout výrobní cenu disku kola na základě volby polotovarů a nákupu normalizovaných dílů.

Disk

Polotovarem pro výrobu disku kola z hliníkové slitiny EN AW-6061 T6 je na základě konstruované velikosti disku zvolena kruhová tyč $\varnothing 241,3-100$, přičemž rozměr je pouze orientační a závisí na následném technologickém postupu. Cena tohoto polotovaru je na základě zdroje [24] zvolena na 3 600 Kč. Do zhodnocení lze pro upřesnění uvést taktéž náklady nutné ke zpracování materiálu jako např. tváření za tepla, obrábění a lakování. Pro tyto operace byla zvolena částka 1 500Kč. Výsledná cena výroby disku tedy vychází na 5 100Kč.

Ráfek

Polotovarem pro výrobu ráfku jsou uhlíkové prepregy. Na základě rozměrů ráfku a počtu vrstev byl odhadnut rozměr tkaniny využitý na tvorbu jednoho ráfku. Jde celkem o $6,2m^2$ prepregu keprové vazby o tloušťce 0,4mm. Dle zdroje [25] tak byla určena nákupní cena na 15 000 Kč. Pokud jsou zahrnuty i náklady na zpracování včetně skládání prepregů a konečného vytvrzení v částce 3 000 Kč, vychází konečná cena na 18 000 Kč.

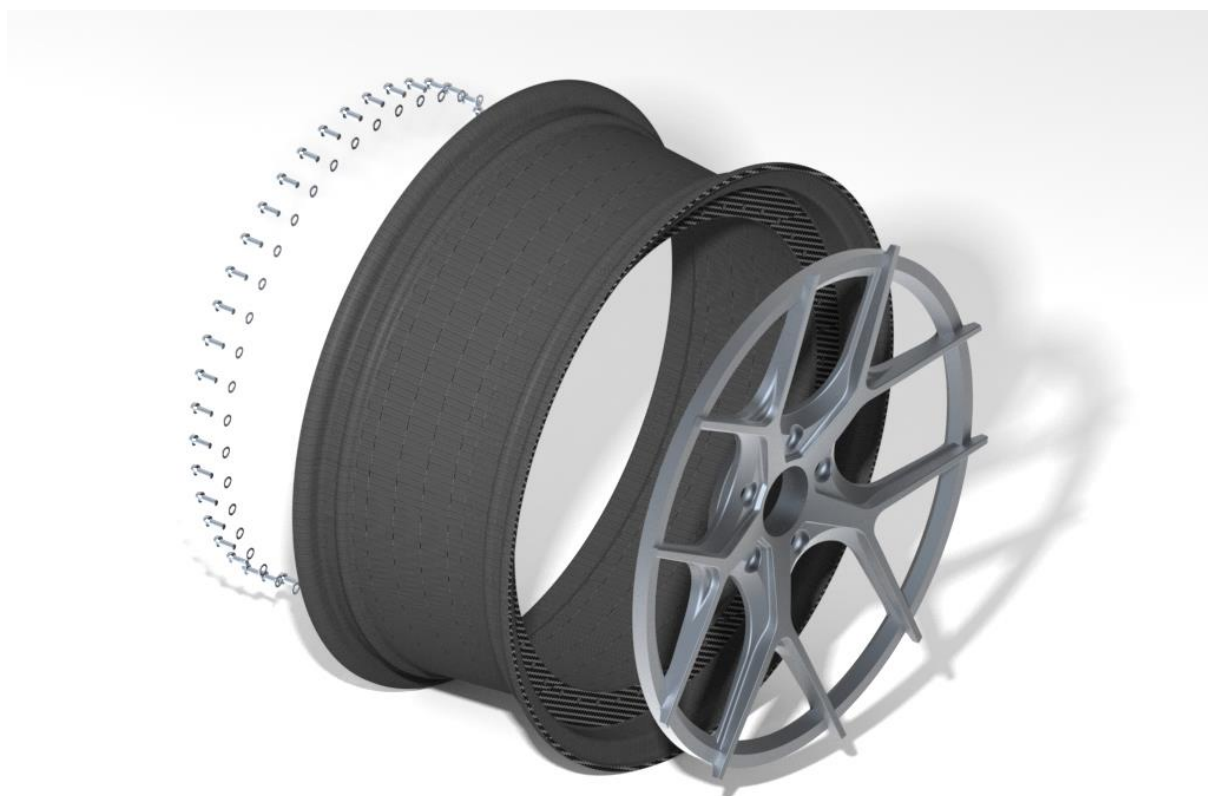
Normalizované díly

Na jednom kole je provedeno celkem 45 šroubových spojů, z nichž každý sestává z jednoho šroubu a podložky. Obě součásti jsou vyrobeny z titanové slitiny. Díly jsou normalizované. Cena jednoho šroubu M6x15 typu DIN 912 C-TA6V je dle zdroje [26] v přepočtu 110 Kč. Cena jedné podložky pro šroub M6 typu DIN 125 je dle zdroje [27] v přepočtu 44 Kč. Po sečtení 45 šroubových spojů vychází na 6 930 Kč.

Název komponentu	Počet kusů	Celková cena	Podíl na celkové ceně
Disk	1	5 100 Kč	16,95 %
Ráfek	1	18 000 Kč	59,80 %
Šrouby	45	5 000 Kč	16,61 %
Podložky	45	2 000 Kč	6,64 %
Cena za 1 disk kola		30 100 Kč	
Cena za sadu disků (4 kusy)		120 400 Kč	

Tab. 4.4 Výsledná cenová kalkulace

Výsledná cena za sadu disků, tedy čtyř kusů, byla vypočtena sečtením všech jednotlivých stanovených nákladů na výrobu každého komponentu zvlášť na celkem 120 400 Kč. Lze však předpokládat, že by vlivem dalších neuvažovaných nákladů a výrobních faktorů byla ve skutečném případě výsledná cena navýšena i o několik desítek tisíc korun. Výsledná cena navrženého disku kola se však pohybuje v nižších řádech než ceny disků s kompozitním ráfem v současnosti dostupné. Pro porovnání, nákupní cena tohoto typu disků kol se dle zdroje [28] pohybuje od 452 000 Kč za sadu.



Obr. 4.23 Pohled na rozloženou výslednou sestavu

5 Vyhodnocení a diskuse výsledků

5.1 Výsledky rešeršní části

Výsledkem kapitoly 3.1 *Druhy disků kol* je představení různých druhů konstrukčních provedení disků kol, které jsou v současnosti vyráběny a používány na osobních automobilech. Jsou hodnoceny vlastnosti použitých materiálů včetně výrobních postupů disků. Představeny jsou přednosti jednotlivých druhů disků. V kapitole 3.2 *Současné trendy v designu kol a automotive* jsou prezentovány nejnovější trendy a inovace v oblasti designu disků kol i obecně v oblasti automobilového průmyslu se zaměřením na elektromobilitu. Představeny jsou současné směry a požadavky při návrhu disků kol pro elektromobilní vozidla. Následuje souhrn inovací v oboru návrhu disků kol, a to použití kompozitních materiálů, aplikace generativního designu a využití umělé inteligence v tvorbě designu. Kapitola 3.3 *Konstrukční zásady disků kol* seznamuje se základními obecnými konstrukčními požadavky návrhu disků kol včetně popisu jednotlivých částí, konstrukčních rozměrů, jejich značení a názvosloví. Poslední kapitola 3.4 *Polymerní kompozitní materiály s vláknovou výztuží* představuje kompozitní materiály se zaměřením na jejich aplikaci ve výrobě kompozitních disků kol. Popsány jsou jejich složky, tedy plnivo a pojivo, a dále typy vazeb vláknových tkanin. V závěru jsou představeny prepregy jakožto polotovary k výrobě kompozitních disků kol včetně popisu procesu jejich výroby. Celkově rešeršní část představuje souhrn znalostí a informací, ze kterých je následně čerpáno v praktické části při samotném návrhu disku kola pro elektromobilní vozidla.

5.2 Výsledky praktické části

Kapitola 4. *Konstrukční návrh disku* představuje praktickou část bakalářské práce. V této části je čerpáno ze znalostí nabytých z přípravy části rešeršní a zabývá se primárním cílem práce, a to tvorbou konstrukčního návrhu disku kola pro elektromobilní vozidla. První kapitola této části 4.1 *Návrh konceptů* se zabývá výběrem vhodného konstrukčního typu disku na základě zvažování vhodných požadavků, primárně nízké hmotnosti, jenž by měl splňovat disk určený pro elektromobilní vozidla. Výsledkem úvahy je tedy rozhodnutí zvolit 2-dílný typ kola, přičemž materiálem ráfku byl zvolen materiál kompozitní a pro disk byla zvolena slitina hliníku zpracovaná tvářením. Výhody tohoto konstrukčního provedení včetně komentáře volby je v kapitole sepsáno. Následují tři podkapitoly řešící rozdílné provedení spoje disku a ráfku, přičemž je vycházeno ze skutečných technických řešení dle rešerše. V rozhodovací tabulce jsou všechny koncepty porovnány z několika hledisek a následně je vybrán jeden koncept vítězný. Samotné rozpracování konceptu disku kola až do výsledné podoby je zpracováno v kapitole 4.3 *Rozpracování vybraného konceptu*. Tato kapitola začíná vytvořením a představením CAD modelu sestavy kola. Popsány jsou zvolené materiály, geometrie disku, spojovací součásti a základní konstrukční rozměry disku. Návrh disku kola pokračuje dále v kapitole 4.3.1 *Příprava numerické simulace pro silové zatížení disku*, ve které je sepsána příprava simulačního modelu včetně volby okrajových podmínek. V následující kapitole 4.3.2 *Výsledky numerické simulace silového zatížení disku* jsou zobrazeny snímky provedených simulací silových namáhání s pomocí softwaru Ansys. Následuje kapitola 4.3.3 *Kontrola bezpečnosti navrženého disku*, jenž si klade za cíl zkontrolovat pevnostní návrh disku pomocí metod kontroly bezpečnosti při působení

napětí statického a dynamického. Obsahem kapitoly 4.4 *Ekonomické zhodnocení* je výpočet výsledného cenového zhodnocení sestavy.

5.2.1 Zhodnocení návrhu kompozitního ráfku

V případě kompozitního ráfku se nabízí velký počet možných konstrukčních optimalizací, včetně zdokonalení průběhu samotné simulace. Při přesném návrhu kompozitního dílu by bylo vhodné např. zvolit nižší počet vrstev prepregu v prohloubení ráfku, jelikož zde z výsledku simulace nevzniká podstatně vysoké napětí. Následovaly by optimalizace v oblasti patek ráfku a míst styku s pneumatikou, kde dochází již k patrnějším napětím. V neposlední řadě by bylo třeba zamyslet se nad konkrétním návrhem skladby a provázáním jednotlivých vrstev prepregů primárně v místě napojení obruče s dírami pro montáž disku. V tomto místě je obruč spojena se zbytkem ráfku spojem, jenž by se dal označit jako tzv. T-joint. V konečné fázi analýzy simulačního silového zatížení by k dosažení nejpřesnějších výsledků vzniku napětí v kompozitním díle bylo vhodné využít výsledky z modulu ACP Post softwaru Ansys. Toto prostředí umožňuje zkoumat napětí v jednotlivých vrstvách kompozitu a analyzovat tak i vznik případných delaminací, jež by měly za následek pevnostní selhání kompozitního dílu. Na místě by bylo zvážit i výslednou hodnotu maximální deformace ráfku (**Obr. 4.20**), která vychází na 1,43 mm. Snížení této hodnoty by bylo možné docílit například zvýšením tuhosti ráfku. Tuhost by bylo možné zvýšit například úpravou jeho geometrie rozložením vrstev prepregu do strukturálního tvaru v oblasti patek ráfku. Tím by po obvodu v patce ráfku vznikla komora, kterou by bylo možné vyplnit např. polyuretanovou pěnou.

5.2.2 Zhodnocení modelu pneumatiky využitého v simulaci

V případě pneumatiky byl pro účely simulace aplikován materiál napodobující její mechanické vlastnosti. Pro zpřesnění výsledků by však bylo vhodné vytvořit její přesný model zahrnující vliv jejich výztuží. Vhodné by bylo také přidání okrajové podmínky v podobě tlaku v pneumatice, jenž by nepochybně také měl vliv na výsledná napětí v ráfku a disku. Pneumatika je navíc tvořena převážně z pryže, která patří do skupiny hyperelastických materiálů. Tato volba by přinesla nejpřesnější výsledky. Zároveň by však došlo k drastickému prodloužení výpočetního času simulace. Proto je nutné vždy hledat kompromis mezi realističností simulačního modelu a délkou výpočtu.

5.2.3 Problematika šroubových spojů

Počet a typ použitých šroubů sloužících k provedení spoje disku a ráfku byl zvolen na základě provedené rešerše podobných typů kol. Analýza silového zatížení přesné dimenzování těchto šroubových spojů nezahrnuje. V simulacích je tento spoj nahrazen kontaktní vazbou typu „Bonded“, jež software Ansys nabízí. Jedná se o vazbu simulující absolutní nepohyblivý spoj dvou komponentů. Prakticky tak definuje dokonale dimenzované provedení šroubových spojů, zajišťující třecí sílu dostatečně velikou tak, že nedochází ke vzájemnému pohybu dvou spojovaných komponentů. Lze předpokládat, že simulace obsahující šroubové spoje, kterým by bylo aplikováno dané předpětí by do výsledků vnesly navíc napětí do oblastí v jejich okolí. Došlo by tak

ke změně simulačních výsledků. Stejná úvaha platí i pro předpětí pěti šroubů spojujících disk s hlavou kola vozidla. Pro zajištění přesné soustředné pozice disku a ráfku by bylo vhodné použít lícované šrouby plnící tuto funkci. Při použití běžných šroubů by totiž při montáži disku a ráfku nebylo možné tento geometrický požadavek dodržet. Docházelo by tak vlivem posunutí těžiště ráfku z osy rotace kola ke vzniku nežádoucích odstředivých sil způsobujících další napětí. Lícované šrouby by však v tomto případě bylo nutné dimenzovat na smyk.

5.2.4 Aerodynamické vlastnosti disku kola

Parametrem, který při volbě konstrukčního provedení diskutován není je důraz na aerodynamiku disku kola, která má v konečném důsledku vliv na výsledný součinitel aerodynamického odporu vozu. Zlepšení aerodynamiky disku je majoritně docíleno zaručením hladkého povrchu čela disku. To lze zaručit např. aero krytem z lehkého materiálu. Nabízí se využití polymerních materiálů, či inovačních materiálů kompozitních ať už recyklovaných karbonových vláken, či biokompozitů, např. tedy materiálů s obsahem lněných vláken.

5.2.5 Vyhodnocení kontroly bezpečnosti

Výsledkem kontroly bezpečnosti při statickém zatížení disku je minimální hodnota součinitele bezpečnosti při tomto druhu namáhání, tedy $k = 3,017$. Tato hodnota je přibližně třikrát vyšší než bezpečnost, při které by došlo k plastickým deformacím. Dimenzování disku vzhledem ke statickému namáhání tak lze považovat za vyhovující. Disk je následně ověřen kontrolou bezpečnosti při dynamickém namáhání analytickými výpočty. Stanovení bezpečnosti dynamického namáhání součásti je v porovnání se statickým zatížením již poměrně složitý proces, do něhož vstupuje mnoho vlivů. Z tohoto důvodu jsou v současnosti pro komponenty složitých tvarů, jako jsou i disky kol automobilů, využívány počítačové simulace s podporou metody konečných prvků. V této práci je však pro ukázkou využit modelový analytický výpočet na základě několika vztahů běžně využívaných např. při dimenzování strojních součástí. Nepřesná volba vstupních součinitelů může mít velký vliv na výslednou bezpečnost. Pro dosažení přesnějších výsledků bezpečnosti při dynamickém namáhání by tak bylo nejvhodnější využít funkce simulačních softwarů. Výsledkem minimální hodnoty součinitele bezpečnosti při amplitudovém namáhání je i přes to hodnota vyšší, než 1, tedy $k_a = 1,58$. Disk lze tak na základě tohoto výsledku považovat za pevnostně vyhovující i při zvoleném typu dynamického namáhání. V případě kompozitních materiálů, tedy ráfku, nebyla v rozsahu této práce kontrola bezpečnosti provedena, jelikož se jedná o náročnější proces vyžadující další znalosti. V rámci této práce se tak lze spokojit s výslednou hodnotou maximálního ekvivalentního napětí zjištěnou pomocí simulace (**Obr. 4.19**).

5.2.6 Vyhodnocení celkové kalkulace

Výsledkem cenové kalkulace v kapitole 4.4 *Ekonomické zhodnocení* je výsledná hodnota za sadu disků, tedy 4 kusů, jenž vychází na 120 400 Kč. Nejvyšší podíl na ceně vychází právě na kompozitní ráfek s 59,8 %. To je způsobeno vysokými náklady na nákup prepregů a jejich následným zpracováním. Navržený disk kola je tak vzhledem ke své výrobní ceně vhodný k využití na elektromobilech vyšší cenové kategorie.

6 Závěr

Výsledkem bakalářské práce je návrh 2-dílného disku kola sestávající z kompozitního ráfku tvořeného uhlíkovými prepregy a disku ze slitiny hliníku EN AW-6061 T6. Oba komponenty jsou navzájem spojeny pomocí šroubových spojů s využitím šroubů a podložek ze slitiny titanu TA6V. Součástí práce je CAD model komponentů i celkové sestavy vytvořený v softwaru PTC Creo včetně vytvořených technických výkresů obsažených v příloze. Navržený disk kola je konstruován pro využití na vozidle Tesla Model Y. Výsledná hmotnost disku kola je 7,35 kg a moment setrvačnosti k ose rotace kola vychází na hodnotu $0,32 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$. Jelikož disky kol z běžných hliníkových slitin rozměru ráfku 20“ dosahují hmotnosti i 14kg, došlo ke snížení hmotnosti o necelých 50%. Jedná se tak o velmi uspokojivý výsledek. Disk ze slitiny hliníku spolu s kompozitním ráfkem vyhověly dle kapitoly 4.3.2 *Výsledky numerické simulace silového zatížení disku* analýze silového zatížení. Maximální ekvivalentní napětí na disku při situaci jízdy po nerovné vozovce dosahuje hodnoty 91,481 MPa. U ráfku se jedná o hodnotu 60,353 MPa. Hodnoty maximálních deformací při stejné modelové situaci dosahují 1,089 mm u disku a 1,481 mm u ráfku. Hodnota bezpečnosti disku při statickém zatížení je $k = 3,017$. Hodnota součinitele bezpečnosti při daném amplitudovém napětí je $k_a = 1,58$ (viz kapitola 4.3.3 *Kontrola bezpečnosti navrženého disku*). Návrh disku kola určeného pro elektromobilní vozidla tak lze považovat v důsledku splnění daných požadavků a úspěšné analýze silového zatížení za dokončený. Na základě vyhodnocení výsledků dle kapitoly 5. *Vyhodnocení a diskuse výsledků* se nabízí v budoucnu rozpracovat téma podrobněji se zaměřením na zmíněné kapitoly.

Použitá literatura

- [1] LEISTER, Günter. *Passenger car tires and wheels : development - manufacturing - application*. Cham: Springer, 2018. ISBN 978-3-319-50117-8.
- [2] Škoda VEGA 7,5x18 5x112 ET51 - Lesklá černá. *PMPNEU* [online]. [cit. 2024-05-09]. Dostupné z: <https://aluskoda.cz/kolo-z-lehk-slitiny-vega-18>
- [3] Carbon+. *Brixton Forged™* [online]. 15. listopad 2022 [cit. 2024-05-09]. Dostupné z: <https://brixtonforged.com/forged-wheels/carbon-series/>
- [4] LV1. *esrwheels.com* [online]. [cit. 2024-05-09]. Dostupné z: <https://esrwheels.com/products/lv1>
- [5] *The new Skoda Enyaq Coupe iV embodies refined electric mobility | Electric Hunter* [online]. 1. únor 2022 [cit. 2024-03-03]. Dostupné z: <https://www.electrichunter.com/skoda-electric-cars/new-skoda-nyaq-coupe-iv-embodies-refined-electric-mobility>
- [6] Peugeot Inception concept previews radical future EVs with 680hp and 500-mile range. *carwow.co.uk* [online]. [cit. 2024-03-03]. Dostupné z: <https://www.carwow.co.uk/peugeot/news/6567/peugeot-inception-concept-revealed>
- [7] Range Rover Sport SV | Special Vehicle Operations. *landrover* [online]. [cit. 2024-03-03]. Dostupné z: <https://www.landrover.co.uk/special-vehicle-operations/range-rover-sport-sv/boundary-pushing-innovation.html>
- [8] Volkswagen tests AI-informed design process to cut weight—and flaunt it. *Green Car Reports* [online]. 10. červenec 2019 [cit. 2024-03-03]. Dostupné z: https://www.greencarreports.com/news/1123945_volkswagen-tests-ai-informed-design-process-to-cut-weight-and-flaunt-it
- [9] GAUTHIER, Michael. Audi Is Using AI To Design The Wheels Of The Future. *Carscoops* [online]. 13. prosinec 2022 [cit. 2024-03-03]. Dostupné z: <https://www.carscoops.com/2022/12/audi-is-using-ai-to-design-the-wheels-of-the-future/>
- [10] VLK, František. *Podvozky motorových vozidel*. 3. přeprac., rozš. a aktualiz. vyd. Brno: Vlk, 2006. ISBN 80-239-6464-X.
- [11] JAN, Zdeněk; ŽDÁNSKÝ, Bronislav a ČUPERA, Jiří. *Automobily*. Brno: AVID, [2008]. ISBN 978-80-87143-03-2.
- [12] Značení alu kol a plechových disků. *Pneumatiky.cz* [online]. [cit. 2024-02-26]. Dostupné z: <https://www.pneumatiky.cz/znaceni-disku-t4>
- [13] PETRŮ, Michal; MLÝNEK, Jaroslav; MARTINEC, Tomáš a RYVOLOVÁ, Martina. *Vybrané postupy konstruování kompozitu vyztuženého dlouhými vlákny*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2019. ISBN 978-80-7494-477-2.
- [14] LIU, Yue, Bernd ZWINGMANN a Mike SCHLAICH. Carbon Fiber Reinforced Polymer for Cable Structures—A Review. *Polymers* [online]. 2015, 7(10), 2078–2099. ISSN 2073-4360. Dostupné z: <http://www.mdpi.com/2073-4360/7/10/1501>
- [15] CHAWLA, Krishan K. *Composite materials: Science and engineering*. 2. ed. New York: Springer, 1998. ISBN 0-387-98409-7.

- [16] EHRENSTEIN, Gottfried W. Polymerní kompozitní materiály. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [17] (5) *HOW TO: Making My Zenvo TSR-S Carbon Fibre Wheels! | ROAD TO ZENVO Part 4 - YouTube* [online]. [cit. 2024-05-07]. Dostupné z: https://www.youtube.com/watch?v=1o6dyGzS9rI&ab_channel=Shmee150
- [18] JELÍNEK, J. Návrh a výroba kompozitního kola vozidla Formule Student. Brno, 2019. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství. 91 s. Vedoucí diplomové práce Michal Janoušek.
- [19] TESLA MODEL Y FITMENT GUIDE. *EFP FORGED* [online]. [cit. 2024-04-13]. Dostupné z: <https://www.efpforged.com/pages/tesla-model-y-fitment-guide>
- [20] *Wheel/Rim profiles of passenger cars - TyreSizeCalculator.com* [online]. [cit. 2024-04-14]. Dostupné z: <https://www.tyresizecalculator.com/wheels/wheel-rim-profiles>
- [21] KAPOUN, L. Konstrukce disku kola osobního automobilu. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 67 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Petr Hejtmánek, Ph.D
- [22] PETRŮ, M. Studijní podklady pro Části strojů: Navrhování cyklicky namáhaných svařovaných konstrukcí, 2024.
- [23] Pešík, L.: Části strojů. 2. díl. Liberec: TUL, 2010, ISBN 978-80-7372-574-7
- [24] 241.3mm (9 1/2") Diameter Aluminium Round Bar. *Aluminium Warehouse* [online]. [cit. 2024-05-03]. Dostupné z: <https://www.aluminiumwarehouse.co.uk/products/9-1-2-in-diameter-aluminium-round-bar>
- [25] *250°F Cure Carbon Fiber Fabric 2x2 Twill PREPREG Double Sided 3k 50"/127cm 6oz/203gsm Toray T300 - Composite Envisions* [online]. 27. březen 2024 [cit. 2024-05-03]. Dostupné z: <https://compositeenvisions.com/product/250f-cure-carbon-fiber-fabric-2x2-twill-prepreg-double-sided-3k-50-127cm-6oz-203gsm-toray-t300/>
- [26] *Titanium screw - Tapered Socket Cap - Din 912 C- TA6V (Grade 5) - Diameter M6* [online]. [cit. 2024-05-03]. Dostupné z: <https://www.titane-services.eu/Titanium-screw-Tapered-Socket-Cap-Din-912-C-TA6V-Grade-5-Diameter-M6>
- [27] *Titanium Flat Washer - Grade 5 (TA6V) M6 - DIN 125* [online]. [cit. 2024-05-03]. Dostupné z: <https://www.titane-services.eu/Titanium-Flat-Washer-Grade-5-TA6V-M6-DIN-125>
- [28] Forged Wheels - Brixton Forged Custom Wheels For Super Cars. *Brixton Forged™* [online]. 16. duben 2024 [cit. 2024-05-03]. Dostupné z: <https://brixtonforged.com/forged-wheels/>

Seznam příloh

Příloha č. 1 – Výkres BP – Salač – 01 (DISK)

Příloha č. 2 – Výkres BP – Salač – 02 (RÁFEK)

Příloha č. 3 – Výkres BP – Salač – 03 (SESTAVA)

Příloha č. 4 – CD s výkresy a CAD modelem sestavy