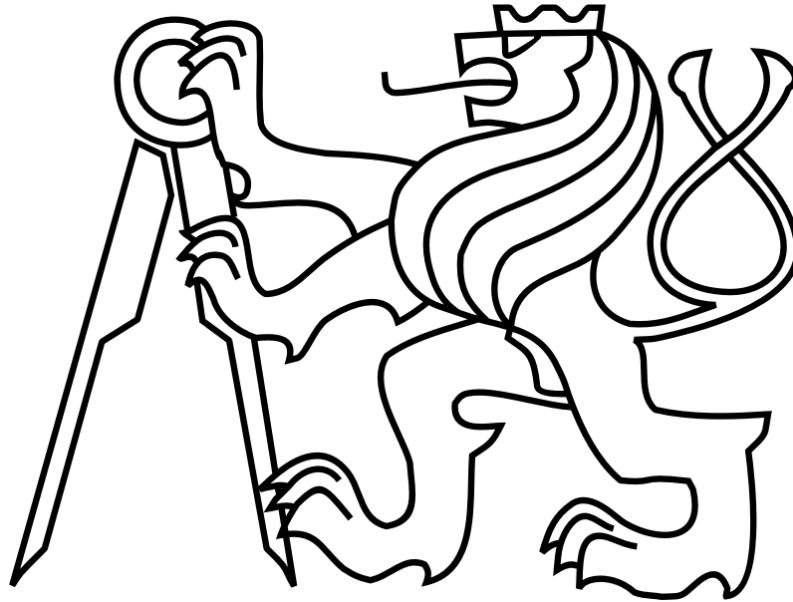


České vysoké učení technické v Praze

Fakulta strojní

Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel



Vývoj kompozitního ráfku pro vůz kategorie Formula Student

Diplomová práce

Autor:

Gorazd Balejík

Vedoucí práce:

Ing. Filip Zavadil

Studijní program:

Dopravní, letadlová a transportní technika

Praha 2017

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Balejík** Jméno: **Gorazd** Osobní číslo: **396971**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel**
Studijní program: **Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Dopravní, letadlová a transportní technika**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Vývoj kompozitního ráfku pro vůz kategorie Formula Student

Název diplomové práce anglicky:

Development of composite wheel rim for Formula Student Car

Pokyny pro vypracování:

- 1) Vytvořte projektový návrh kompozitního ráfku
- 2) Navrhněte vhodnou skladbu kompozitu
- 3) Proveďte základní MKP výpočty ráfku
- 4) Navrhněte postup výroby kompozitního ráfku

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Filip Zavadil, ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel FS

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

,

Datum zadání diplomové práce: **24.10.2016**

Termín odevzdání diplomové práce: **06.01.2017**

Platnost zadání diplomové práce: _____

Podpis vedoucí(ho) práce

Podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

Podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

8.11.2016

Datum převzetí zadání

Balejík

Podpis studenta

Prohlášení o autorství

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně, a použil jsem pouze podklady uvedené v seznamu použité literatury.

V Praze dne

.....

Podpis

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucímu své práce Ing. Filipu Zavadilovi, jenž mi poskytl cenné rady a zkušenosti během konzultací a při řešení problémů, se kterými jsem se během mé práce potýkal. Poděkování patří také Ing. Karlu Doubravovi Ph. D. za pomoc při experimentálním získávání materiálových charakteristik a také Ing. Michalu Vašíčkovi Ph. D. za přínosné rady v oblasti MKP analýz. Děkuji též členům týmu CTU Cartech za poskytnutí rad a jejich zkušeností v dané problematice a společnosti LA Composites za rady, důležitá data a za možnost profesionálního zázemí pro výrobu navrženého dílu. Nakonec bych rád poděkoval týmu eForce FEE Prague Formula za projevenou důvěru při návrhu takto zásadní součásti monopostu.

Anotační záznam

Jméno autora:	Gorazd
Příjmení autora:	Balejčík
Název práce česky:	Vývoj kompozitního ráfku pro vůz kategorie Formula Student
Název práce anglicky:	Development of composite wheel rim for Formula Student Car
Rozsah práce:	stránky: 75 obrázky: 69 tabulky: 10 grafy: 2 přílohy: 11
Akademický rok:	2016/2017
Jazyk práce:	CZ
Ústav:	Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel
Studijní program:	Magisterský – Dopravní, letadlová a transportní technika
Vedoucí diplomové práce:	Ing. Filip Zavadil
Anotace:	Práce se zabývá vývojem a návrhem konstrukce ráfku závodního monopostu Formula student, s primárními požadavky na snižování hmotnosti a zvyšování jeho tuhosti.
Klíčová slova:	ráfek, kolo, kompozit, Formula Student
Využití:	Tuto práci lze využít k porovnání možností, které nabízejí klasické a moderní konstrukční materiály a technologie v odvětví, které klade maximální důraz na snižování hmotnosti dílů při zachování, či zlepšování jejich mechanických vlastností. Výsledek práce bude využit k technickému vylepšení závodního prototypu série Formula student týmu eForce.

Abstrakt

V první části práce se autor zabývá rozbořem doposud používaných řešení ráfků závodního monopostu kategorie Formula Student a analýzou jejich silných a slabých stránek.

V druhém oddílu autor navrhuje své vlastní řešení ráfku, které nejlépe splňuje požadavky vyplývající z rešerše. Věnuje se návrhu skladby laminátové konstrukce, navržené v předcházející části, na základě MKP analýz. Pojednává o návrhu technologie výroby a výrobě prototypu.

Následuje kapitola věnující se analýze pozitiv a negativ prototypu. Optimalizaci slabých stránek a následnému návrhu, výpočtu a postupu výroby druhé generace ráfku.

Abstract

In the first part of this thesis, the author deals with the analysis of usually used designs of rims on the racing monoposts in Formula Student series and analyze their strengths and weaknesses.

In the second section the author proposes his own design of rim meets the requirements arising from the research in the first part. He determinates laminates layup based on FEM analysis, proposes a manufacture technology of the final product and describes that manufacturing.

In next chapter author analyzes strengths and weaknesses of the first prototype. Optimizes weaknesses and makes modified design, new calculations and proposes new manufacturing technology for the second generation of rim.

Obsah

1	ÚVOD.....	10
1.1	MOTIVACE, CÍL A OBSAH PRÁCE	10
1.2	FORMULA STUDENT	11
2	RÁFKY POUŽÍVANÉ V SÉRII FS	13
2.1	PNEUMATIKY	13
2.2	OZ FORMULA STUDENT 13"	15
2.3	OZ FORMULA STUDENT MAGNESIUM CL 10"	16
2.4	KEIZER 10" FORMULA SHELL 12 BOLT	16
2.5	HYBRIDNÍ RÁFKY	18
2.6	CELOKOMPOZITNÍ RÁFEK.....	19
3	VLASTNÍ NÁVRH	20
3.1	SPECIFIKACE POŽADAVKŮ	20
3.2	LÍMEC.....	21
3.3	STŘED A UNAŠEČ.....	23
3.4	PAPRSKY	26
3.5	KAPSY.....	27
3.6	JÁDRO	28
4	MKP ANALÝZA A NÁVRH SKLADBY LAMINÁTU.....	29
4.1	METODIKA NÁVRHU SKLADBY	29
4.2	ZÁTĚŽNÉ STAVY RÁFKU	30
4.3	PŘÍPRAVA MODELU.....	32
4.4	KONEČNĚPRVKOVÁ SÍŤ	33
4.5	SIMULAČNÍ ÚLOHA	35
4.5.1	<i>Materiálové modely.....</i>	<i>36</i>
4.5.2	<i>Zadání zatěžování</i>	<i>41</i>
4.5.3	<i>Kontaktní vazba</i>	<i>42</i>
4.6	ANALÝZA.....	42
4.6.1	<i>Izotropní potah.....</i>	<i>42</i>
4.6.2	<i>Kompozitní potah.....</i>	<i>45</i>
4.6.3	<i>Hliníkový ráfek.....</i>	<i>47</i>
4.6.4	<i>Kompozitní potah s objemovým jádrem.....</i>	<i>48</i>
5	VÝROBA.....	52
5.1	MATERIÁL	52

5.2	FORMY	56
5.3	PĚNOVÉ JÁDRO	61
5.4	NÁSTŘIHY TKANINY	63
5.5	VÝROBNÍ POSTUP	63
6	DALŠÍ VÝVOJOVÁ GENERACE	67
6.1	MOTIVACE.....	67
6.2	NOVÝ NÁVRH	67
6.3	MKP.....	69
6.4	VÝROBA	71
7	ZÁVĚR	73
8	POUŽITÁ LITERATURA A ZDROJE	74
9	SEZNAM PŘÍLOH.....	75

1 Úvod

1.1 Motivace, cíl a obsah práce

Tato práce vznikla jako snaha o další vylepšování dynamických vlastností monopostu týmu z ČVUT v sérii Formula Student/Formula SAE. Trvalým trendem této soutěže je aplikace pokročilých materiálů a postupů za účelem snižování hmotnosti dílů při zachování či dokonce vylepšení jejich ostatních vlastností, především pak tuhosti. Motivací pro tento nákladný a složitý vývoj není pouze samotné vylepšení dynamiky vozidla, ale také vyšší hodnocení v disciplínách, kde profesionálové, například i ze stájí Formule 1, hodnotí inženýrská řešení formule. V neposlední řadě je velkou motivací možnost nabýt cenné znalosti a zkušenosti s technologiemi a materiály, se kterými, i v dnešní době, není tak jednoduché přijít do kontaktu.

Z hlediska odlehčování jsou ráfky jedním z prvních cílů. Zaprvé, ráfek je v porovnání s většinou součástí vozu poměrně těžký díl, má tedy potenciál k velkému celkovému odlehčení monopostu. Zadruhé, tvoří značný podíl na neodpružených hmotách vozu. Také se jedná o rotující hmotu a vzhledem k charakteru tratí v sérii Formula Student, které nutí vůz neustále brzdit a opětovně akcelarovat, je velmi důležité snižovat jejich moment setrvačnosti, tedy snižovat jejich hmotnost a centralizovat ji k ose jejich rotace. U přední, řídicí, nápravy se tím zároveň zmenšuje gyroskopický moment, který působí proti řidiči, během změny úhlu natočení volantu, respektive kol. V neposlední řadě se jedná o díl, který je prakticky nejvzdálenější od těžiště vozu. Jeho hmotnost se tedy značně projevuje na celkovém momentu setrvačnosti monopostu kolem jeho svislé osy. Ráfky jsou navíc na autě čtyři, vylepšení vlastností jednoho ráfku se tedy na vozidle projeví čtyřnásobně.

Vzhledem k řešením a parametrům ráfků vhodných pro aplikaci v rámci soutěže Formula Student, a vyhovujícím specifikacím našeho vozu, které jsou na trhu dostupné, se náš tým rozhodl pro vývoj svých vlastních ráfků.

Cílem této práce je tedy kompletní vývoj experimentálního ráfku pro ultralehké soutěžní vozidlo formulového typu a to od prvotního návrhu tvaru z hlediska požadavků soutěže, funkčnosti, zástavby a optimalizace rozložení namáhání konstrukce, přes pevnostní a tuhostní výpočty a návrh skladby laminátové struktury, až po návrh technologie a způsobů realizace výsledného dílu.

1.2 Formula Student

Formula Student/Formula SAE je celosvětový projekt a bezpochyby největší a nejrozšířenější konstrukční soutěž na světě zaměřená na studentskou činnost.

V dnešní době je čím dál tím více kvalitních absolventů technických univerzit a proto většinou zaměstnavatelé po uchazečích o práci vyžadují praxi. Získat požadovanou praxi však není pro studenty jednoduchou záležitostí. Právě v tomto ohledu je soutěž Formula student tak přínosná. Nabízí studentům, kteří tomuto projektu věnují svůj volný čas získat praktické znalosti a dovednosti, kterých sami jen těžko dosáhnou a to především v uplatnění moderních, čili i velmi drahých technologií a materiálů. Týmy, zúčastňující se série, obvykle spolupracují s průmyslovými podniky, které v této soutěži velmi často „loví mozky“ a členové týmů proto většinou hned po studiu nastupují do těchto firem.

Co to tedy Formula student vlastně je? Jak již název napovídá, je to soutěž formulí, tedy závodních monopostů soutěžících na silničních okruzích. A jak napovídá druhé slovo v názvu, student, členem týmu se může stát pouze student a to student jakékoli školy. V praxi to tedy znamená, že závodní vůz je navržen a z velké části také vyroben a postaven studenty, převážně technických univerzit. Týmy poté jezdí po celém světě a účastní se jednotlivých podniků v rámci série.

V rámci jednoho podniku jsou závodní monoposty prověřovány hned v několika disciplínách. Primárně se tyto disciplíny dají rozdělit na statické a dynamické.

V rámci statických disciplín se hodnotí tzv. Cost-report – hodnocení ceny vozu a jednotlivých dílů. Business plane – marketingový plán na prodej a podporu myšlené série vozů. Engineering Design Report – v této pro nás zásadní disciplíně komisaři, převážně inženýři z automobilek zabývajících se produkcí sportovních a závodních vozů, hodnotí konstrukci monopostu.

V bloku dynamických kategorií se prověřují jízdní vlastnosti vozů. Těmto závodním disciplínám předchází důkladné přejímky jak mechanické, tak elektrické. Do dynamických zkoušek patří čtyři disciplíny prověřující zrychlení, obratnost a spolehlivost závodních prototypů. Královnou těchto disciplín je pak vytrvalostní časovka na dvaadvacet kilometrů.

Za jednotlivé zkoušky tým, resp. auto, získává příslušný počet bodů. Pro každou disciplínu je jiné maximum bodů dle její důležitosti. Tyto body se pak sčítají, dle prestiže

podniku je jim přiřazena váha. Body z jednotlivých akcí se průměrují a na jejich základě se sestavuje žebříček světového hodnocení týmů.



Obr. 1 – Monopost FSE.04x během disciplíny EDR na závodech FS West



Obr. 2 – Monopost FSE.05 na tilt testu během technických přejímek na Závodech FS Czech

2 Ráfky používané v sérii FS

2.1 Pneumatiky

Trend ráfků ve Formuli Student je ovlivněn především na trhu dostupnými pneumatikami, neb právě pneumatika je jeden z mála dílů, které opravdu není možné navrhnout a hlavně vyrobit v podmínkách dostupných týmům Formula Student.

Na počátcích této soutěže začaly týmy, pravděpodobně z důvodů dostupnosti, používat pneumatiky o přípojovacím rozměru třináct palců, převážně od amerického výrobce Goodyear. Po bok Goodyeru se přidal též americký výrobce, tentokrát pouze závodních pneumatik, Hoosier. Jak se soutěž dostala do Evropy, týmy začaly používat také britské pneumatiky určené pro závody do vrchů od výrobce Avon. Pneumatiky speciálně pro tuto soutěž pak vyvinula i německá firma Continental.

V posledních letech se však čím dál tím více uplatňují pneumatiky, obouvající se na ráfky o rozměru deset palců. Takovéto pneumatiky mají menší vnější průměr a nižší hmotnost, tedy výrazně nižší moment setrvačnosti. Další vlastností těchto gum je, že se menší pneumatiky rychleji ohřejí na provozní teplotu, což je v soutěži, kde jsou nahřívací zařízení zakázána, velkou výhodou. Jediným problémem u takto malých pneumatik je horší odvod vody během takzvaného mokrého závodu, tedy na mokré trati. Vzhledem k rychlostem, kterých však monoposty během závodů dosahují, stále převažují výhody nad zápory.

Desetipalcové pneumatiky dnes nabízí pouze dva výrobci a to americký Hoosier a britský Avon. Dříve je vyráběl i Goodyear, ale ten bohužel produkci pro Formuli Student nedávno ukončil. Dostupné desetipalcové pneumatiky od jediných dvou výrobců na trhu však nemají stejný vnější průměr. Zatímco Hoosier nabízí pneumatiky o největším průměru osmáct palců, tedy pouze o dva palce menší než pneumatika na třináctipalcové ráfky, vnější průměr britských Avonů je pouhých šestnáct palců, díky čemuž jsou to nejlehčí pneumatiky v soutěži (o více než 2 kg lehčí než běžné třináctipalcové). Avon navíc nabízí pneumatiky s různými specifikacemi směsi.

Tým z německého Darmstadtu dlouhodobě spolupracuje s firmou Pirelli na vývoji jejich vlastních patnáctipalcových pneumatik. Z jejich dlouhodobých výsledků je však vidět, že tudy cesta nevede.

Poslední novinkou jsou nízkoprofilové třináctipalcové pneumatiky od německého Continentalu. Ty jsou velmi lehké a s přihlédnutím ke vstřícné politice společnosti Continental ke sponzorství, tak mají potenciál ke zpomalení trendu přechodu na desetipalcové obutí.



Obr. 3 – Porovnání pneumatik výrobců Continental, Hoosier a Avon



Obr. 4 – Porovnání pneumatik výrobců Continental, Hoosier a Avon

2.2 OZ Formula Student 13“

Nejčastěji používané ráfky v soutěži Formula Student jsou bezpochyby ráfky od italského výrobce, firmy OZ Racing, a sice jejich třináctipalcový model ze slitiny hliníku. Tyto ráfky jsou navrženy speciálně pro lehké monoposty Formule Student a firma je nabízí ve dvou provedeních - s dírami pro uchycení ráfku pomocí čtyř běžných kolových šroubů respektive matic nebo s úpravou pro uchycení centrální maticí.

Výrobce v sezoně 2014 rozšířil své portfolio také o ráfky ze slitin hořčíku. Tyto mají obdobný design jako disky ze slitin hliníku a jsou v nabídce také ve verzích pro čtyři šrouby či centrální matici. Vzhledem k omezené kapacitě výrobce, z důvodů zakázek ze soutěže Formule 1, jsou však obvykle kola ze slitiny hořčíku špatně dostupná.

Tyto ráfky jsou dnes v seriálu Formula Student používány především z důvodu příznivé ceny, malé konkurence a také z „tradicionalistických“ důvodů.



Obr. 5 – Ráfek OZ Formula Student 13“ Al v provedení pro čtyři šrouby [9]

2.3 OZ Formula Student Magnesium CL 10"

Ideálním řešením by se mohly zdát desetipalcové ráfky ze slitiny hořčíku od OZ Racing. Jsou velmi lehké, dostatečně tuhé a poskytují i přijatelný zástavbový prostor. Problémem tohoto řešení je však politika a výrobní kapacita výrobce. Prozatím je čekací doba na tyto ráfky přibližně 2 roky, což je vzhledem jejich k udávané životnosti tři roky nebo dva tisíce kilometrů nepřijatelné. Uvážíme-li navíc, že italský výrobce přednostně vyřizuje objednávky italských týmů, je jejich dostupnost prakticky nulová.



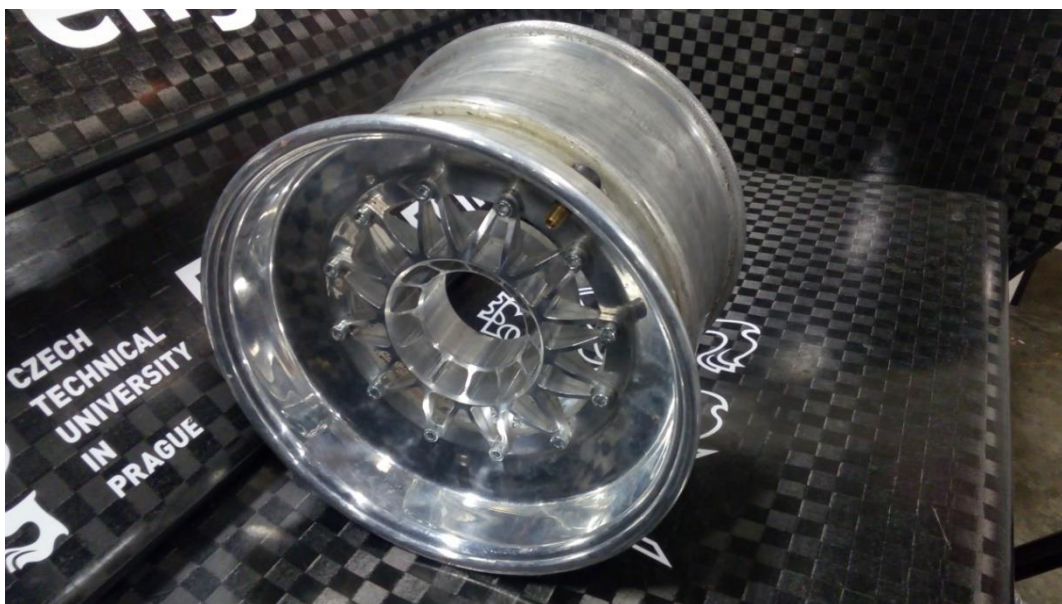
Obr. 6 – Ráfek OZ Formula Student Magnesium 10" [9]

2.4 Keizer 10" Formula Shell 12 bolt

Nejdostupnějším a nejpoužívanějším řešením u monopostů na desetipalcových kolech je v sérii Formula Student jednoznačně produkt od výrobce ze Spojených států, Keizer Wheels. Je to dvoudílný límec ze slitiny hliníku se středem připevněným pomocí dvanácti šroubů. Keizer pak nabízí buď kompletní kola i se středy nebo pouze límce a středy si tedy tým vyrobí sám. Vzhledem ke specifikacím středů od firmy Keizer, většina týmů volí právě onu druhou možnost, tedy středy navrhnout a vyrobit samy.

Tyto ráfky jsou sice nejpoužívanější, ale zdaleka to není uspokojivé řešení, a to především z hlediska tuhosti a přesnosti součástí. Límce se totiž vyrábějí tvářením na soustruhu. Polotovarem je tedy plech z vysokotahné slitiny hliníku. Ta je pro tuto technologii výroby nutná, avšak v porovnání například se slitinami určenými pro obrábění nemá ani zdaleka tak dobré mechanické vlastnosti. Límec se kvůli tomu také snadno plasticky zdeformuje a to často už při výrobě či následné manipulaci. Není tedy neobvyklé, že i nový límec projevuje značné obvodové házení. Dalším tuhostním problémem je už samotný tvar límce, límec má totiž v oblasti připojovacího čela oproti zbytku poměrně malou tuhost. To dovoluje znatelnou deformaci především vnitřní části ráfku během jízdy i za předpokladu dostatečně tuhé středové části a tedy zhoršení dynamických vlastností vozu. Nemalou nevýhodou je také v podstatě zbytečná hmotnost navíc v podobě spojovacího materiálu, držícího jednotlivé části tohoto ráfku pohromadě. Ten jednodílné disky nepotřebují. Celková hmota kola je navíc rozdělena převážně do límce, tedy do části nejdále od osy rotace, a celá sestava má tak značný moment setrvačnosti.

V současné době náš tým obouvá desetipalcové pneumatiky Avon a vzhledem k dostupnosti využívá právě límců společnosti Keizer s vlastním středem. Nevýhody a problémy s těmito ráfkami a absence jiného na trhu dostupného řešení jsou právě motivací pro vývoj vlastních ráfků.



Obr. 7 – Límce firmy Keizer se středy týmu eForce

2.5 Hybridní ráfky

Možným řešením problému špatných mechanických vlastností límců tvářených ze slitin hliníku je límce vyrobit z jiného vhodnějšího materiálu. Ocel nebo litina by sice byla tužší, ale mnohokrát těžší, řešení pomocí slitin titanu či hořčíku jsou špatně dostupné a především velmi nákladné. Vhodnými se jeví kompozitní materiály. Konkrétně pak laminát s výztuží z uhlíkových vláken.

Takovouto strukturu lze navrhnout tak, aby měla mnohokrát vyšší tuhost při nižší hmotnosti oproti límci ze slitin hliníku. Je to poměrně jednoduchý a efektivní způsob, jak realizovat relativně lehká a tuhá kola, kterého dnes využívá čím dál tím více týmů v soutěži. Tvar takovýchto límců pak většina týmů obvykle navrhuje téměř totožný jako límce od společnosti Keizer. Jejich výrobu pak nejčastěji realizují pomocí takzvané prepregové technologie a to jak s využitím autoklávu či pouze vakuové technologie.

V letošním roce začala firma Black Wave, založena bývalými členy jednoho z německých týmů soutěže Formula Student, nabízet komerčně jejich řešení desetipalcových límců z uhlíkového kompozitu, vyráběných technologií SMC (Sheet Molding Compound), tedy formováním pod tlakem.

Tato konstrukce má mnoho výhod, avšak je zde stále potenciál k odlehčení a dalšímu zvýšení tuhosti ráfku.



Obr. 8 – Límec vyráběný prepregovou technologií týmu ze státu Washington



Obr. 9 – Límec firmy Black Wave vyráběný SMC technologií [18]

2.6 Celokompozitní ráfek

Nejefektivnějším, avšak nejsložitějším způsobem jak vytvořit ráfek s co možná nejlepším poměrem tuhosti a hmotnosti, je navrhnout ho jako disk s límcem i středem tvořeným kompozitní strukturou, bez nutnosti užití spojovacího materiálu.

Takovýto díl je však velmi složité jednak navrhnout, tak i spočítat a především pak vyrobit. Proto se v soutěži objevily i pokusy o celokompozitní ráfky, které by byly navrženy s důrazem na co možná nejjednodušší výrobu. Jako nejlepší příklad takového řešení je celokompozitní disk týmu z britského Bathu. Ten vyrobil zvlášť středovou část a zvlášť límec, ale namísto šroubů k jejich spojení využil spoj lepený. Užitím takového typu spoje se týmu podařilo vyrobit ráfek, který je v porovnání s tím se šroubovým spojem nejen tužší, ale díky téměř zanedbatelné hmotnosti nutného lepidla a možnosti užít kompozitní střed, také výrazně lehčí. Řešení má své výhody, avšak vzhledem ke konstrukčním požadavkům, zejména na tvar středu a lepených ploch, poskytuje poměrně omezený zástavbový prostor pro nápravu.

Je tedy jasné, že konstrukce, která nejlépe vyhovuje všem požadavkům na ráfek vozu Formula Student kladeným, samozřejmě kromě složitosti výroby, je kompozitní ráfek, vyroben jako jeden komplexní kus. Vzhledem k celkové náročnosti realizace takovýchto disků, jich využívá opravdu jen absolutní špička série, která má k dispozici dostatečné personální i finanční kapacity.



Obr. 10 – Celokompozitní ráfek s vlepěným středem týmu z Bathu

Obr. 11 – Celokompozitní Ráfek týmu z rakouského Gratzu

3 Vlastní návrh

3.1 Specifikace požadavků

Z analýzy používaných řešení vyplývá, který typ konstrukce ráfku je nejvhodnější. Je to jednodílná celokompozitní struktura. Nyní je třeba specifikovat bližší požadavky pro konkrétní ráfek vhodný pro vůz týmu eForce.

Pevně dané jsou připojovací rozměry pneumatiky. Náš tým již třetí sezónu s velkou spokojeností využívá obutí britské firmy Avon o rozměrech deset palců připojovacího průměru a šířce sedm palců. Dalším velmi málo modifikovatelným rozměrem je pak drážka pro obutí pneumatiky (viz. Kapitola 3.2).

Ostatní rozměry by se mohly zdát libovolné, avšak ráfek musí poskytnout dostatečný zástavbový prostor pro nápravu a především pak brzdič. Disk též musí být zaměnitelný za rezervní, hliníkový, pro případ poškození během závodu, či neočekávané závady. Tato skutečnost ovlivňuje připojovací rozměry na náboj.

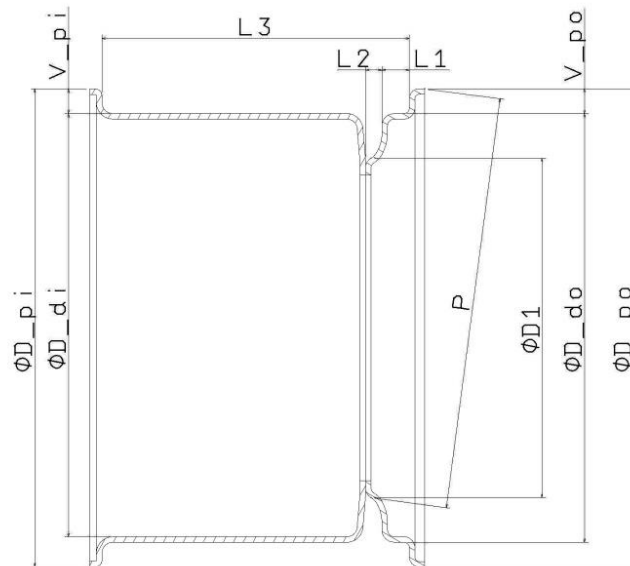
Vzhledem k potřebám sestavy těhlice a náboje je konstrukčně dán také takzvaný ET rozměr, tedy odsazení dosedací plochy ráfku na náboj od geometrického středu kola.

Ráfek je až na několik detailů v designu rotační součást a tak také bude modelován. Celý disk tedy bude rozdělen do konstrukčních podcelků, které budou řešeny zvlášť a většina z nich bude nakonec zarotována kolem osy kola. Jelikož se jedná o laminátovou skořepinu s prostorovým jádrem, bude následná konečněprvková analýza prováděna pomocí plošných elementů, jímž bude přiřazena příslušná skladba laminátu, a které budou kontaktní vazbou svázány s prostorovou sítí jádra. Je tedy výhodné kompozitní části ráfku modelovat pouze jako plochy, ovšem je třeba, u některých podcelků, zohlednit tloušťku budoucího laminátu. To je nutné zejména ve fázi návrhu forem podle modelu dílu.

Během modelování celé základní geometrie, je také kladen důraz na jednoduchou a rychlou editovatelnost, tedy na možnost snadné změny geometrie dílu pakliže následné pevnostní a tuhostní analýzy ukáží tuto potřebu.

3.2 Límec

Límec je část ráfku, na který dosedá pneumatika. Z obou stran je ukončen takzvanými patkami a nachází se na něm též drážka pro obutí pneumatiky. Rozměry límce jsou opravdu zásadní z hlediska schopnosti na něj obout pneumatiku. Proto byly naměřeny také příslušné rozměry dostupných hliníkových disků.



Obr. 12 – Důležité rozměry límce

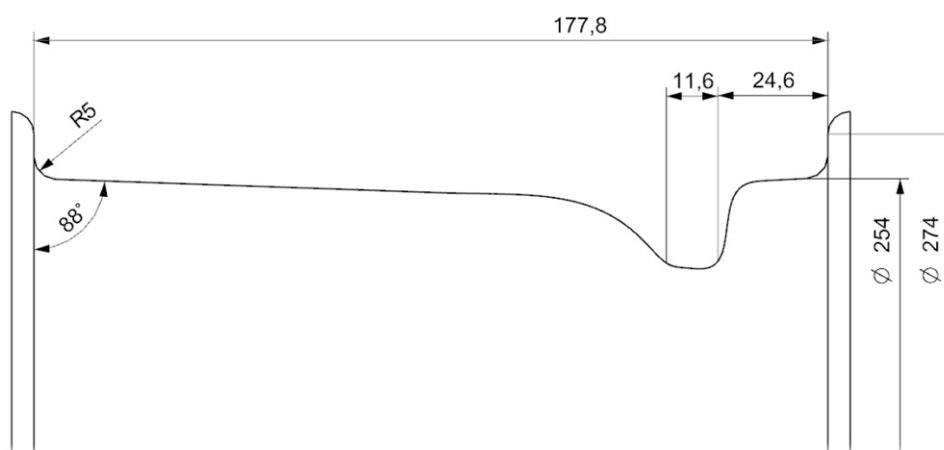
Rozměr [mm]	Doporučené rozměry	Keizer 10"	Pneu. Avon R10x7	Zvolené rozměry
D1 (průměr obouvací drážky)	max. 235	200		229
L1 (vzdálenost patky a drážky)	min. 12	69	10	25
L2 (šířka drážky)	min. 8	11		10
L3 (šířka ráfku)	min. 275	178	177	177
P (příčný rozměr patky a drážky)	max. 255	245		254
D_do (Dosedací prům. na vnější straně)	max. 254	253	252	254
D_di (Dosedací prům. na vnitřní straně)	max. 254	252,5	252	254
D_po (průměr patky na vnější straně)	max. 278	277	279	274
D_pi (průměr patky na vnitřní straně)	max. 278	275	279	274
V_po (výška patky na vnější straně)	max. 12	12		10
V_pi (výška patky na vnitřní straně)	Max. 12	11		10

Tab. 1 – Základní rozměry límce

Jakkoli se límec může, z hlediska konstrukce, zdát jednoduchým, není tomu tak. Samozřejmě zajistit správnou šířku a navrhnout vhodný tvar patek není moc velkou výzvou. U návrhu obouvací drážky už to není tak snadné. Tato drážka výrazně snižuje tuhost ráfku, je tedy snaha ji navrhnout tak, aby byla co nejtužší. To je důvod, proč ji udělat blízko limitu jejího maximálního průměru. Čím větší je průměr drážky, tím větší je příčná vzdálenost patky od protější drážky (rozměr „P“). Aby se při co největším průměru drážky zmenšil rozměr „P“, je vhodné navrhnout velmi krátkou dosedací plochu pro pneumatiku. Je však třeba najít kompromis, pokud by totiž byla plocha příliš krátká, mohla by z ní pneumatika v extrémním případě zatížení sklouznout do obouvací drážky a ztratit tak tlak. Dle zkušeností byla tedy zvolena plocha dostatečně velká pro pneumatiku, ale zároveň zajišťující dostatečný příčný obouvací rozměr „P“, při poměrně velkém průměru obouvací drážky. Čelo drážky by navíc mělo být zkosené nebo mít alespoň hranu upravenou do příslušného rádiusu pro snazší sklouznutí pneumatiky z drážky na dosedací plochu během obouvání.

Přechod z límce na patku je dle doporučení výrobce, pro dosažení co nejlepšího dosednutí a utěsnění pneumatiky na ráfku, opatřen pětimilimetrovým rádiusem.

Vzhledem k technologii výroby, tedy vytvrzení laminátové skladby na tuhé formě, je pak navíc potřeba límec opatřit technologickým úkosem, aby bylo možné vytvrzený díl z formy vyjmout. Pro takovýto úkos se obvykle volí hodnota dva stupně.

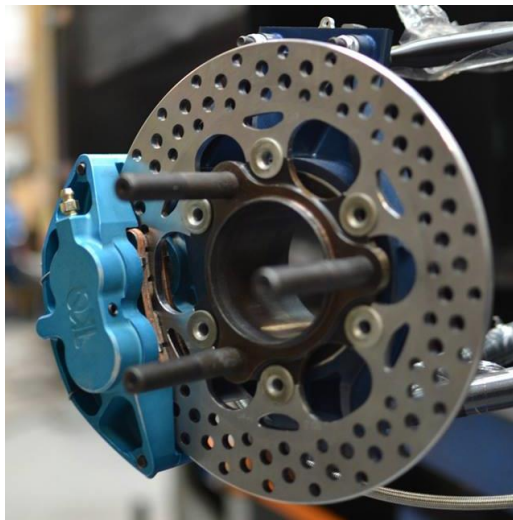


Obr. 13 – Tvar navrhovaného límce

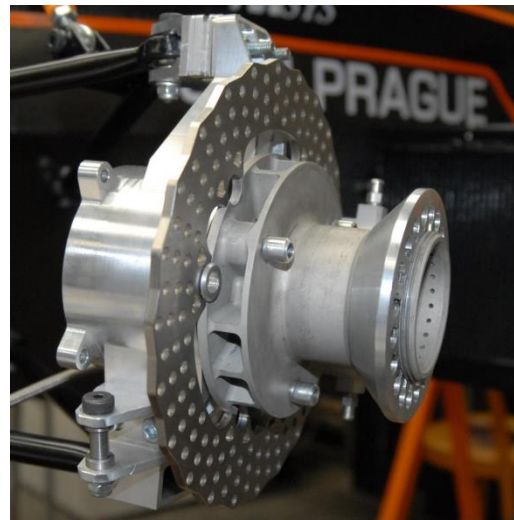
3.3 Střed a unašeč

Primární funkcí středu disku je přenos sil mezi zbytkem ráfku a nábojem nápravy. Musí tedy splňovat specifické geometrické a pevnostní požadavky. Tato kapitola se zaměří na požadavky geometrické.

Protože díl bude vyroben jako sandwichová struktura s potahy z uhlíkového kompozitu, je na místě navrhnout způsob uchycení kola k náboji, který bude do takového typu konstrukce vnášet zatížení co nejefektivněji. Nabízejí se dva nejpoužívanější způsoby, tedy připojení přes několik šroubů mimo osu rotace kola nebo pomocí centrální matice, jejíž osa je, jak již název napovídá, totožná s osou rotace.



Obr. 14 – Uchycení kola pomocí excentrických šroubů týmu CTU Cartech



Obr. 15 – Uchycení kola pomocí centrální matice týmu eForce

V případě klasických ráfků z kovových slitin je vhodným řešením, pro potřeby vozu kategorie Formula Student, uchycení pomocí excentrických šroubů. Toto řešení je nepatrně lehčí a navíc není třeba pojišťovat matice. Obvykle se uchycení centrální maticí s výhodou využívá tam, kde je třeba velmi rychle měnit kola, například při zastávce v boxech u okruhových závodů. V soutěži Formula Student se tedy nezdá být výhodné. Výhodným se však stává ve chvíli, kdy chceme využít kompozitních ráfků. V takovém případě má centrální matice hned dvě zásadní výhody. Zaprvé se utahovací síla, která je značná, skrze unašeč a matici rozkládá do mnohem větší plochy než u excentrických šroubů a navíc rovnoměrně. A zadruhé, tato síla se do ráfku vnáší

do směru vláken laminátu, tedy ve směru největší únosnosti materiálu, na rozdíl od excentrických šroubů, jejichž prostřednictvím vzniká v materiálu velké smykové napětí, které je pro uhlíková vlákna nejkritičtější. Na základě těchto skutečností byl pro navrhovaný ráfek zvolen způsob uchycení pomocí centrální matice. Úhel matice byl zvolen tak, aby se síla, která je přes ni do konstrukce vnášena, rovnoměrně rozložila do středu ráfku a jeho paprsků. Tedy úhel čtyřicet pět stupňů.

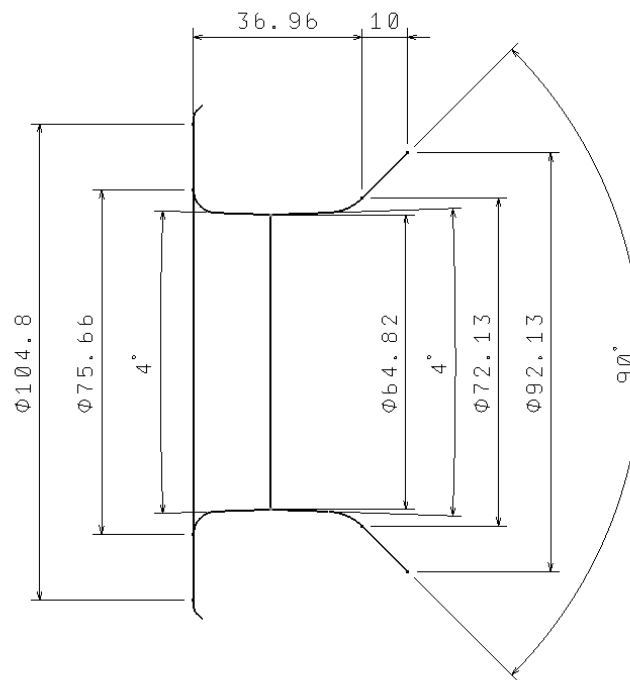
Z vnitřní strany dosedá ráfek na náboj kola takzvaným unašečem. Ve spolupráci s maticí tento unašeč zajišťuje pevnou pozici kola vůči náboji a zároveň do něj přenáší většinu jízdních zatížení. Unašeč má navíc za úkol realizovat přenos točivého momentu mezi kolem a nábojem. Tento moment vzniká jednak hnací silou, vzhledem k náhonu vozu na všechna čtyři kola i na přední nápravě, tak také silou způsobenou brzděním. Přenos krouticího momentu je primárně realizován třecí vazbou mezi unašečí ráfku a náboje. V extrémních případech jízdního zatížení však může nastat částečné odlehčení přítláčné síly kola na náboj nebo dokonce částečné odlehnutí těchto dvou ploch. I v takovém případě musí být zajištěn přenos krouticího momentu a to především z důvodu bezpečnosti zejména při brzdění. Pro takovýto případ je unašeč náboje opatřen třemi pevnými pojistnými čepy, které zapadají do příslušných děr v unašeči ráfku.

Rozměry dosedacích a připojovacích částí kola jsou pak ovlivněny především konstrukcí náboje kola. Jeho tvar je optimalizován z hlediska toku napětí v materiálu a z hlediska co největší úspory hmotnosti. Například průměr náboje na dosedacích plochách pro kolová ložiska je stejný, jako průměr závitu pro centrální matici. Tvar náboje je tak vlastně trubka. Tím se minimalizují koncentrace napětí, která by jinak vznikala v osazeních mezi různě velkými průměry. Dále je brzdový kotouč uchycen přímo na unašeči. Síly vznikající během brzdění se tak nepřenášejí přes hlavní tělo náboje, ale tečou přímo mezi kolem a brzdovým kotoučem.

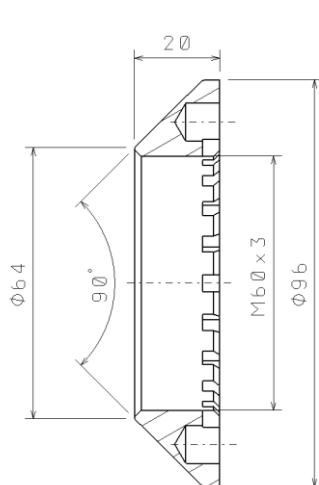
Pro konstrukční potřeby uložení náboje není možné, aby byl unašeč ráfku umístěn v geometrickém středu kola. Do tohoto středu je totiž nejvhodnější umístit kolová ložiska a zatěžovat je tak co nejmenším vyosením výslednice tíhy vozu na kole. Z tohoto důvodu je nutné ložiskům ustoupit stranou a unašeč posunout od geometrického středu kola směrem k vnějšku ráfku. Velikost tohoto posunutí se nazývá takzvaným ET rozměrem

Rozměry středu kola jsou tedy omezeny průměrem náboje (ten je dán rozměry dostupných kolových ložisek a zejména rozměry planetové převodovky zasazené v těhlici kola), potřebnými rozměry brzdového kotouče, ET rozměrem a potřebnou třecí plochou společnou unašečům kola a náboje.

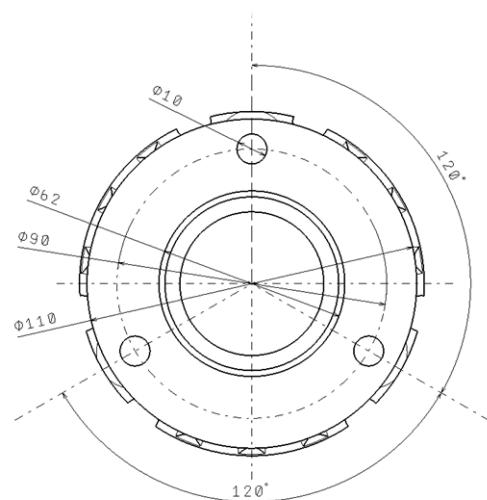
Vzhledem k technologickým požadavkům je střední část, tedy spojnice unašeče a sedla matice, opatřena technologickým úkosem.



Obr. 16 – Meridián navrhované středové části ráfku



Obr. 17 – Návrh centrální matice

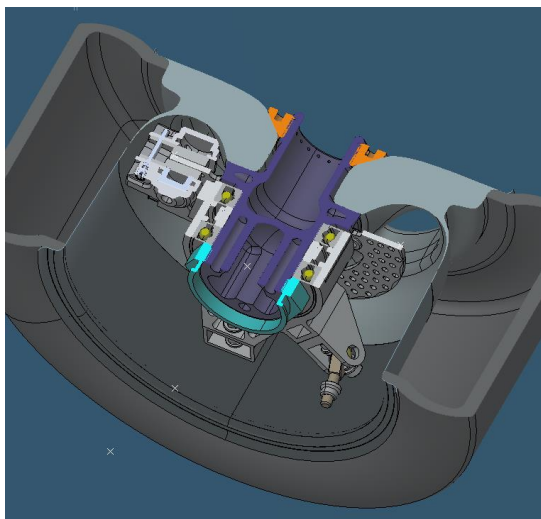


Obr. 18 – Návrh dosedací plochy unašeče

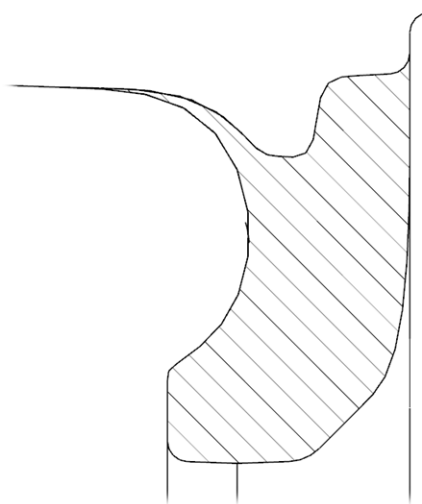
3.4 Paprsky

Částí ráfku, která již navržený límec a střed spojuje a vytváří tak jeden komplexní díl, jsou takzvané paprsky. Tato část je nejkritičtější z hlediska zástavby nápravové skupiny. Kvůli vysoké tuhosti ráfku při ohýbání (zvětšování úhlu mezi osou středu a osou límce) je snaha udělat paprsek co možná nejtlustší. To je však problém, jelikož uvnitř kola je sestava nápravy a zejména brzdový třmen výrazně zasahuje do prostoru ideálního paprsku. Kritický je tedy brzdič, a pokud se paprsky nedostanou do kolize s brzdičem, nedostanou se do kolize ani se zbytkem nápravy.

Tvar vnitřního i vnějšího potahu paprsků je navrhován s důrazem na plynulé a pozvolné napojení křivostí jednotlivých tvořících křivek. Pro zajištění vzniku co nejmenšího stříhového napětí v uhlíkových vláknech. Toho lze docílit pomocí takzvaných „Bridge“ křivek, které propojí funkční plochy s jasně definovaným tečným vektorem.



Obr. 19 – Zástavbový prostor nápravy



Obr. 20 – Navrhovaný tvar paprsku

3.5 Kapsy

Nyní je již kolo celistvý díl a je možné všechny křivky základní geometrie zarotovat. Takto vznikne plný disk.

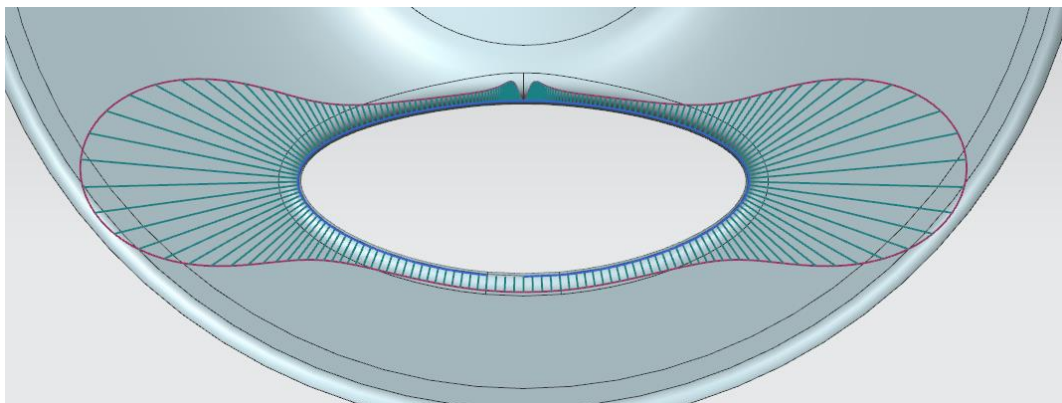
Pro odlehčení celé konstrukce a pro zvýšení množství protékaného vzduchu skrze kolovou sestavu, a tedy i účinnějšímu chlazení komponent brzdového systému, jsou v paprscích navíc vytvořeny takzvané kapsy. Kapsy jsou v podstatě díry v disku kola, které utvářejí tvar paprsku z pohledu ve směru osy rotace ráfku.

Vzhledem k počtu unášecích čepů a s přihlédnutím k celkovým rozměrům ráfku a především k požadavkům a možnostem laminátové konstrukce, bylo rozhodnuto použít kapsy tři a tedy i tři paprsky kola.

Kapsy jsou úmyslně umístěny tak, aby byl unášecí čep v jejich vrcholech. Namáhání způsobené hnacím, či brzdícím krouticím momentem se tak mezi středem a límcem kola přenáší přes vnitřní i vnější potahy paprsků mnohem rovnoměrněji. To kromě menšího napětí v jednotlivých potazích přináší také menší smykové napětí v pěnovém jádru paprsků.

Kapsy jsou opět, pro docílení co možná nejlepšího průběhu napětí v konstrukci, navrhovány pomocí bridge křivek a nástrojů pro analýzu průběhu jejich křivosti.

Také tuto část ráfku je nutné opatřit technologickými úkosy.



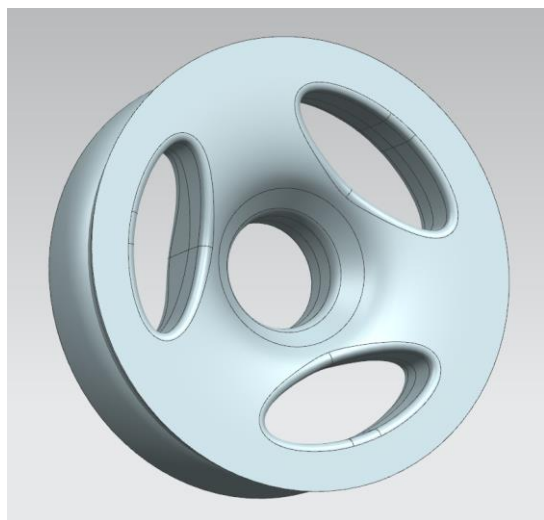
Obr. 21 – Analýza průběhu křivosti nárysu kapsy

3.6 Jádno

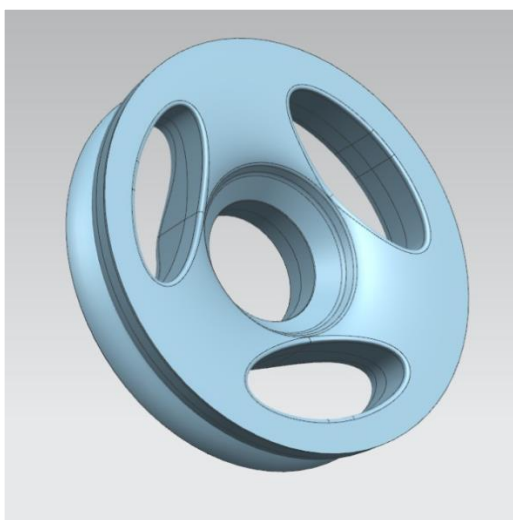
Poslední částí ráfku, kterou je pro další postup nutné vymodelovat, je jádro, tedy výplň prostoru tvořeného laminátovým potahem. Toto jádro bude vytvořeno z objemové pěny, je tedy vhodné jej modelovat jako objemový prvek.

Pro další fázi projektu, tedy návrh skladby laminátu pomocí analýzy metodou konečných prvků, je nejvhodnější model jádra, jako objem ohraničený plošným modelem ráfku. Jádro pro výpočet je tedy vytvořeno pouze vyplněním dutiny mezi plochami potahu ráfku. Je to vhodné, protože skladba laminátu se bude aplikovat na plochy pouze výpočetně, tedy pouze přepočítáním vlastností skladby přiřazené ploše. Výpočetní model má tedy pouze výpočetní tloušťku potahu a nikoli reálnou. Také je nutné realizovat lepenou vazbu mezi potahem a jádrem. Podmínkou takovéto vazby je, aby byly oba vázané povrchy pokud možno totožné. Právě z tohoto důvodu je jádro modelováno, jako by měl potah nulovou tloušťku.

Z tohoto modelu bude také následně vycházet model pro výrobu jádra reálného. Když bude znám počet vrstev laminátu v jednotlivých částech ráfku, lze určit tloušťky potahu a příslušnou vrstvu materiálu odebrat z objemu výpočetního modelu jádra.



Obr. 22 – Výpočetní model jádra



Obr. 23 – Model reálného jádra

4 MKP Analýza a návrh skladby laminátu

Za účelem návrhu skladby laminátového potahu, ale i materiálu jádra bude využita analýza namáhání dílu pomocí metody konečných prvků. U takto tvarově složitého dílu je MKP pro zjišťování napětí a deformací ideální, ne-li jediná použitelná metoda.

Metoda se zakládá na diskretizaci kontinua modelu do uzlových bodů (takzvaných nodů) tomuto kontinuu náležících a jejich následnému propojení do konečněprvkové sítě. Tímto propojením pak vznikají takzvané elementy konečněprvkové sítě, tedy útvary, jejichž hrany tvoří polynomy propojující uzlové body. Veškeré namáhání, či omezení pohybu je aplikováno na příslušné uzlové body. Řešící program pak na základě principu minima potenciální energie vypočítá posunutí uzlových bodů sítě. Na základě těchto posunů lze snadno vyjádřit například skutečnou deformaci dílu v daném uzlovém bodě nebo hodnoty napětí v jednotlivých elementech.

Celý proces výpočtu, respektive dimenzování dílu proběhne v softwaru NX Nastran. Je to především z důvodu, že se předpokládá úprava geometrie ráfku v průběhu výpočtu na jeho základu. NX Nastran je modulem softwaru Siemens NX a jako téměř jediný „velký“ výpočetní software je schopen pracovat s takzvaným živým modelem. To znamená, že pokud uživatel jednou vytvoří konečněprvkovou síť s přiřazenými příslušnými vlastnostmi a simulační úlohou a následně změní některé rozměry, či tvary modelu, tak se síť i úloha samy přepočítají a aplikují na pozměněnou geometrii modelu. U většiny dostupných výpočetních softwarů zpravidla znamená změna geometrie modelu vytvořit přinejmenším novou konečněprvkovou síť, což bývá u složitých simulací nejdelším procesem.

4.1 Metodika návrhu skladby

Zamýšlený potah konstrukce disku je tvořen tkaninou z uhlíkových vláken, respektive laminátem, tedy několika vrstvami tkaniny z uhlíkových vláken adhezně spojených do jednolité vrstvy. Uhlíková vlákna jsou anizotropní, přesněji ortotropní materiál. To znamená, že mají jiné mechanické vlastnosti ve směru vlákna a ve směrech kolmých na vlákno. U většiny tkanin tvořených takovými vlákny pak bývají ve směru osnovy i útku její vlastnosti téměř stejné. Nikoli však ve směrech ostatních v ploše

tkaniny a samozřejmě směr kolmý na plochu tkaniny je kolmým i na jednotlivá vlákna. Především z tohoto důvodu nelze při navrhování tenkostěnné konstrukce z anizotropního materiálu postupovat stejně jako při návrhu kovové (izotropní) tenkostěnné struktury.

Tkaninu, tedy výztuž kompozitní struktury, je třeba orientovat ve směru takzvaného největšího výkonu, tedy zpravidla ve směru vláken, proti hlavnímu zatížení konstrukce. Pak bude zajištěna maximální únosnost při minimální hmotnosti dílu. Ke zjištění směru, do kterého je nejvýhodnější tkaninu orientovat, se s výhodou využije analýza modelu s izotropním materiálem. Místo laminátové skladby se síti tenkostěnného modelu přiřadí materiál jako například slitina hliníku s podobnou tloušťkou jako je odhadovaná tloušťka budoucího laminátu. Následně se zkoumá průběh napětí ve skořepině, zejména směry hlavních napětí. Poté se síti přiřadí referenční laminátová skladba, zpravidla symetrická z vrstev ve směru hlavních napětí a ve směru vůči nim pootočeném o čtyřicet pět stupňů. Ta slouží jako výchozí stav. K této referenční skladbě se v kritických místech vrstvy přidávají, či naopak na předdimenzovaných místech odebírají nebo se stávající vrstvy pouze pootočí do vhodnějšího směru. Tímto postupem se lze několika dalšími iteracemi velmi přiblížit ideálnímu řešení laminátové skladby.

4.2 Zátěžné stavy ráfku

Monopost série Formula Student má vlastně jen čtyři zátěžné režimy. Prvním z nich je pouze statické zatížení, kdy auto stojí a je zatěžováno pouze vlastní tíhou. Tento stav je zdaleka nejméně náročný a nemá tedy cenu se jím zabývat. Ostatní režimy jsou dynamické a podstatně zajímavější. Prvním z nich je akcelerace. Nejnáročnější akcelerací je akcelerace s pevným startem, tedy z nulové rychlosti. Během tohoto úkonu je ráfek namáhán pouze krouticím momentem a v případě disků na zadní nápravě také násobkem tíhy vozu. O něco náročnějším stavem je opak akcelerace, tedy brzdění. Nejkritičtější případem je brzdění na mezi adheze pneumatik. Posledním a nejnáročnějším základním zátěžným stavem je průjezd zatáčky na mezi adheze pneumatik. Pokud jednotlivé režimy zatížení navíc spojíme do jednoho, dopočítáme se k nejnáročnějším podmínkám, kterým musí ráfek odolávat.

Jako vstupní namáhání do výpočtu ráfku je tedy zvolen průjezd zatáčkou na mezi adheze pneumatik se současnou akcelerací maximálním točivým momentem motoru a přenesením většiny hmotnosti vozu na jedno kolo jako při extrémním případě brždění během průjezdu zatáčkou. Z fyzikálního hlediska je tento stav sice nereálný, ale pro zajištění vyšší bezpečnosti výpočtu je to vhodná idealizace.

Potřebné údaje o voze	
Hmotnost vozu - m [Kg]	190
Max. boční přetížení - a_y [g]	2,5
Max. krouticí moment na kolo - M_k [Nm]	360

Tab. 2 – Základní hodnoty pro určení zatížení

Vzhledem k tomu, že se jedná o dynamické děje, je nutné uvažovat, že výsledné namáhání bude větší než při pouhé statické úvaze. Zde je výhodné vycházet ze zkušeností týmu a dynamický děj převést na statický, vynásobením statického namáhání takzvaným koeficientem dynamické přírážky, nebo pouze dynamickým koeficientem. Zde se uplatní právě léta zkušeností. Za prověřené dynamické koeficienty pro monopost kategorie Formula Student se v týmu eForce považují koeficienty v tabulce 3.

Koeficient ve směru osy x	1,3
Koeficient ve směru osy y	1,5
Koeficient ve směru osy z	1,5
Koeficient pro moment na kolo	1,3

Tab. 3 – Hodnoty součinitelů dynamické přírážky dle zvyklostí týmu eForce

Kromě zatížení od jízdních stavů je ráfek zatížen ještě silou od stálého utažení nábojové matice. Tímto problémem se, mimo jiných, ve své diplomové práci zabýval kolega Petr Sucháček. Závěrem byla požadovaná síla na ráfek od utažené matice taková, aby při průjezdu zatáčkou nedošlo k odlehnutí unašeče ráfku od dosedací plochy na náboji.

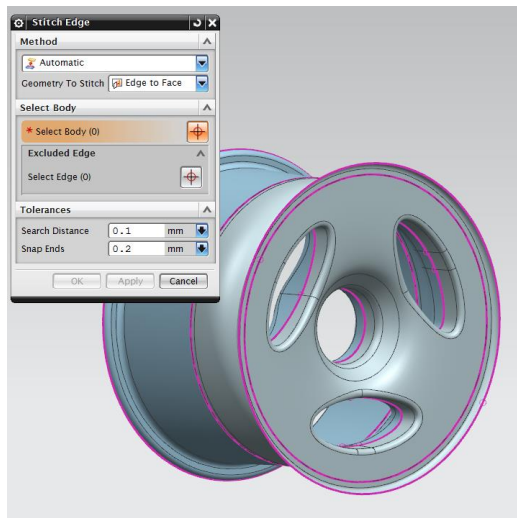
Vstupy zatížení pro výpočet	
Tíha vozu (v extrémním případě) [N]	2800
Krouticí moment [Nm]	470
Odstředivá síla od průjezdu zatáčkou [N]	7000
Síla od utážení matice [N]	120 000

Tab. 4 – Zátěžný stav ve výpočetním modelu

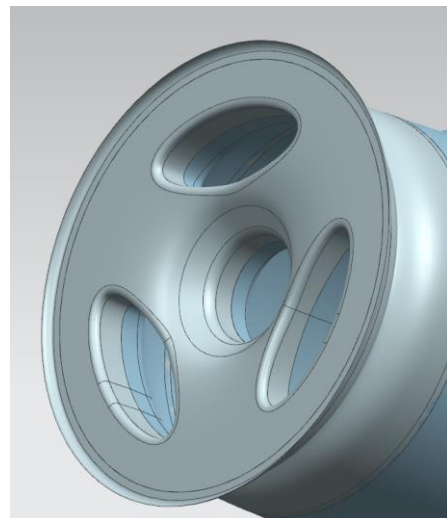
4.3 Příprava modelu

Přesto, že prvky geometrie modelu jsou tvořeny stejnými základními křivkami, může se vlivem systému tolerančního tvoření ploch na základě aproximace tvořících bodů a křivek plochou stát, že hraniční křivky sousedících ploch nemusejí být totožné. S tímto problémem se v síťovacím modulu programu NX Nastran vypořádá k tomu určená funkce. Ta na základě zadané tolerance blízkosti hraničních křivek sjednotí křivky, které jsou v podstatě duplicitní.

Než se začne se samotným síťováním modelu, je vhodné geometrii tvořenou mnoha navazujícími plochami zjednodušit. Tedy vlastně vhodným způsobem spojit sousedící plochy v jednu. Spojením vedlejších ploch odstraníme dělicí hranu a tím odebereme nutnou podmínku sítě. Standardně se totiž síť tvoří tak, že se vytvoří uzlové body na hranách. Odstraněním nepotřebných hran umožníme síťovacímu algoritmu vytvořit homogennější a tím i kvalitnější síť. V zásadě je nutné zachovat hraniční křivky původních ploch pouze na přechodu ploch, jež chceme „vysítovat“ odděleně nebo tam, kde by mohl mít síťovací nástroj problém se složitou geometrií plochy a křivka tak vlastně tvoří pomocnou vodící křivku sítě.



Obr. 24 – Sjednocení duplicitních křivek



Obr. 25 – Spojení sousedících ploch (porovnání upravené kapsy nahoře a neupravené dole)

Další problém zadání zatížení do výpočetního modelu je ten, že zatížení je v reálné situaci na ráfek aplikováno skrze pneumatiku. Vzhledem k mechanickým vlastnostem pneumatiky není možné v běžném implicitním řešiči simulovat její chování během zatěžování. Proto je z výpočtu pneumatika vyřazena. Oproti realitě bude ráfek vetknutý skrze jeho patku, tedy okraj límce, a zatížení bude zavedeno skrze virtuální díl, nahrazující náboj kola. Virtuální díl umožňuje do simulace zanechat základní geometrii dalších součástí, avšak nenavštuje výpočetní čas kontaktními vazbami. Virtuální díl spojuje místa uchycení ráfku, tedy jeho unašeč a sedlo centrální matice, s bodem vytvořeným v geometrickém středu kola.

4.4 Konečněprvková síť

Po přípravě modelu je možné vytvořit konečněprvkovou síť. Vytvoření funkční a hlavně kvalitní sítě vůbec není lehkým úkolem. Především je třeba vhodně zvolit typ a velikost elementů.

Nejpřesnějším typem elementu pro plošnou aplikaci je takzvaný QUAD8. Jedná se o plošný element tvaru obdélníku, nejlépe čtverce, s tvarovou funkcí jako polynom druhého řádu. Není však možné čtvercové elementy aplikovat na celou geometrii ráfku, zejména v případě dvakrát zakřivených ploch. V takovýchto případech lze

síťovacímu algoritmu povolit, na vhodných místech, čtvercové elementy nahradit trojúhelníkovými. Trojúhelníkový element, v ideálním případě má tvar rovnostranného trojúhelníku, má srovnatelnou přesnost jako čtvercový. Pro vyplnění plochy trojúhelníkovými elementy je však těchto prvků, a tedy i uzlových bodů, potřeba mnohem více než v případě čtvercových elementů, což má značný vliv na výpočetní čas. Síť z trojúhelníkových prvků je však mnohem flexibilnější než síť čtvercová. S výhodou se tedy oba typy elementů kombinují. Algoritmus tvorby sítě primárně užívá prvky čtvercové, a pokud vyhodnotí, že by měly tyto elementy v určité oblasti dílu nevyhovující kvalitu, vhodně je nahradí trojúhelníkovými.

Velikost elementů zásadním způsobem ovlivňuje výpočetní čas a nároky na hardware. Proto je snaha nepoužívat elementy menší, než je pro požadavky simulace nutné. Není však jednoznačná metoda, jak určit vhodnou velikost elementu. Obecně se v místech, kde se očekává velký gradient napětí a deformací, volí elementy podstatně menší než na místech s malými změnami. Na první pohled však nemusí být vždy jasné, kde se takovéto oblasti na zkoumaném díle nachází. Proto se pro první výpočty velikost elementů obvykle volí především podle velikosti zkoumané součásti. V tomto případě byl zvolen element velikosti čtyři milimetry.

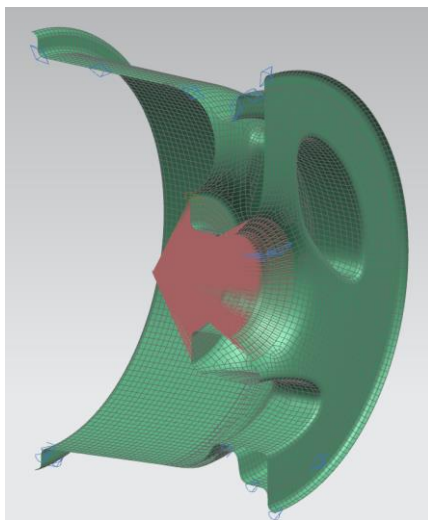
Během síťování povrchu je nutné si uvědomit, že bude třeba každé síti přiřadit orientaci materiálu a proto je nutné dát pozor, která plochy se síťují jako jedna síť. Například u dvou na sebe kolmých ploch by mohl nastat problém s definováním orientace. Proto je nutné si celkovou síť rozdělit na menší celky, kterým bude přiřazena orientace samostatně.

V systému NX Nastran je také nutné síťovat separátně oblasti s různou skladbou laminátu. Síť se totiž zařazuje do takzvaných kolektorů, tedy skupin nadřazených jednotlivým sítím. Skladby laminátu a vlastně veškeré materiálové a průřezové charakteristiky se pak přiřazují až těmto kolektorům.

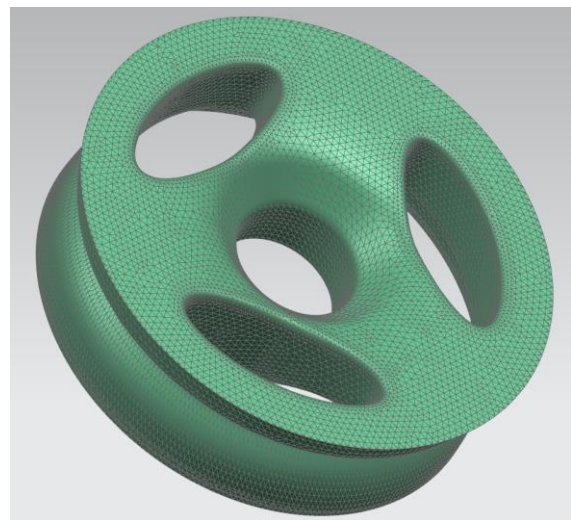
Pěnové jádro ráfku je objemové těleso a je tedy vyplněno objemovou sítí. Objemové sítě jsou, až na opravdu speciální výjimky, tvořeny takzvanými TETRA elementy. To jsou prostorové čtyřúhelníky složené ze čtyř trojúhelníků. Stejně jako u plošných elementů mohou být tvarové funkce, propojující uzlové body elementu,

polynomy lineární nebo kvadratické. Pro první výpočty byly, vzhledem k výpočetní kapacitě dostupného hardwaru zvoleny elementy TETRA4, tedy elementy s lineárními tvarovými funkcemi, které jsou podstatně méně náročné na výpočetní čas.

Virtuální díl náboje kola je vlastně spojení unašeče a sedla centrální matice ráfku s bodem v jeho geometrickém středu. Tento bod je vhodný, protože se do něj snadno přepočítají zatěžující síly. Samotný virtuální díl je tvořen speciálními jednorozměrnými prvky. Tyto elementy se nazývají RBE3 a fungují tak, že zatížení z kolektoru, v tomto případě bod geometrického středu ráfku, rozdistribuuje, respektive transformuje do příslušných uzlových bodů, aniž by jakkoli omezily jejich posuvy a rotace.



Obr. 26 – Řez plošnou 3D sítí a virtuálním nábojem



Obr. 27 – Prostorová síť jádra z tetragonálních elementů

4.5 Simulační úloha

Systém NX Nastran nabízí celou řadu algoritmů řešiče. Od statické lineární úlohy, přes geometrické nelinearity a modální analýzy, až po explicitní výpočetní algoritmus, vhodný například pro simulace crashů. Pro požadavky výpočtu této konkrétní úlohy, vzhledem k dostupným datům o materiálu a zatížení, tedy i způsobu zadání zatěžování a očekávaným deformacím, je vhodné využít algoritmus pro statické lineární úlohy, interně označen jako SOL 101.

S přihlédnutím k dynamickému charakteru reálného zatěžování ráfku se dá uvažovat také o explicitním řešení, k tomuto však v současné době nejsou dostupná data o materiálu a ani o zatěžování. Vzhledem k zásadním požadavkům na tuhost dílu jsou očekávány pouze malé deformace a v této oblasti je implicitní řešení dostatečně přesné a navíc jednodušší.

S vytvořenou a celistvou konečněprvkovou sítí lze nyní vytvořit simulační úlohu zvoleného typu. Tedy do výpočetního modelu zadat uložení, zatížení, kontaktní vazby, či další okrajové podmínky výpočtu, jako například zrychlení, přidanou hmotu, omezení či naopak vynucení deformace, případně tepelné zatížení.

4.5.1 Materiálové modely

První výpočty budou využity k ověření funkčnosti simulace a následné analýze toku napětí v součásti. Za tímto účelem bude využit model izotropního materiálu. Ten je vhodný především pro jednoduchost a tedy i relativní rychlost výpočtu. To je vhodné zejména ve fázi zprovoznování výpočetního modelu během doladování konečněprvkové sítě, ale i následně pro analýzu toku napětí v součásti, neb izotropní materiál dovolí napětí téct v něm libovolnou respektive energeticky nejefektivnější cestou. Výsledek tak poskytne základ pro návrh orientace vrstev ve skladbě laminátu.

Konkrétním materiálem využitým pro tyto účely bude slitina hliníku s označením 6061 z materiálové knihovny softwaru. Tento je vhodný především proto, že hodnota jeho modulu pružnosti je velmi blízká hodnotě modulu pružnosti ve směru vláken kompozitu tvořeného běžnou tkaninou z vysokopevnostních uhlíkových vláken a epoxidové pryskyřice, tedy materiálu, ze kterého bude výsledný díl vyroben. V lineární oblasti (jiná se ve výpočtu ani neuvažuje) se tedy struktura z hliníku bude chovat podobě jako struktura z uhlíkového kompozitu s vhodnou orientací lamin.

Materiál, ze kterého bude tvořen reálný ráfek, je kompozit. Potah disku bude laminátem z uhlíkových vláken a výplň jeho objemové části bude vysoce kvalitní pěna určena přímo k tomuto účelu.

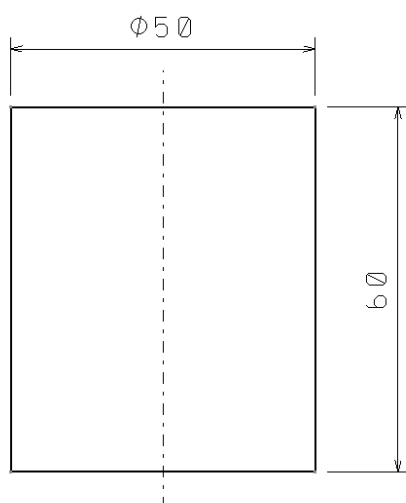
Laminát, obecně, je většinou tenkostěnná struktura tvořena několika vrstvami výztuže navzájem adhezně propojených maticí. V tomto případě je laminát tvořen

takzvanou prepregovou tkaninou z uhlíkových vláken s vyrovnaným tkaním a keprovou vazbou. O vazbě tkaniny bude blíže pojednáno až v kapitole věnující se výrobě. Zbylé, výše zmíněné, vlastnosti jsou důležité již nyní. Vyrovnaná vazba znamená, že útek i osnova tkaniny je tvořena ze shodných pramenů vláken. Tedy, že mechanické vlastnosti v obou hlavních směrech tkaniny jsou prakticky shodné. Prepregová technologie znamená, že tkanina je prosycena matricí předem (v přesném poměru matrice vůči vláknům) a matrice vytvrzuje až za zvýšené teploty. Tato technologie je vhodná nejen z důvodu výroby, o tom později, ale především proto, že díky ní lze opakovat mechanické vlastnosti laminátu a tím i zajistit relativně důvěryhodné výsledky výpočtů. Samotný materiálový model pro MKP analýzu je ortotropní, to znamená, že uvažuje různé mechanické vlastnosti pro všechny tři hlavní směry materiálu. Konkrétní hodnoty modulů pružnosti, poissonových konstant a jednotlivých dovolených napětích pocházejí z práce kolegy Jaromíra Kučery z Ústavu letadlové techniky Fakulty strojní ČVUT v Praze, realizované pro partnerskou společnost našeho týmu, LA Composites. Výsledky těchto experimentů jsou interní data společnosti, a proto nemohou být v této práci publikovány.

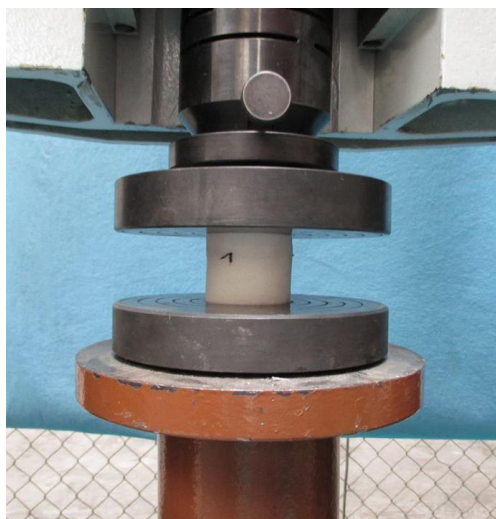
Model pěny použité jako jádro součásti je stejný jako model hliníkové slitiny použitý u prvotních výpočtů. Tedy izotropní materiál. Vzhledem k vlastnostem pěny je však vhodnější nahradit definici mechanických vlastností pomocí modulu pružnosti v tahu a poissonovy konstanty, určením pomocí modulů pružnosti v tlaku a smyku. Konkrétně bude použita pěna s označením Rohacell IG-F 71 od výrobce Evonik Industries AG. Označení pěny v sobě skrývá mnoho, v tuto chvíli je důležité pouze číslo sedmdesát jedna, označující hustotu pěny. Pěny Rohacell IG-F se vyrábí v hustotách od třiceti až po sto deset kilogramů na metr krychlový. Přes rozdílnou hustotu jsou všechny ze stejného materiálu, polymethacrylimid (PMI). Rozdíl v hustotě je tvořen rozdílným množstvím a velikostí vzduchových kapes v kontrolním objemu pěny. Každá šarže hustoty má jiné mechanické vlastnosti. Na základě předchozích zkušeností byla tedy jako výchozí pěna pro výpočet zvolena ta s hustotou sedmdesát pět kilogramů na metr krychlový.

U konstrukčních pěn často nebývají stejné mechanické vlastnosti v tahu a tlaku. Výrobce v datasheetu bohužel uvádí moduly pružnosti pouze v tahu a smyku. S přihlédnutím na charakter zatěžování ráfku je však potřebný modul pružnosti v tlaku.

Proto musela být provedena zkouška materiálu tlakem. Díky této zkoušce byl zjištěn nejen modul pružnosti v tlaku, ale také dovolené napětí v tlaku. Zkouška byla provedena na čtveřici vzorků, jejichž parametry jsou znázorněny na obrázku 28 a zaznamenány v tabulce 4.



Obr. 28 – Zkušební vzorek



Obr. 29 – Zkouška tlakem

Č. vzorku	Vz. 1	Vz. 2	Vz. 3	Vz. 4
Průměr [mm]	49,7	50	49,9	49
Výška h_0 [mm]	59,7	59,8	60	59,9

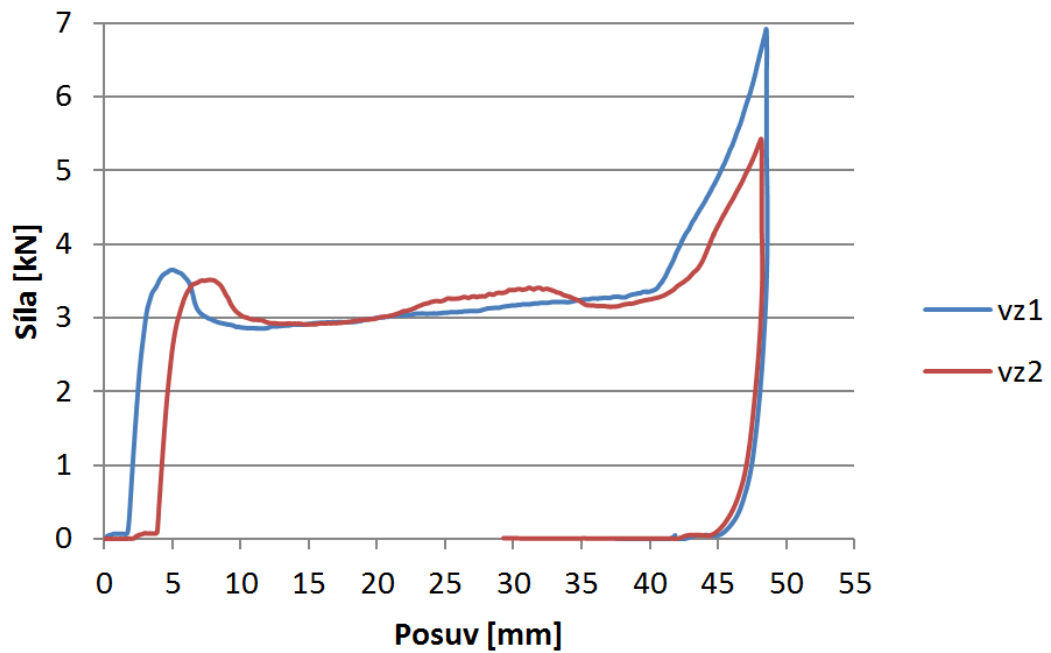
Tab. 4 – Rozměry zkušebních vzorků

Měření probíhalo na mechanickém trhacím stroji FPZ/100, v laboratořích oboru pružnosti a pevnosti FS ČVUT. Odečet síly byl realizován digitálním siloměrem s rozsahem 10 kN synchronizovaným s kalibrovaným snímačem posuvu každou desetinu vteřiny. Data zaznamenával příslušný software v PC.

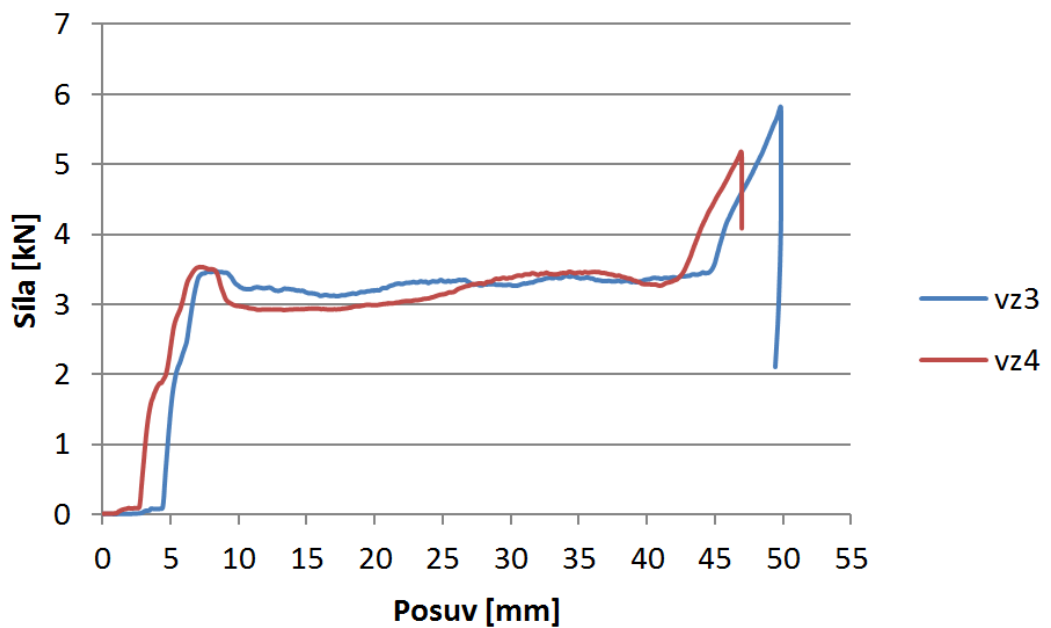
Moduly pružnosti vzorků jsou určeny z lineárních oblastí deformace. Dovolená napětí vzorků jsou stanovena jako meze kluzu pěny. Výsledky zkoušek jsou zaznamenány v tabulce 5 a průběhy zkoušek jsou znázorněny na grafech 1 a 2.

Vzorek	Vz_1	Vz_2	Vz_3	Vz_4	Minimum	Maximum	Průměr
Modul pruž. [N/mm ²]	74,36	74,77	74,83	66,32	74,36	74,83	74,65
Mez kluzu [N/mm ²]	1,88	1,79	1,775	1,87	1,775	1,88	1,83

Tab. 5 – Výsledky zkoušky tlakem pěny Rohacell IG-F 71



Graf 1 – Průběh zkoušky tlakem vzorků 1 a 2



Graf 2 – Průběh zkoušky tlakem vzorků 3 a 4

ROHACELL® IG/IG-F Properties						
Property	Standard	Unit	ROHACELL® 31 IG/IG-F	ROHACELL® 51 IG/IG-F	ROHACELL® 71 IG/IG-F	ROHACELL® 110 IG/IG-F
Density	ISO 845	kg/m ³	32	52	75	110
	ASTM D 1622	lbs/ft ³	2.00	3.25	4.68	6.87
Compressive Strength	ISO 844	MPa	0.4	0.9	1.5	3.0
	ASTM D 1621	psi	58	130	217	435
Tensile Strength	ISO 527-2	MPa	1.0	1.9	2.8	3.5
	ASTM D 638	psi	145	275	406	507
Shear Strength	DIN 53294	MPa	0.4	0.8	1.3	2.4
	ASTM C 273	psi	58	116	188	348
Elastic Modulus	ISO 527-2	MPa	36	70	92	160
	ASTM D 638	psi	5,220	10,150	13,340	23,200
Shear Modulus	DIN 53294	MPa	13	19	29	50
	ASTM C 273	psi	1,885	2,755	4,205	7,250

Technical data of our products are typical values for the nominal density.

Obr. 30 – Mechanické vlastnosti pěny dle výrobce [6]

Z porovnání výsledků experimentu s daty dostupnými od výrobce pěny je zřetelně vidět, že vlastnosti pěny v kompresi se výrazně liší od vlastností pěny v tahu. Modul pružnosti v tlaku je oproti tomu v tahu nižší přibližně o dvacet procent. Naopak v oblasti dovoleného napětí je nyní známo, že po dosažení hodnoty dané výrobcem je zde stále rezerva než dojde ke skutečnému nevratnému poškození materiálu. Lze tedy dost dobře očekávat, že také udávaná hodnota dovoleného napětí ve smyku bude na straně bezpečnosti a je důvěryhodná. Průběh zkoušek také ukazuje, že se především vzorek Vz_4 nechová dle očekávání a to v oblasti lineární deformace. Lze tedy předpokládat, že šlo buď o chybu měření, nebo o poškozený vzorek. Pro účel stanovení modulu pružnosti v tlaku tedy nebudou jeho data využita. Z hlediska maximálního dovoleného napětí se však data, na základě porovnání s ostatními vzorky, zdají být validní. Také v případě modulu pružnosti ve smyku bude, vzhledem k momentální nemožnosti tohoto měření, brána hodnota udávaná výrobcem.

Materiál	E_modulus	σ_dovolená	G_modulus	τ_dovolený	Hustota
Rohacell IG-F 71	74,65 MPa	1,77 MPa	29 MPa	1,3 MPa	75 kg/m ³

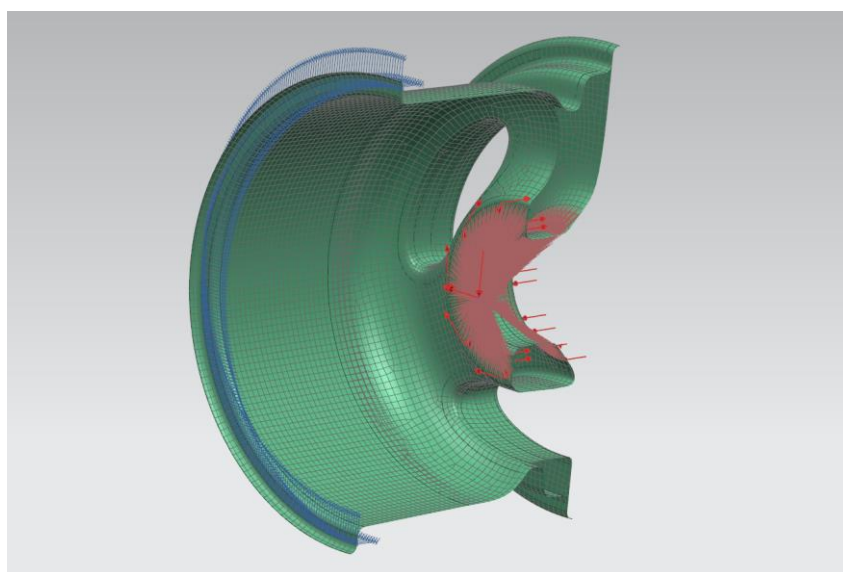
Tab. 6 – Materiálové charakteristiky pěny Rohacell IG-F 71 použité v simulaci

4.5.2 Zadání zatěžování

Jak již bylo zmíněno výše, pro zjednodušení a urychlení výpočtu je vhodné se vyhnout použití kontaktních vazeb a namísto reálných součástí vhodně zadat okrajové podmínky a s výhodou využít jejich nahrazení takzvanými virtuálními díly.

Právě pro zjednodušení byl navržen způsob zatěžování, který je reverzní vůči reálné jízdě. Zatímco v reálném provozu je ráfek pevně uchycen k náboji vozu a zatěžován skrze pneumatiku, tak pro tento výpočet je uložen na patce límce, tedy v místě nejkritičtějšího zatěžování skrze pneumatiku, a zatížen pomocí virtuálního náboje. Za tímto účelem bylo nutné transformovat zatěžující síly z místa, kde působí normálně, tedy z místa kontaktu pneumatiky s vozovkou, do kolektoru virtuálního náboje, tedy do geometrického centra disku. V podstatě to znamená pouze přesunout síly z původního působiště do kolektoru a přidat klopný moment od odstředivé síly během průjezdu zatáčkou, který vzniká součinem odstředivé respektive dostředivé síly a vzdálenosti jejího působiště, kontaktu pneumatiky s vozovkou, od osy rotace kola, tedy dynamického poloměru pneumatiky.

Uložení ráfku je realizováno omezením pohybu vnější hrany vnitřní patky límce. Jelikož v reálném případě není patka pevně vetknuta k pneumatice, není tomu tak ani v simulační úloze. Uzlovým bodům na patce límce je zakázán pouze translační pohyb ve všech třech osách, ale jsou jim ponechány stupně volnosti umožňující jim kolem těchto os rotovat.



Obr. 31 – Zadání okrajových podmínek úlohy (v řezu)

4.5.3 Kontaktní vazba

Při výpočtech standardních laminátových struktur obvykle není problém s uvažováním jádrových materiálů ve skladbě. Takzvané sandwichové konstrukce však zpravidla mívají jádro v podobě desky o konstantní, či relativně diskrétně proměnné tloušťce. Takováto konstrukce se pak ve výpočtu řeší pouze přidáním další vrstvy do skladby laminátu s patřičnými mechanickými vlastnostmi a požadovanou tloušťkou.

Protože však ráfek bude, jak již bylo mnohokrát zmíněno, tvořen jako laminát kolem objemového jádra poměrně složitého tvaru, bohužel se finální fáze výpočtů neobejde bez kontaktních vazeb. Vazbu je nutné vytvořit mezi plošnou sítí potahu a objemovou sítí jádra.

V zásadě se nejčastěji používají dva typy kontaktních vazeb. První typ, v systému NX Nastran označený jako „Surface-to-Surface Gluing“, napevno spojí dvě sítě respektive jejich uzlové body tak, že nedovolí jejich vzájemný pohyb. Druhý typ vazby, označený jako „Surface-to-Surface Contact“, je o poznání složitější. Ten totiž uvažuje kontakt ve smyslu, že tělesa sebou nemohou prostoupit, ale mohou se po sobě posunovat. Tento kontakt vyžaduje především obrovské množství iterací a přepočtů geometrie a je tak enormně náročný na výpočetní čas.

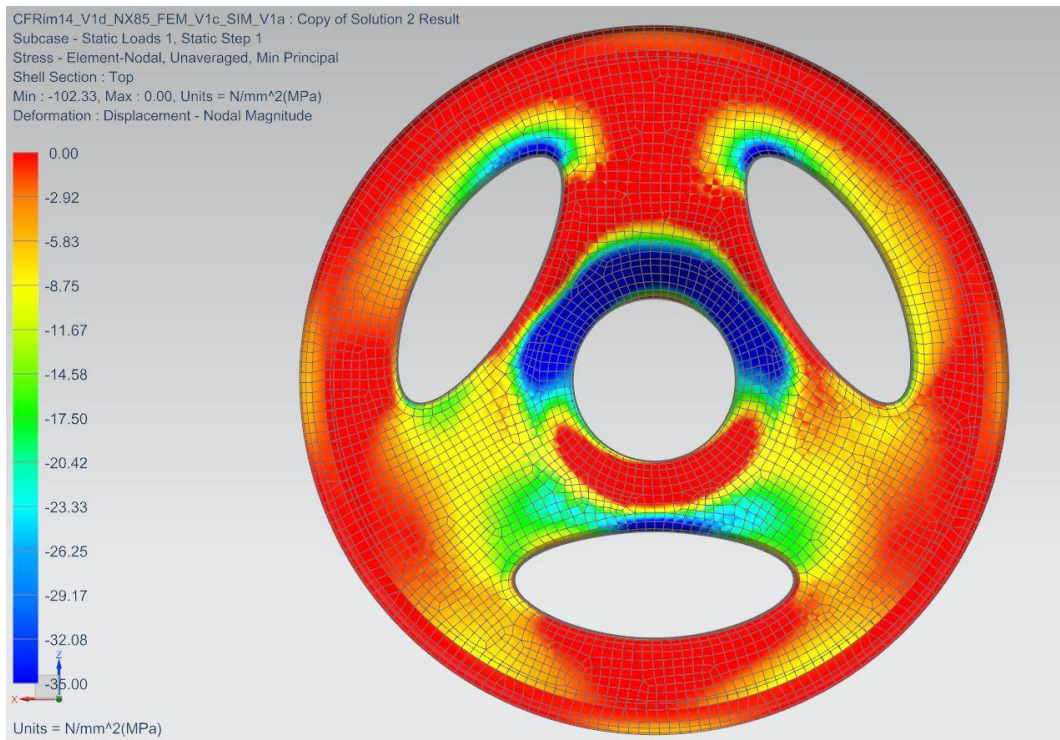
V případě úlohy ráfku se, už z podstaty konstrukce dílu, jedná o ten jednodušší případ, tedy kontaktní vazbu, kde dojde k pevnému propojení sítí. I tak je tento kontakt náročný na výpočetní čas a proto je vhodné k výpočtům, které jej zohledňují, přistoupit až bude existovat reálnější představa o možné finální skladbě laminátu.

4.6 Analýza

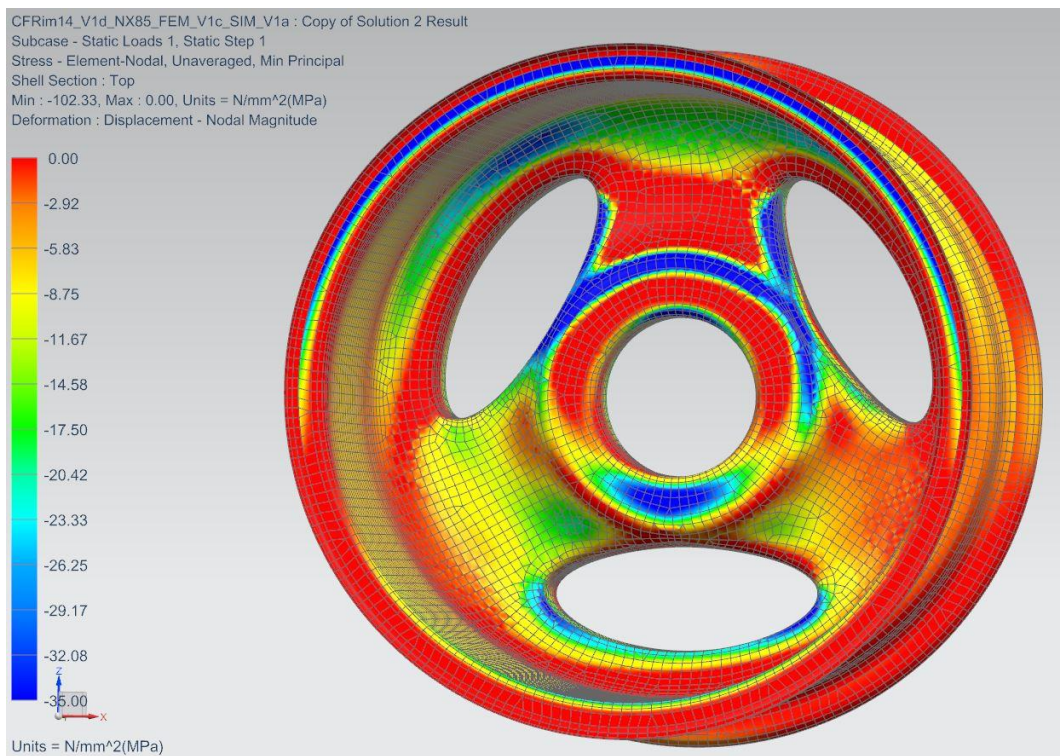
4.6.1 Izotropní potah

Během prvních výpočtů byl využit materiálový model hliníku. Byl aplikován pouze na sítí potahu. Hliníkovému potahu byla přiřazena tloušťka tři milimetry. Tento postup je vhodný z důvodu, že model s tímto materiálem je o poznání méně náročný na výpočetní čas než model s laminátovým potahem a konkrétní číselné výsledky nejsou to, co je u prvních výpočtů důležité. Na modelu s izotropním potahem bylo tedy provedeno několik zkušebních výpočtů, během nichž byly odhaleny a opraveny nedostatky konečněprvkové sítě. Následně se na výsledcích, již funkčního izotropního

modelu, sledují průběhy napětí za účelem stanovení vhodných směrů orientace vláken laminátové skladby.



Obr. 32 – Průběh hlavního napětí na vnější straně ráfku



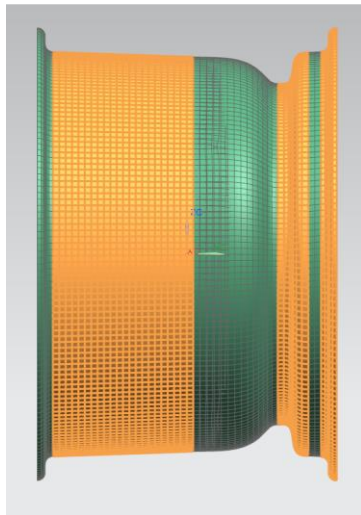
Obr. 32 – Průběh hlavního napětí na vnitřní straně ráfku

Na průběhu napětí v potahu ráfku je vidět, že se napětí, dle očekávání, šíří skrze vnitřní a vnější strany paprsků a v kapsách, které je spojují, tím pádem vzniká přechodové smykové napětí. Na základě tohoto faktu je tedy vhodné volit na vnitřní a vnější straně paprsků směr vláken ve směru těchto paprsků. Na obrázku orientovaná v úhlech nula, sto dvacet a dvě stě čtyřicet stupňů. V kapsách je vhodné volit orientaci vláken v úhlu čtyřicet pět stupňů vůči ose rotace kola. Na límci bude kombinace vrstev v orientaci nula a čtyřicet pět stupňů. Nulová orientace pro tuhost v ohybu a orientace vláken pod čtyřiceti pěti stupni pro zachycení namáhání v krutu.

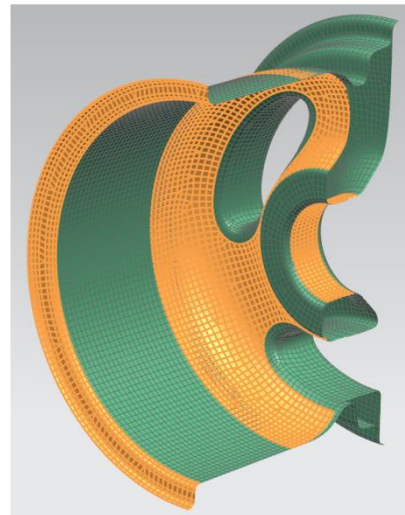
Dále je zde vidět značná koncentrace napětí na ostřejších přechodech, respektive hranách. Tento jev je také očekávaný. Vzhledem k očekávané technologii výroby, však lze konstatovat, že není nutné tento jev nadále potlačovat, protože v těchto místech budou na reálném ráfku překlady jednotlivých vrstev tak, jak se budou při výrobě jednotlivé nástřihy navzájem spojovat. Oproti výpočtu v těchto místech ve skutečnosti bude až dvojnásobný počet vrstev, než je uvažován ve výpočtu. Ačkoli se zde tedy bude koncentrovat napětí i v reálném dílu, špičky jeho hodnot budou výrazně menší než při výpočtu. Kromě toho je nutné také učinit určitý kompromis mezi náročností výroby a optimálním tvarem z hlediska namáhání. Vzhledem k výše zmíněným faktům tedy bylo rozhodnuto místa s vyšší koncentrací napětí geometricky dále neupravovat.

4.6.2 Kompozitní potah

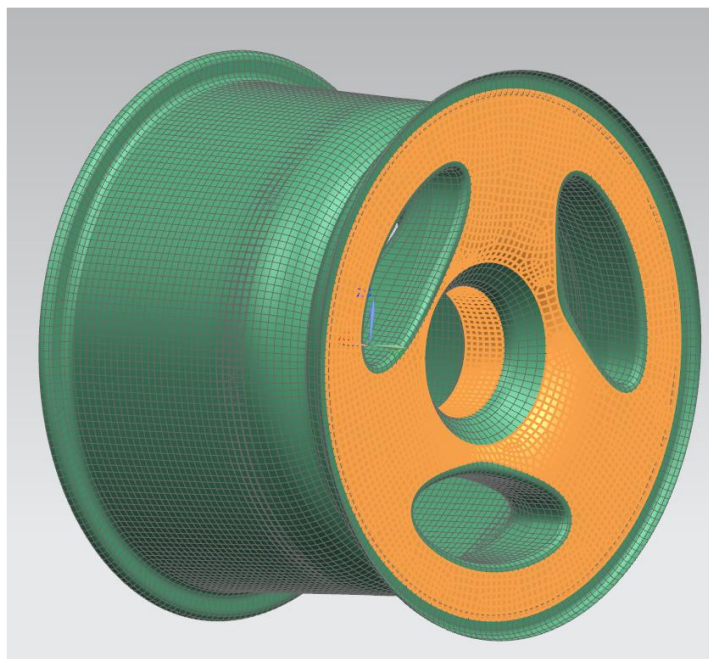
Po ověření funkčnosti simulace s izotropním potahem je možno přistoupit k fázi návrhu první skladby laminátu. Celý potah ráfku je rozdělen do sekcí, kterým je přiřazena jejich skladba. Na základě předchozích zjištění byla stanovena referenční skladba.



Obr. 33 – Rozdělení potahu do sekcí



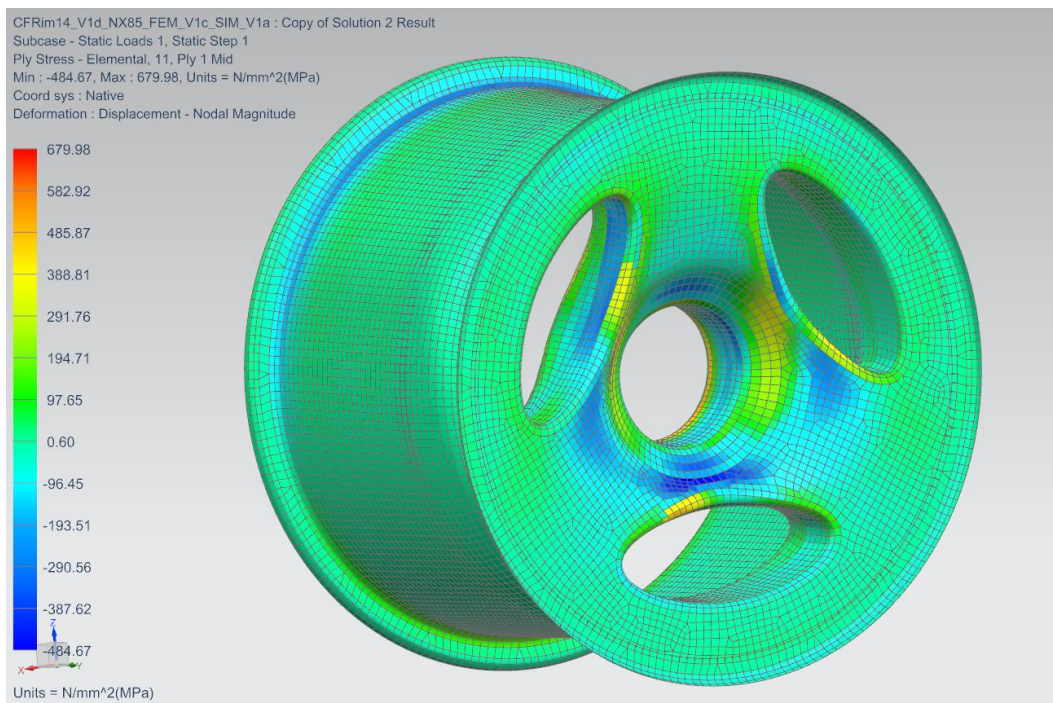
Obr. 34 – Rozdělení potahu do sekcí



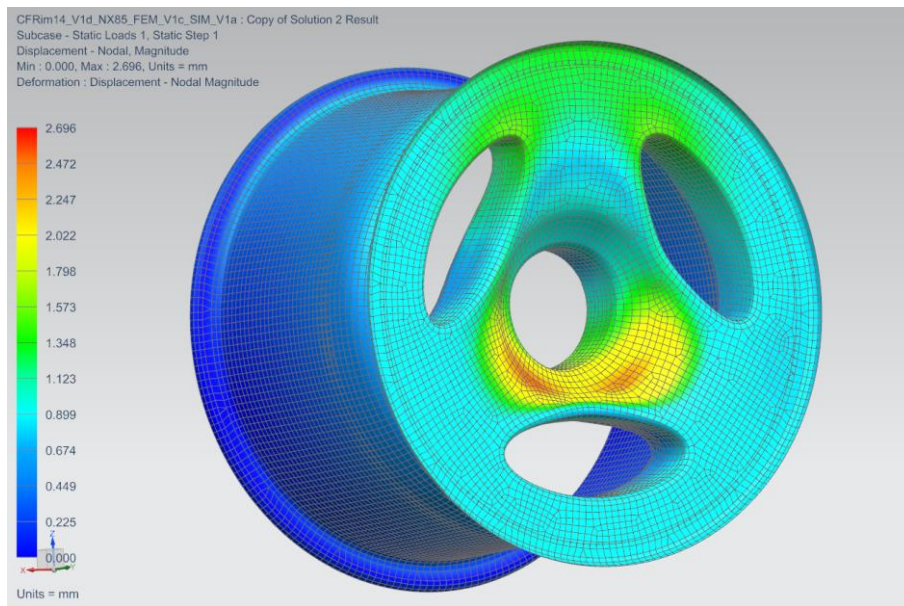
Obr. 35 – Rozdělení potahu do sekcí

Oblast	Počet vrstev	Orientace vrstev [°]	Tloušťka laminátu [mm]
Patka vnější	8	[0,0,+45,-45] ^s	1,6
Límec 1	8	[0,0,+45,-45] ^s	1,6
Límec 2	8	[0,0,+45,-45] ^s	1,6
Límec 3	8	[0,0,+45,-45] ^s	1,6
Límec 4	8	[0,0,+45,-45] ^s	1,6
Patka vnitřní	8	[0,0,+45,-45] ^s	1,6
Paprsky Out	6	[0,120,240,45,165,285]	1,2
Centrlock	12	[0,120,240,45,165,285] ^s	2,4
Unašeč	24	2x[0,120,240,45,165,285] ^s	4,8
Kapsy	6	[+45,-45,0] ^s	1,2
Paprsky In	6	[0,120,240,45,165,285]	1,2
Střed	16	[0,0,0,0,+45,-45,0,0] ^s	3,2

Tab. 7 – Referenční skladba potahu



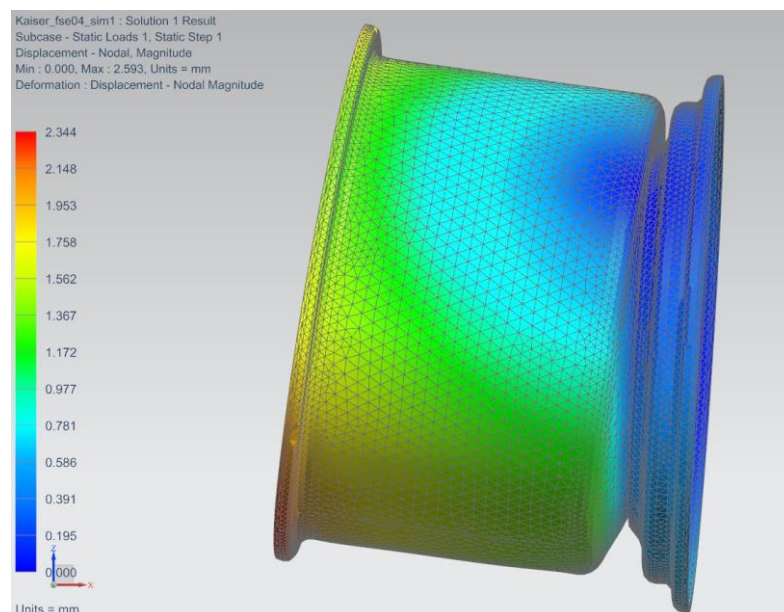
Obr. 36 – Průběh napětí ve směru vláken (směr 11) v nejlépe namáhané vrstvě laminátu



Obr. 37 – Deformace dílu

4.6.3 Hliníkový ráfek

Z materiálových charakteristik a provozních požadavků je známo, jaké jsou hodnoty dovolených namáhání materiálu. U ráfku je však důležitá především jeho tuhost. Jako referenční hodnota pro požadavek tuhosti bude využita tuhost původního ráfku z hliníkové slitiny. Za tímto účelem byla provedena MKP analýza tohoto ráfku se stejnými okrajovými podmínkami, jako jsou užity v simulaci ráfku kompozitního. Simulace vychází z modelu ráfku poskytnutým výrobcem.



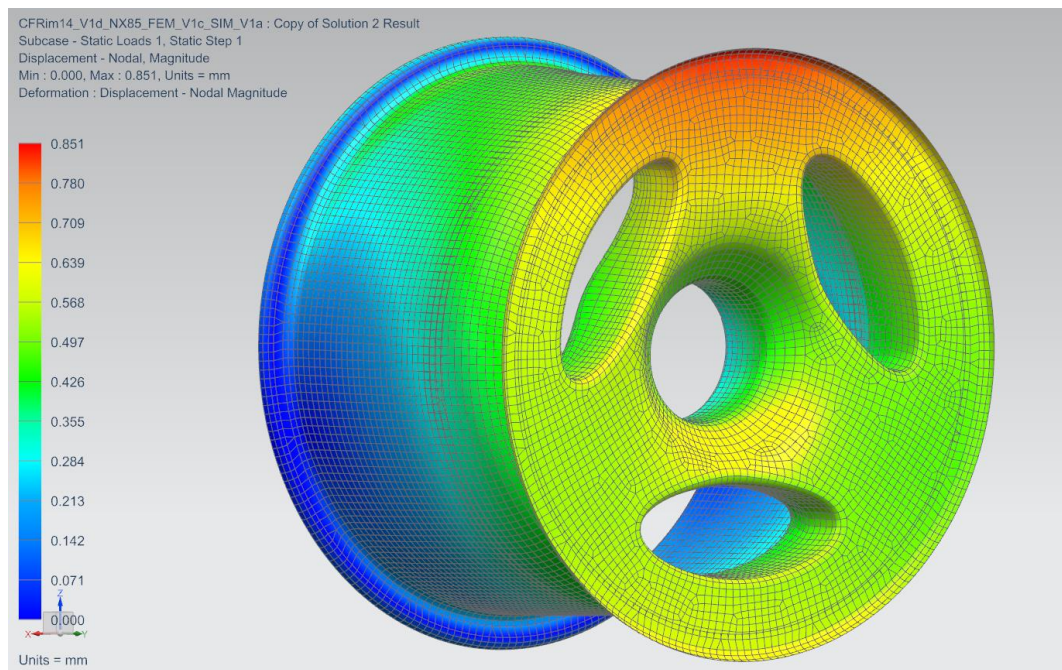
Obr. 38 – Deformace ráfku ze slitiny hliníku

Z výsledků plyne, že maximální deformace původního ráfku je 2,344 milimetru. Lze tedy říci, že pokud bude tuhost kompozitního ráfku pod touto hodnotou, pak se jedná o maximální úsporu hmotnosti při zachování původních mechanických vlastností.

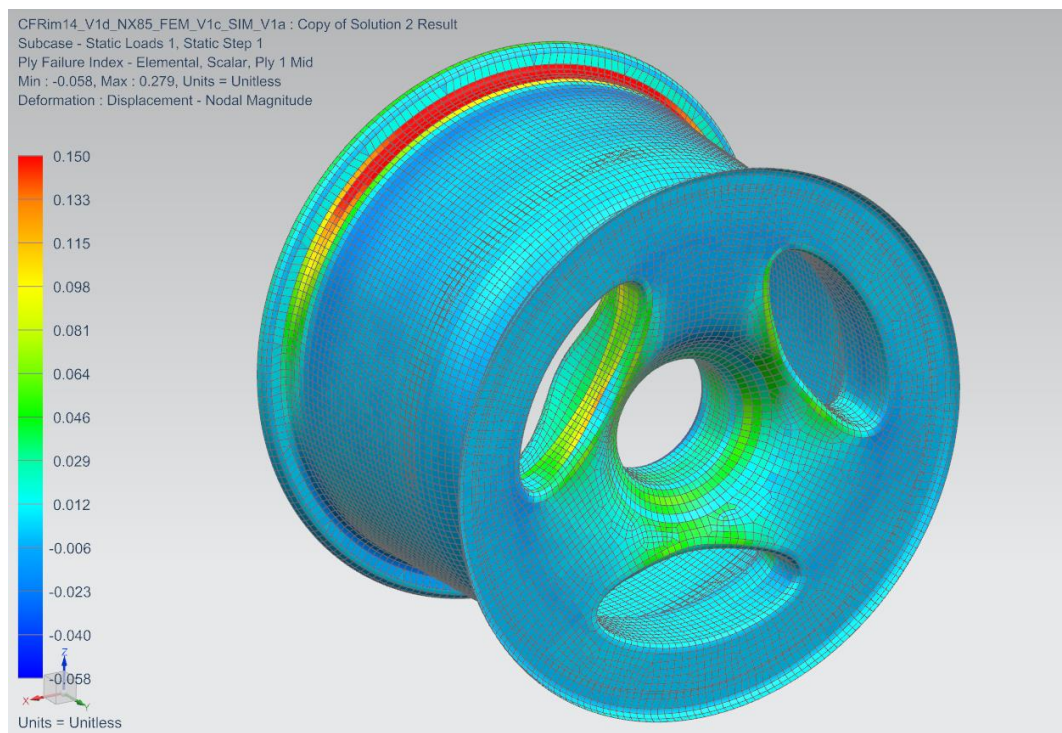
4.6.4 Kompozitní potah s objemovým jádrem

V poslední fázi návrhu laminátové skladby bylo přikročeno k výpočtům s objemovým jádrem. V těchto výpočtech byl kladen důraz především na výsledné hodnoty maximální deformace dílu, hodnoty napětí v hlavních směrech (směry vláken) materiálu a na hodnoty kritéria porušení a delaminace materiálu. Na základě materiálových dat je v MKP analýze, mimo jiné, vyhodnocováno selhání materiálu. U laminátů se s výhodou využívá složitějších, ale také přesnějších teorií o porušení, než je nejrozšířenější teorie podle Von Misesa. Ta není pro anizotropní materiály vhodná. Použitá teorie porušení je teorie Hoffmannova. Ta zohledňuje různá dovolená napětí v tahu, tlaku a smyku pro každý hlavní směr materiálu. Delaminace se vyhodnocuje z hodnot interlaminárního smykového napětí, tedy smykového napětí mezi jednotlivými vrstvami laminátu. Výpočet využívá klasické laminační teorie. Nemá tedy problém toto napětí dopočítat. Dovolené interlaminární smykové napětí bylo stanoveno experimentem a je součástí dat dostupných od společnosti LA Composites. Výsledkem výpočtu kritéria porušení, jak Hoffmannovo tak delaminace, je bezrozměrná skalární hodnota. Tato kritéria uvádí, že pokud je jejich hodnota rovna jedné, došlo k porušení materiálu. Lze tedy například odvodit, že pokud je hodnota kritéria 0,5, bezpečnost konstrukce je rovna dvěma.

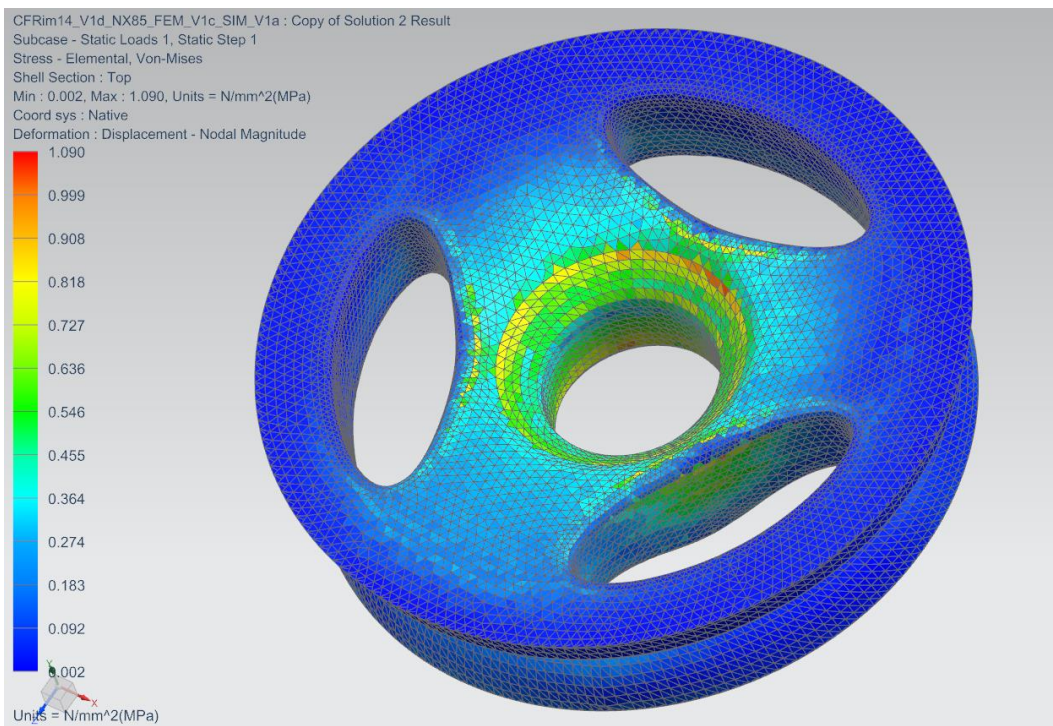
Proběhlo několik iteračních výpočtů, než byla stanovena výsledná skladba laminátu. Během výpočtů bylo zásadní vyřešit zejména problém s maximálním napětím v pěnovém jádru a porušením materiálu delaminací v oblasti přechodu středu a unašeče. Napětí v jádře bylo sníženo pod dovolenou hodnotu přidáním vrstev na paprscích, středu a sedlu centrální matice. Tyto oblasti bylo třeba vyztužit také z důvodů tuhosti a pevnosti. Také problém delaminace na rozhraní středu a unašeče byl vyřešen přidáním vrstev. V tomto místě lze navíc uvažovat zesílení konstrukce vlivem překladů vrstev během výroby. Výsledek v tomto místě tedy není zcela relevantní a v reálném díle lze očekávat nižší napětí než ve výpočetním modelu.



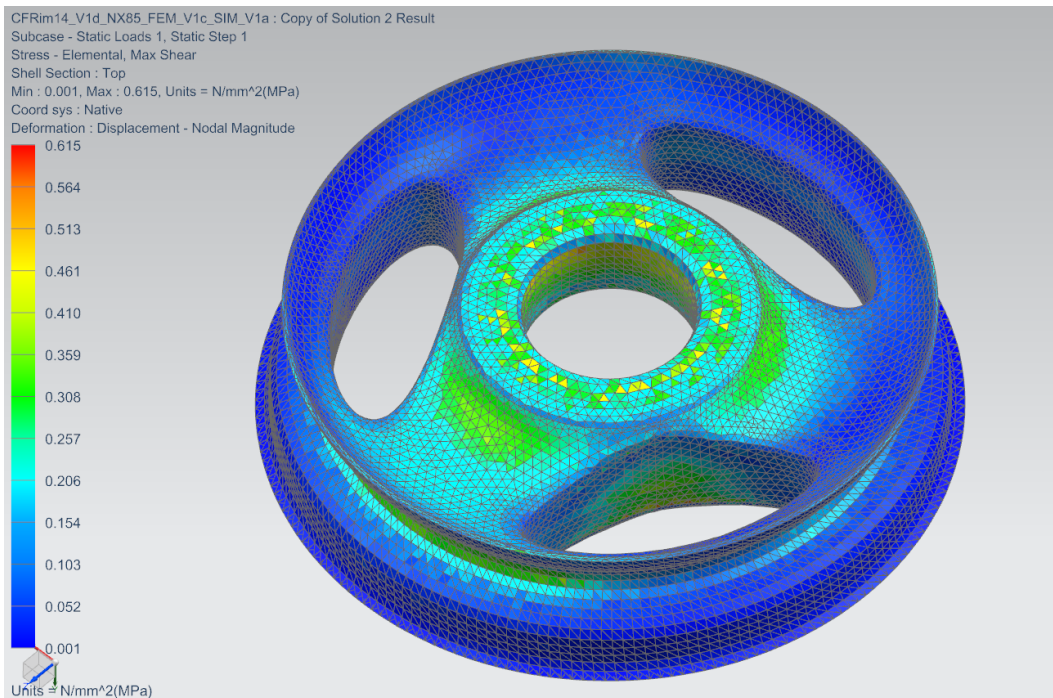
Obr. 39 – Deformace ráfku



Obr. 40 – Výsledek Hoffmannova kritéria porušení materiálu v nejvíce namáhané vrstvě



Obr. 41 – Von-Miseho napětí v jádře



Obr. 42 – Smykové napětí v jádře

Oblast	Počet vrstev	Orientace vrstev [°]	Základní osa orientace	Tloušťka laminátu [mm]
Patka Out	10	[0,0,0,45,45] ^s	y	2
Límeč 1	8	[0,0,45,45] ^s	y	1,6
Límeč 2	8	[0,0,45,45] ^s	y	1,6
Límeč 3	8	[0,0,45,45] ^s	y	1,6
Límeč 4	8	[0,0,45,45] ^s	y	1,6
Patka In	10	[0,0,0,45,45] ^s	y	2
Paprký Out	12	[0,120,240,45,165,285] ^s	z	2,4
Centrlock	24	2x[0,120,240,45,165,285] ^s	z	4,8
Unašeč	30	[0,120,240,45,165,285,0,120,240,285,165,45,240,120,0] ^s	z	6
Kapsy	12	[45,45,0,0,45,45] ^s	y	2,4
Paprký In	12	[0,120,240,45,165,285] ^s	z	2,4
Střed	22	[0,0,0,0,0,0,45,45,0,0,0] ^s	y	4,4

Tab. 8 – Výsledná skladba potahu (osa rotace je osa y)

Výsledkem této kapitoly je tedy skladba laminátu vyhovující všem vstupním požadavkům. Díl by měl být tužší než původní ráfek z hliníkové slitiny a zároveň mít nižší hmotnost. Dle předběžných výpočtů, na základě dat o výsledné hustotě laminátu dle výrobce, by se měla hmotnost disku pohybovat na hranici jedenácti set gramů.

SHELL						
	Area [mm ²]	Mass per Layer [kg]	Layers [1]	Thickness [mm]	Mass [kg]	Area*Layers [mm ²]
Patka vnější	17291.1497	5.3603E-03	10	2	5.3603E-02	172911.497
Límeč 1	6373.5379	1.9758E-03	8	1.6	1.5806E-02	50988.3032
Límeč 2	23864.0602	7.3979E-03	8	1.6	5.9183E-02	190912.4816
Límeč 3	43264.3539	1.3412E-02	8	1.6	1.0730E-01	346114.8312
Límeč 4	69300.5218	2.1483E-02	8	1.6	1.7187E-01	554404.1744
Patka vnitřní	17494.7029	5.4234E-03	10	2	5.4234E-02	174947.029
Paprký vnější	33225.8025	1.0300E-02	12	2.4	1.2360E-01	398709.63
Centrlock	5411.8862	1.6777E-03	24	4.8	4.0264E-02	129885.2688
Unasec	7494.455	2.3233E-03	30	6	6.9698E-02	224833.65
Kapsy	39380.1633	1.2208E-02	12	2.4	1.4649E-01	472561.9596
Paprký vnitřní	39678.9308	1.2300E-02	12	2.4	1.4761E-01	476147.1696
Střed	5075.2382	1.5733E-03	22	4.4	3.4613E-02	111655.2404
					1.0243E+00	3.304071235 m ²
CORE						
	Volume [mm ³]	Density [kg/mm ³]	Mass [kg]	RIM MASS 1.1238 kg		
Core 1	1326645.1	7.50E-08	9.9498E-02			

Obr. 43 – Výpočet očekávané hmotnosti kompozitního ráfku

5 Výroba

5.1 Materiál

Před samotnou výrobou je vhodné se seznámit s materiálem, ze kterého bude výsledný ráfek vyráběn a možnostmi jeho realizace.

Jak již bylo zmíněno výše, díl bude vyroben z kompozitního materiálu. Kompozitní materiál je materiál složený z více substancí s rozdílnými vlastnostmi. Po jejich spojení dochází k vytvoření materiálu, který má, pro daný účel, výhodnější vlastnosti než jeho komponenty samostatně. Nejčastějším případem kompozitu je spojení vláken s polymerní matricí. Vlákná bývají v podélném směru velmi pevná a tuhá. Samostatně by však požadované zatížení, se zachováním jejich výhod, nepřenesla. Z tohoto důvodu se vláknová výztuž spojuje adhezní vazbou pomocí takzvané matrice. Matrice je zpravidla tvořena materiálem s výrazně nižší pevností a tuhostí než má výztuž. Jedná se však o látku, která je schopna zatéct mezi vlákna výztuže a navzájem je propojit. Tím výsledná laminátová konstrukce získá, mimo jiné, tvarovou tuhost. Výztuže mohou mít formu od krátkých, takzvaně sekaných, vláken, v konstrukci jakkoli neuspořádaných, až po dlouhá kontinuální, v konstrukci přesně orientovaná, vlákna. Typickým a pravděpodobně nejrozšířenějším příkladem kompozitního materiálu je takzvaný železobeton. Výztuž je zde tvořena dlouhými, pevnými a tuhými ocelovými tyčemi a matricí, která je propojuje, je beton. Dohromady tak tvoří materiál vhodný pro konstrukce, které by ze samostatných komponent tohoto kompozitu, byly jen obtížně nebo dokonce úplně nerealizovatelné. V dnešní době je také téměř každý kvalitnější výrobek z platu vyztužován drobnými sekanými vlákny, ať už skelnými, či uhlíkovými nebo dokonce aramidovými.

Kompozit, ze kterého bude vyroben navrhovaný ráfek, patří k těm s nevyššími poměry mezi tuhostí a hmotností a pevností a hmotností. Jedná se o materiál, jehož výztuž tvoří uhlíková vlákna a matrici epoxidová pryskyřice.

Uhlíková vlákna jsou v současné době z dostupných konstrukčních materiálů právě tím s nejvyšším poměrem tuhosti, respektive pevnosti k hmotnosti. Na trhu jsou dostupná takzvaná vysokopevnostní a vysokomodulová vlákna. Standardní jsou vysokopevnostní. Tato vlákna mívají pevnost od 3000 N/mm^2 po 6000 N/mm^2 , některá speciální vlákna i více. Modul pružnosti se pak u těchto vláken pohybuje od 200 GPa

po zhruba 450 GPa. Vlastnosti výsledného kompozitu jsou však kombinací vlastností vláken a matrice v závislosti na jejich poměru v materiálu. Obvyklé vlastnosti kompozitů, z běžných tkanin z dostupných vysokopevnostních vláken, bývají tuhostně na úrovni duralu a pevnostně na úrovni běžné konstrukční oceli, to znamená modul pružnosti kolem 70 Gpa a pevnost mezi 700 a 1000 N/mm². Jejich největší výhodou je však jejich hustota. Ta se běžně pohybuje pod hranicí 1600 kg/m³. Pevnost vysokomodulových vláken je nižší než u vysokopevnostních. Řádově kolem pevnosti duralu, to znamená kolem 300 až 400 N/mm². Dnes jsou však dostupná vlákna s modulem pružnosti 400, 600, 800 a dokonce až 1000 GPa, což se již blíží tuhosti diamantu. Tato vlákna jsou ale také velmi drahá, a proto se používají zatím jen v extrémních aplikacích. Výztuž použita pro navrhovaný díl je tvořena kvalitními vysokopevnostními vlákny.

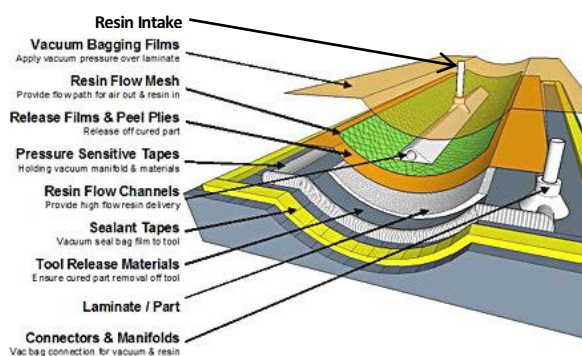
Matrice může být tvořena různými materiály. Jak již bylo zmíněno, může to být beton, ve speciálních případech jí může být například také kov, či keramika. Ve spojení se skelnými, aramidovými, či právě uhlíkovými vlákny bývají nejčastěji využívány matrice na bázi termoplastů (většina plastových dílů v automobilu, či elektronice) nebo termosetů. Termoplast je, zjednodušeně, materiál na bázi polymeru, jež je schopen z pevného skupenství, zvýšením teploty, přejít skelný přechod na skupenství kapalné a po ochlazení zase zpět. Tento druh matrice je velice výhodný z hlediska relativně rychlé a snadné sériové výroby dílů, avšak nemá tak dobré mechanické vlastnosti jako matrice termosetická. Termosety jsou též polymery, avšak k jejich vytvrzení dochází, jednou pro vždy, exotermickou reakcí po smíchání několika chemických komponent. Na rozdíl od termoplastu tedy není možné opětovné tavení a vytvrzení již jednou vytvrzeného termosetu. Nejčastěji používané termosetické matrice bývají na bázi polyesteru či epoxidové pryskyřice.

Existuje několik rozdílných technologií jak výztuž maticí prosytit. Tou nejjednodušší je takzvaná kontaktní laminace. Tato metoda spočívá v prosycování vláken maticí ručně pomocí štětce, válečku, či stěrky. Technologie je poměrně levná, snadná a nenáročná na vybavení. Nevýhodou této metody je špatně předvídatelný poměr matrice a výztuže a tedy i špatná opakovatelnost mechanických vlastností dílu. Dalšími, spíše v průmyslu, rozšířenými metodami je vhnání matrice do vláken tlakem nebo podtlakem. V průmyslu je rozšířenější vhnání matrice tlakem do uzavřené

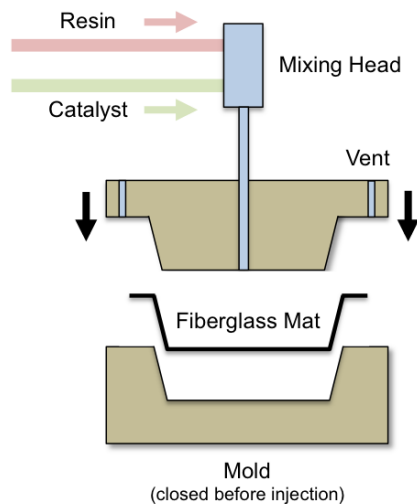
formy, takzvaná technologie RTM. Tato technologie je vhodná pro sériovou výrobu. Lze ji totiž „vyladit“ na, v porovnání s ostatními technologiemi, nejkratší výrobní čas. Technologie vakuovou infuzí je vhodná spíše pro kusovou, či malosériovou výrobu. Obě tyto technologie jsou schopny zaručit opakovatelnost mechanických vlastností dílu. Jejich aplikace konkrétně pro díl ráfku by však byla velmi složitá a nákladná. Nejvhodnější, a také použitá, technologie pro výrobu tohoto disku je užití takzvaného Prepregu, z anglického preimpregnated. Jak tedy již název napovídá, jedná se o tkaninu, která je dodána již předsycena částečně vytvrzenou matricí. Matrice pak dotvrzuje pouze za zvýšené teploty. Tato technologie je vhodná především proto, že zajistí, že pryskyřice zateče do všech míst dílu, poskytuje dostatek času na kvalitní položení všech vrstev skladby a zajistí také opakovatelnost mechanických vlastností a tím také možnost relativně přesného výpočtu skladby. Pro doplnění je vhodné zmínit, že také existují technologie navíjení vláken a ovíjení vlákny. Ty před navinutím, resp. ovinutím, procházejí lázní s matricí. Tato technologie se však používá pro úplně jiné aplikace a, až na některé části límce disku, není pro tento případ vhodná.



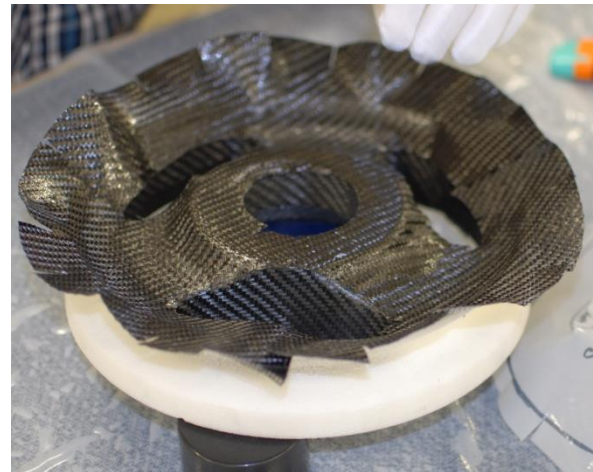
Obr. 44 – Technologie kontaktní laminace [14]



Obr. 45 – Technologie vakuové infuze [16]



Obr. 46 – Technologie RTM [15]

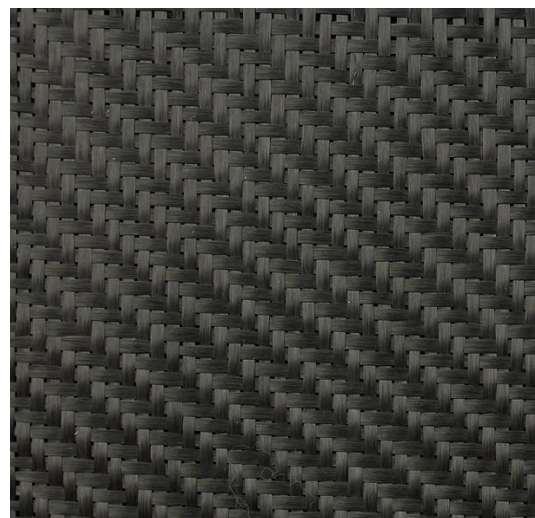


Obr. 47 – Prepregová technologie

Samotná tkanina je pak, jak již bylo zmíněno, vyrovnaná s keprovou vazbou. Keprvá vazba znamená, že jsou svazky vláken tkané vždy přes dva příčné svazky. Díky tomu není tkanina tak tuhá jako klasická plátňová vazba (tkaní pouze přes jeden příčný svazek). Lépe se tak tvaruje do složitějších tvarů. To je v tomto konkrétním případě velmi vhodné, neboť je ráfek tvořen také dvakrát zakřivenými plochami, do nichž je pokládání skladby obzvláště obtížné. Další nespornou výhodou této vazby tkaniny je také to, že díky ní dochází k menšímu, respektive polovičnímu, počtu vzájemného ohýbání křížících se vláken. Taková tkanina je díky tomu pevnější i tužší než tkanina s plátňovou vazbou.



Obr. 48 – Plátňová vazba [19]



Obr. 49 – Keprvá vazba [19]

5.2 Formy

Tvarová stálost laminátové součásti vznikne vytvrzením. Tvar takového dílu je pak negativem formy. Problematika forem pro laminátové díly je složitější, než se může na první pohled zdát. Je tedy vhodné zmínit k této problematice alespoň stručný úvod.

Pravděpodobně nejzákladnějším rozdělením způsobu formování laminátů je rozdělení forem na takzvané otevřené a uzavřené. Otevřená forma tvoří negativ pouze jedné strany laminátového dílu. Laminát se pak může nechat ve formě vytvrdnout i bez působení tlaku z jeho druhé strany. Tento postup však značně degraduje možné výsledné vlastnosti laminátové struktury a v technické praxi se téměř vůbec nepoužívá. V drtivé většině případů je laminátová skladba k formě přitlačena. Nejběžnějším způsobem tohoto procesu bývá takzvaná vakuace. Forma i se skladbou a technologickými tkaninami se uzavře do vzduchotěsného pytle a následně se z něj vývěvou odsaje vzduch. Laminát je tak k formě přitlačován tlakem jedné atmosféry. V případě uzavřené formy se skladba laminátu položí do negativu jedné strany dílu a následně se k ní přitlačí druhým dílem formy, jež je negativem druhé strany dílu. Potřebný přitlačný tlak je pak vytvořen buď zavakuováním formy nebo jejím vhodným vzájemným stažením, například šrouby. To umožní vyvodit výrazně větší tlak než u vakuové technologie. Technologie uzavřené formy je však mnohem náročnější na přesnost návrhu i výroby. Zatímco pytel pro vakuaci se srovná na formu poměrně snadno, vícedílná forma musí perfektně sedět a poskytovat prostor přesně pro danou laminátovou skladbu, tedy prostor s přesností na setiny milimetru. Výhody jednoduchosti vakuové technologie a velkého tlaku vícedílné formy, do jisté míry, spojuje takzvaná autoklávová technologie. Jedná se vlastně o vakuovou technologii, ovšem v tomto případě je díl po zavakuování umístěn do autoklávu. Autokláv je v podstatě velká tlaková nádoba a pec v jednom. V autoklávu dochází k vytvrzení dílu za teplot až několik set stupňů (řádově do 300°C) a tlaku obvykle až šest atmosfér. Takto vyráběné díly patří k nejkvalitnějším a tato technologie je tedy hojně využívána v letectví a motorsportu.



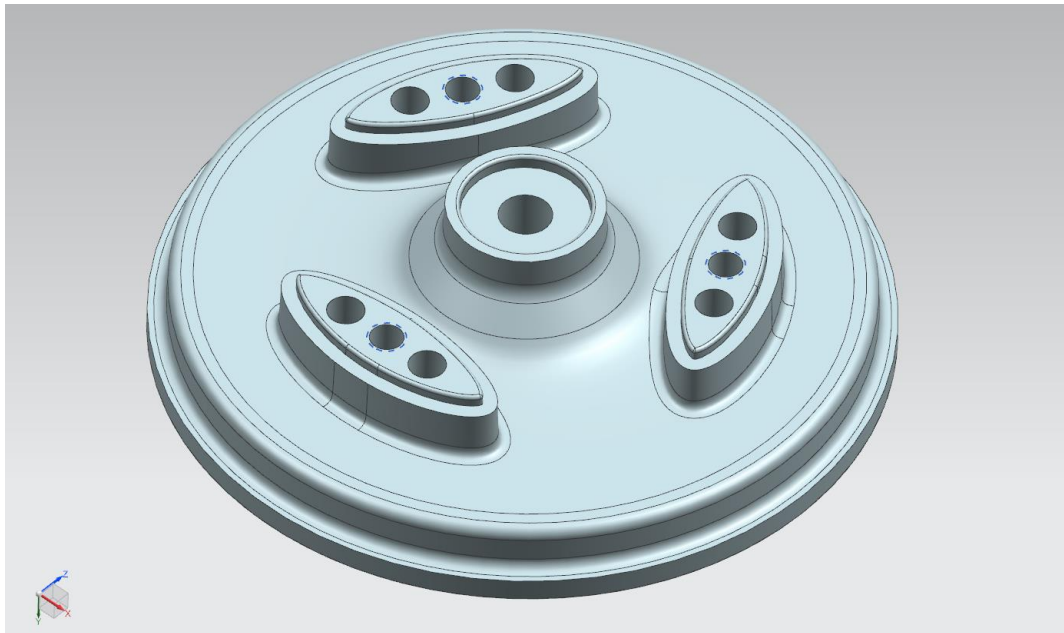
Obr. 50 – Autokláv společnosti LA Composites [20]

Formy se vyrábějí z různých materiálů, podle individuálních požadavků součástí. Pro výrobu dílů, které se vytvrzují za zvýšené teploty, je nevhodnější forma ze stejného materiálu, jako je materiál vyráběného dílu. Toto je obzvláště vhodné u rozměrných výrobků. Důvodem k tomuto postupu je teplotní roztažnost materiálu. Pokud jsou forma i díl ze stejného materiálu, mají také stejnou teplotní roztažnost. Tato skutečnost minimalizuje riziko nežádoucí deformace, či dokonce destrukce dílu během chladnutí. Forma musí být řádově tužší než vyráběná součást. Pro kompozitní formy jsou navíc potřeba takzvané master modely, tedy v podstatě dílčí formy pro výrobu konečných forem. To vše v případě součástí z uhlíkových vláken znamená značné náklady na její výrobu. Pakliže se tedy jedná o menší díl, u nějž se neočekává výroba velké série, kde by se náklady na formu rozložily, je snaha formu vyrobit levněji a tedy z jiného materiálu. Tím může být například kompozit z levnějších tkanin, polotovary ze speciálních dřev a polymerů, či kovy jako slitiny hliníku nebo dokonce oceli.

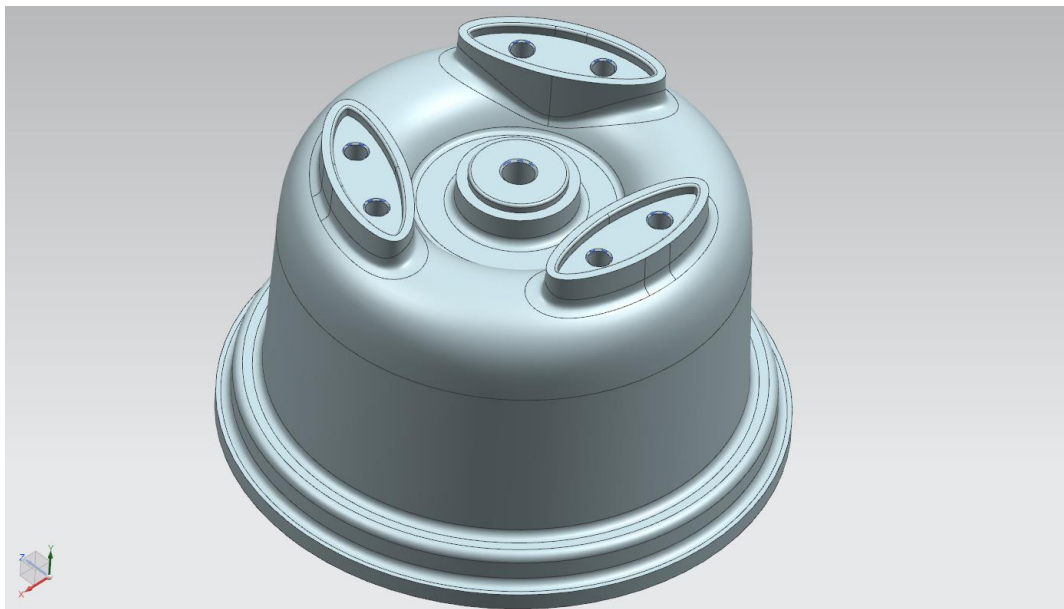
Formy musí splňovat určité technologické požadavky. Základním požadavkem je, aby bylo možné vytvrzený díl z formy vyjmout. Za tímto účelem je forma koncipována

vždy tak, že se směrem, kudy se má díl vyjmout, otvírá. To znamená, že musí být forma a tedy i díl navrženy bez negativních úkosů. Obvykle se naopak používají úkosy pozitivní. To zřetelně usnadňuje vyjmutí dílu po vytvrzení. Pokud není možné udělat formu, která se pouze otvírá, je nutné formu rozdělit na několik dílů tak, aby bylo možné, po jejím rozebrání, výrobek s jistotou vyjmout. S tímto se často pojí nesnadné řešení dělicích rovin formy. Dalším technologickým požadavkem jsou výběhy pro přesahy laminátu. Během pokládání laminátu je takřka nemožné položit okraj vrstvy vždy na stejné místo. Proto se vrstva dělá vždy, přes okraj dílu, delší a po vytvrzení se přesahy odříznou. To je třeba uvažovat během návrhu forem a těmito výběhy je vždy opatřit.

Forma pro tento konkrétní ráfek bude koncipovaná jako dvoudílná, částečně uzavřená. Uzavřená bude v oblasti středu a paprsků, kde, vzhledem ke tvaru součásti, není možné užití formy otevřené. V oblasti límce pak bude otevřená a dotlačení laminátu bude realizováno autoklávovou technologií. To je vhodné i z důvodu dotlačení uzavřené části. Ta sice bude dotažena šrouby, je však pravděpodobné, že vlivem zvýšené teploty během vytvrzování a následným tečením matrice dojde k smrsknutí původně předsyceného materiálu a bylo by tedy třeba oba díly formy k sobě dotáhnout. To je možné pouze v peci. Tam však nebude tak velký přetlak na skladbu límce, autokláv se tedy postará jak o skladbu límce, tak o dodatečné dotlačení forem. Forma je opatřena technologickými úkosy a to jak v kapsách a středu ráfku, tak na jeho límci. Jeden díl formy bude negativem vnitřku ráfku a druhý negativem jeho vnější čelní plochy. Dělicí roviny byly zvoleny dvě, rovnoběžné. Jedna uprostřed kapes a druhá uprostřed středu. Části forem tvořící negativ patek límce jsou pak opatřeny dvaceti milimetrovými výběhy pro pohodlné pokládání přesahů. Oba díly formy budou spojeny šesti šrouby v kapsách ráfku (dvěma M14x2 pro každou kapsu) a jedním M20x2,5 ve středu ráfku. Právě tímto šroubem bude také následně ráfek přichycen k formě během dokončovacích prací. Posledními důležitými šrouby, respektive děrami se závitem, je trojice děr v kapsách se závity M16x2. Ty slouží ke snadnému rozebrání forem po vytvrzení. Důležitým detailem je také zmenšení průměrů límce a patek o vypočtenou tloušťku skladby laminátu. Na dělicích rovinách jsou formy opatřeny zámkami, které formy vzájemně vystředí a zajistí správné sesazení kapes.



Obr. 51 – Návrh vnější části formy



Obr. 52 – Návrh vnitřní části formy

Formy je nutné nejen vyrobit přesně, ale také s co možná nejkvalitnějším povrchem. Polotovár pro výrobu formy byl nejprve obráběn na konvenčním soustruhu, zde není problém dokončovacími procesy zajistit takřka dokonalý povrch. Avšak tvarová složitost forem si vyžaduje dokončení na CNC frézce. Z té samozřejmě není tak kvalitní povrch. Proto je nutné formu dále brousit a leštit, dokud její povrch nepřipomíná, bez nadsázky, povrch zrcadla. Tím se, mimo jiné, zajistí vysoká kvalita povrchu výsledného dílu a také jeho bezproblémové vyjmutí z formy.



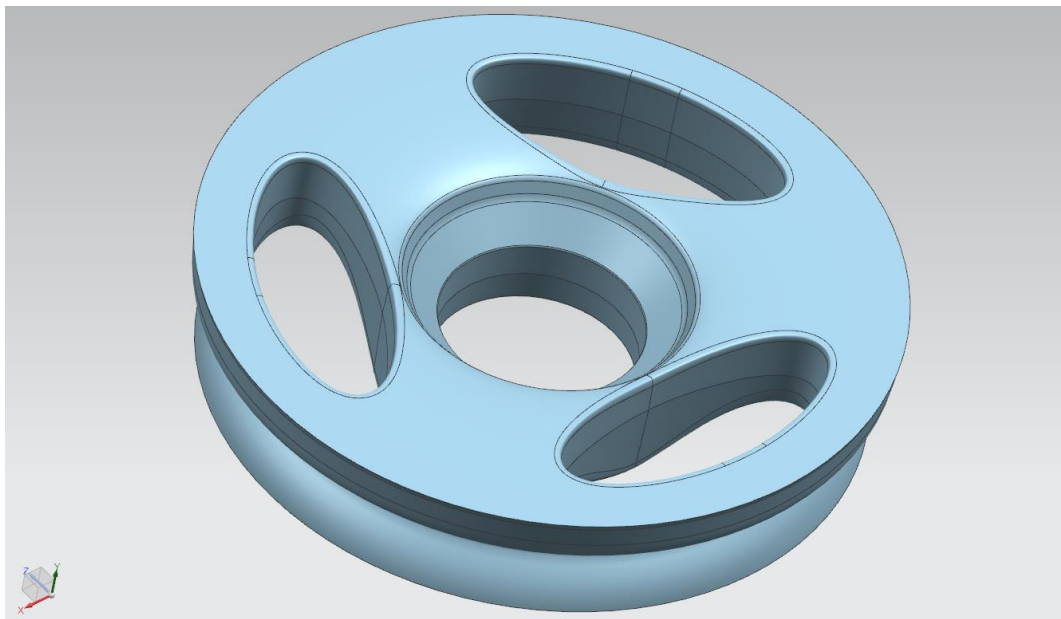
Obr. 53, 54 – Formy před dokončovacími operacemi



Obr. 55 – Formy připravené pro laminování

5.3 Pěnové jádro

Uvnitř forem a laminátové skladby je pěnové jádro. Jádro má vlastně tvar objemové části ráfku, tedy části paprsků, pouze zmenšeno o tloušťku laminátu. Není zmenšeno o celou tloušťku laminátu, ale pouze o zhruba devadesát až devadesát pět procent této hodnoty. To z důvodu vytvoření dostatečného tlaku, respektive napětí, mezi jádrem, tkaninou a formou. Také se může stát, že se nepodaří tkaninu položit zcela ideálně a toto opatření zaručí, že i tak dojde k dostatečnému dotlačení vrstev laminátu k sobě navzájem i k jádru.



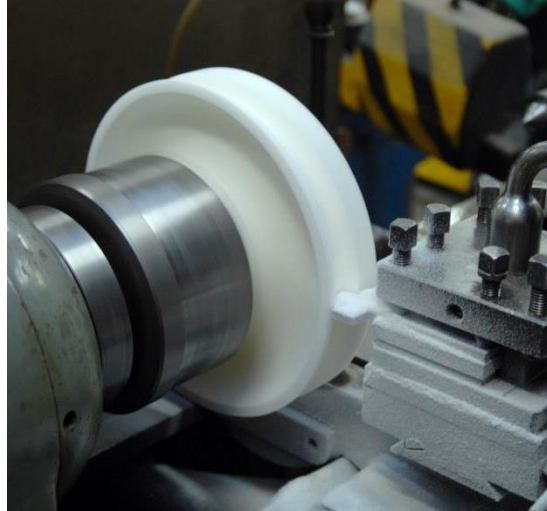
Obr. 56 – Model reálného jádra

Reálné jádro je poměrně složitý prostorový díl a to zejména z hlediska výroby. Díl má být navíc vyroben z relativně křehkého materiálu. Vzhledem k jeho tvaru je také velmi obtížně upnutelné. Bylo tedy potřeba navrhnout zvláštní postup a speciální nástroje ke zhotovení této komponenty. Postup je takový, že se nejprve vyřeže kotouč o průměru cca. 260 mm a s otvorem o průměru maximálně 70 mm z dodané desky o tloušťce 60 mm. Za centralizovaný otvor pak byl kotouč upnut do soustruhu a pomocí, za tímto účelem navržených, prizmatických nožů byla postupně obrobena obě čela a nakonec také obvod jádra. Poslední operace, vytvoření otvorů kapes, bylo nutné, vzhledem k jejich obecnému tvaru, svěřit číslicově řízenému obráběcímu centru. Také

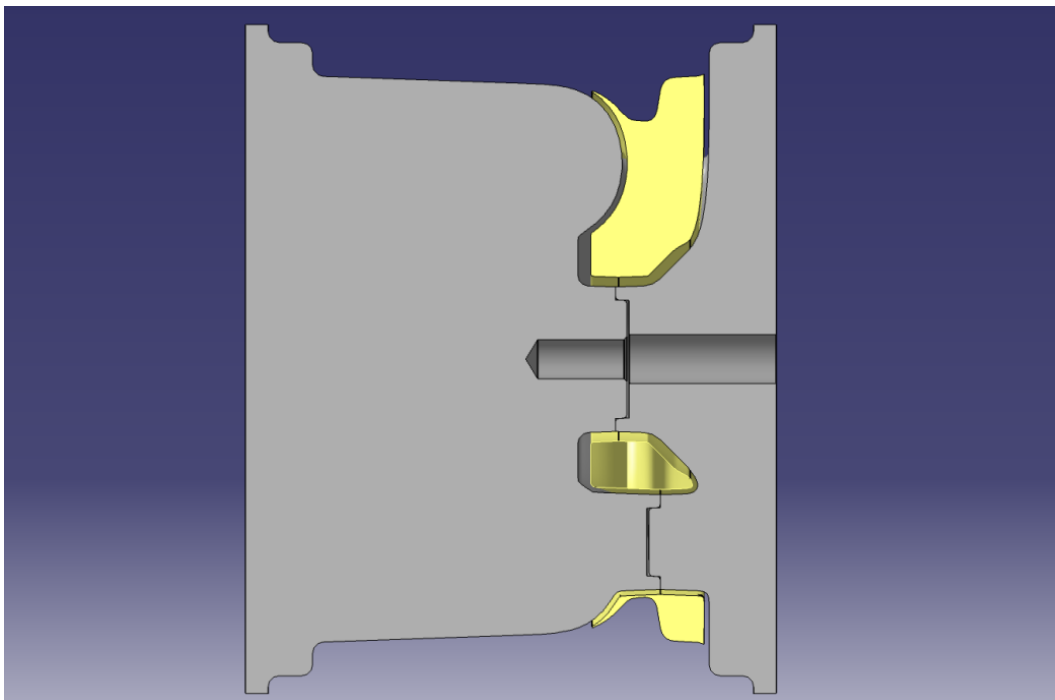
tato operace byla, vzhledem k tloušťce stěny jádra na rozhraní kapes a límce, technologicky velmi náročná.



Obr. 57 – Prizmatické nože



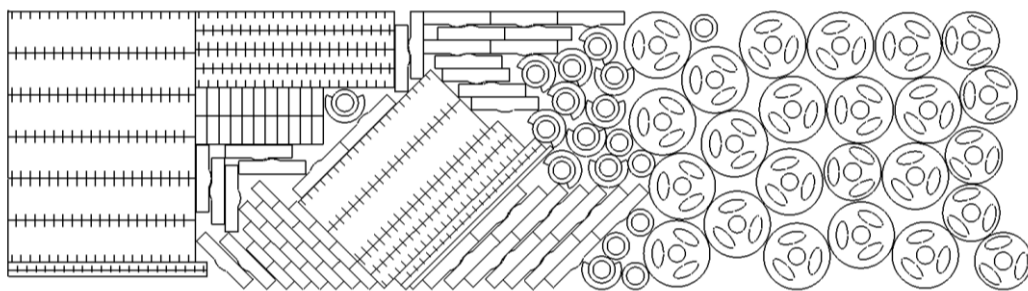
Obr. 58 – Výroba jádra



Obr. 59 – Kontrolní sestavení dílčích komponent formy a pěnového jádra

5.4 Nástřihy tkaniny

Składba laminátu je tvořena postupným kladením tkaniny nastříhané na nejrůznější vhodné tvary. Vzhledem k počtu vrstev ve skladbě by nebylo příliš efektivní, z hlediska spotřeby materiálu i času, stříhat si tkaninu během laminování tak, jak se to zrovna hodí. Za tímto účelem byly navrženy takzvané nástřihy. Tedy přístřihy dílčích částí skladby. U některých částí ráfku není problém takovýto nástřih vytvořit v prostředí CAD systému rozdělením plochy a jejím následným rozvinutím do roviny. U ploch, které jsou dvakrát zakřivené, však tento postu aplikovat nelze. U takovýchto ploch byl nástřih navrhován na základě jejich průmětů a dopočtených obvodů hraničních křivek. Následně byl doladěn k výslednému několikerým vytištěním nástřihu na papír a přeměřením přímo na reálném jádře a na formách. Výsledný nástřihový plán je pak plotrem vyřezán přímo do prepregové tkaniny.



Obr. 60 – Výkres nástřihového plánu

5.5 Výrobní postup

Všechny připravené komponenty je třeba systematicky spojit v navržený díl. Za tímto účelem je navrhnout následující výrobní postup.

Nejprve se postupně položí vrstvy prepregu na pěnové jádro v daném pořadí (Tab. 9) a orientaci (Tab. 8). Každé tři vrstvy je nutná mezivakuace na zhruba deset minut, aby na sebe a na jádro všechny naskládané vrstvy perfektně dosedly. To znamená, že se na skladbu aplikuje separační fólie a rozváděcí tkanina, takzvaný breather. Dále se díl zabalí do pytle, ze kterého se opatrně odsaje vzduch tak, aby se nepoškodilo relativně křehké jádro. Po výdrži se díl rozbálí a skládají se další vrstvy tkaniny. Je potřeba od sebe separovat přesahy na okrajích nástřihu vnitřních paprsků,

neboť budou v následné fázi prokládána vrstvami nástřihu límce tak, aby vzniklo kvalitní propojení všech vrstev všech nástřihů dílu.

Pořadí	Nástřih
1.	Unašeč
2.	Centerlock
3.	Střed
4.	Paprsky vnitřní
5.	Kapsy
6.	Paprsky vnější
7.	Unašeč 2x
8.	Centerlock
9.	Střed
10.	Paprsky vnitřní
11.	Kapsy
12.	Paprsky vnější

Tab. 9 – Pořadí pokládání nástřihů (jeden cyklus ze 6)



Obr. 61 – Pokládání skladby laminátu na pěnové jádro

Po naskládání všech předepsaných vrstev tkaniny na pěnové jádro se díl opatrně vloží do vnitřní části formy.

Formu je třeba před použitím připravit tak, aby se k ní epoxidová pryskyřice, jedno z nejsilnějších průmyslových lepidel, nepřilepila. Tomuto procesu se říká separace. Forma je nejprve ošetřena plničem pórů, konkrétně přípravkem Loctite Frecote B-15. Tento přípravek se aplikuje přetřením středně nasyceným bavlněným hadříkem ve čtyřech křížících se vrstvách. Mezi nanášením jednotlivých vrstev je třeba počkat vždy dvacet pět až třicet minut, dle okolní teploty, aby se odpařilo ředidlo. [12] Po nanesení všech vrstev plniče je nutné formu vypéct po dobu jedné hodiny při teplotě devadesát pět stupňů celsia, aby plnič vytvrdl. Po aplikaci plniče se nanáší samotný separátor, v tomto případě Loctite Frecote 700NC. Nanáší se stejným způsobem jako plnič, jen intervaly nanášení jsou zde pět až deset minut. [13] Postupně se aplikuje deset vrstev separátoru. Po nanesení je nutné nechat odpařit všechna ředidla a činidla po dobu alespoň patnáct až dvacet minut při pokojové teplotě. Takto ošetřená forma je připravena k použití.

Vnitřní část formy se vsazeným dílem se opatrně uzavře vnější částí a postupně se k sobě obě poloviny formy dotáhnou. Následně se začínají skládat nástřihy límce. Cyklus skládání vždy začíná u vnitřní strany ráfku, aby bylo možné prokládat nástřihy límce a přesahy vnitřních paprsků. Takto se postupně položí všechny nástřihy límce v pořadí dle tabulky 8. Na kompletní skladbu se následně aplikují technologické tkaniny. Začíná se takzvanou strhávací tkaninou, která se z vytvrzeného dílu odtrhne i s nežádoucími epoxidovými žilkami. Na strhávací tkaninu se aplikuje perforovaná fólie. Ta od sebe separuje strhávací tkaninu a další vrstvu, již je rozváděcí tkanina, mající za úkol rozvést podtlak rovnoměrně kolem celého dílu i formy a zároveň do sebe nasát přebytečnou matici a tak ještě více zvýšit poměr výztuže v kompozitu. Nakonec se vše zabalí do vzduchotěsného pytle a opatrně se odsaje vzduch. Následně se díl umístí do autoklávu. Zde je za teploty sto třicet pět stupňů celsia a tlaku tří atmosfér vytvrzován po dobu jedné hodiny s dvouhodinovým náběhem na teplotu a stejně tak dlouhým chladnutím.

Hotový díl se do formy, po vyjmutí, opět vrátí a upne se pomocí centrální matice a desky pod šroubem ke středu formy. Forma se pak upne do soustruhu a vystředí. Následně jsou obrobena přesahy laminátu za patkami límce. Pomocí přípravku, upnutého k formě, jsou vyvrtány a vystruženy tři otvory o průměru deset milimetrů, s tolerancí H7, pro trojici pojistných čepů na náboji. Dále se límec disku ze strany

pneumatiky ještě přetře epoxidovou pryskyřicí, pro zajištění maximální těsnosti ráfku. Poslední operací je vyvrtání díry průměru osm milimetrů, mezi obouvacím žlábkem a střední oblastí jedné z kapes, do níž bude umístěn ventilék.



Obr. 62 – Výsledný kompozitní ráfek



Obr. 63 – Výsledný kompozitní ráfek

6 Další vývojová generace

6.1 Motivace

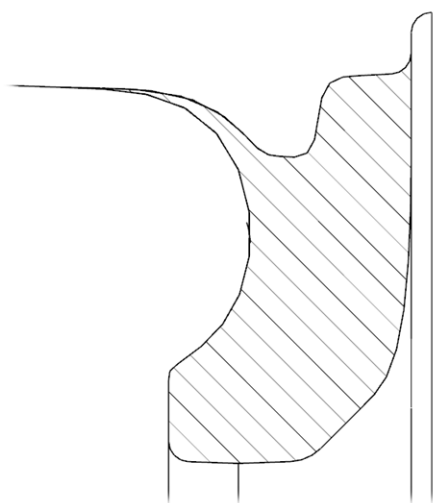
Již během výroby první generace kompozitního ráfku se ukázaly jeho nedostatky. Zásadním problémem byla, časově i technicky, velmi náročná výroba. Neméně zásadním důvodem vývoje druhé generace je také požadavek na úpravu zástavbového prostoru pro nápravu, jejíž požadavky a konstrukce se mezigeneračně částečně změnily.

6.2 Nový návrh

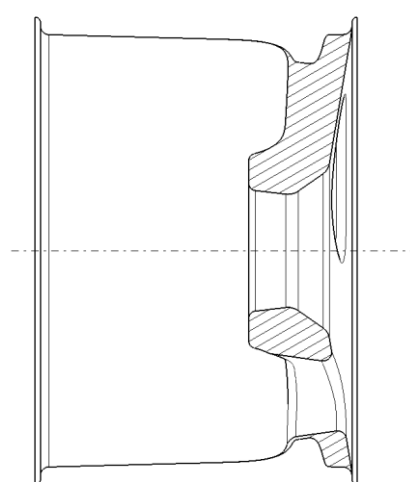
Koncepce přepracovaného ráfku se nezměnila. Opět se bude jednat o kompozitní ráfek s pěnovým jádrem a potahem z uhlíkového laminátu. Zásadní změnou prošel tvar paprsku, který musel ustoupit novému výkonnějšímu brzdovému třmenu. U příležitosti změny vnitřní části paprsku byla přepracována také jeho přední strana a sedlo pro centrální matici. Přední strana dostala přímější tvar a to především z důvodu snazší výroby a lepšího zachycení sil vzniklých utažením centrální matice. Takto se bude nejen lépe vytvářet nástřih, ale také se následně bude snadněji pokládat. Sedlu centrální matice byl pozměněn dosedací úhel tak, aby se síly od dotažení matice lépe rozložily jak do středu, tak do vnějšího potahu paprsků. Změny se udály také ve tvaru a rozměru obouvacího žlábků a dosedací plochy pneumatiky. Na základě zkušeností s obouváním první generace ráfku byl obouvací žlábek posunut o dvanáct milimetrů blíže patce. Při zachování jeho nejmenšího průměru se tak zmenšila příčná obouvací vzdálenost o téměř pět milimetrů, což bude mít za následek ztlačenější obutí pneumatiky na ráfek. Žlábek byl též rozšířen pro lepší a snazší zasazení ventilku.

Nejobtížnější částí výroby bylo vložení jádra se skladbou do formy. Pakliže se tato operace zdařila, ani tak nebylo jasné, zda se vlákna v kapsách během montáže forem dohromady nepokrčí a nevytáhnou do prostoru mezi formami. Tak se také několikrát stalo. Tento problém vznikl v důsledku nezkušenosti s návrhem uzavřené formy. Jedním z problémů byla dělicí rovina nevhodně umístěná doprostřed kapes a středu. Neposkytovala tak možnost kontroly tkaniny během montáže forem. V novém návrhu jsou proto dělicí roviny umístěny až na okraji kapes a středu, vhodně v přechodových

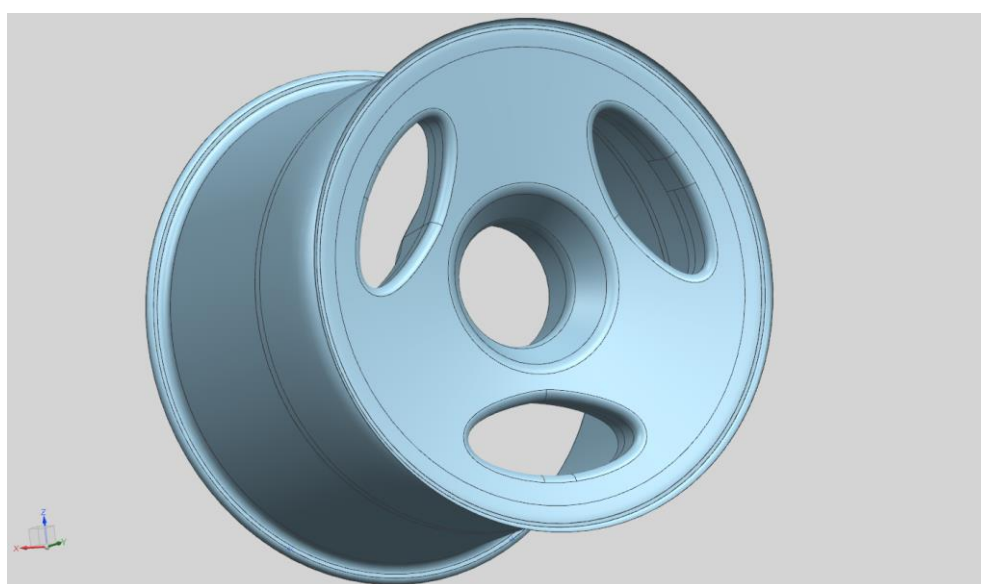
rádiusech. Druhou příčinou tohoto problému byly nevhodně zvolené technologické úkosy. U návrhu a užití otevřených forem jsou původně použité dva stupně optimální. V případě uzavřené formy jsou však nedostačující. Při vkládání jádra s laminátem do formy je vhodné, aby měly prvky formy, vsunující se do kapes a středu, mnohem větší úkos. Část formy, která se vsunuje do jádra se skládou jako první, tak má výrazně menší rozměr než otvor v jádru. To zajistí, že se tkanina dostane do kontaktu s formou až v těsně blízkosti místa, kde má. Tím se minimalizuje riziko pokrčení tkaniny. Návrh druhé generace tedy obsahuje v místech uzavřené formy technologické úkosy osm stupňů. Ty by měly být, na základě nových zkušeností, dostačující.



Obr. 64 – Řez původním paprskem



Obr. 65 – Řez ráfkem druhé generace



Obr. 65 – Model druhé generace kompozitního ráfku

6.3 MKP

Návrh nové generace ráfku je také příležitostí k vylepšení výpočetního modelu s využitím nejnovějších zkušeností a informací.

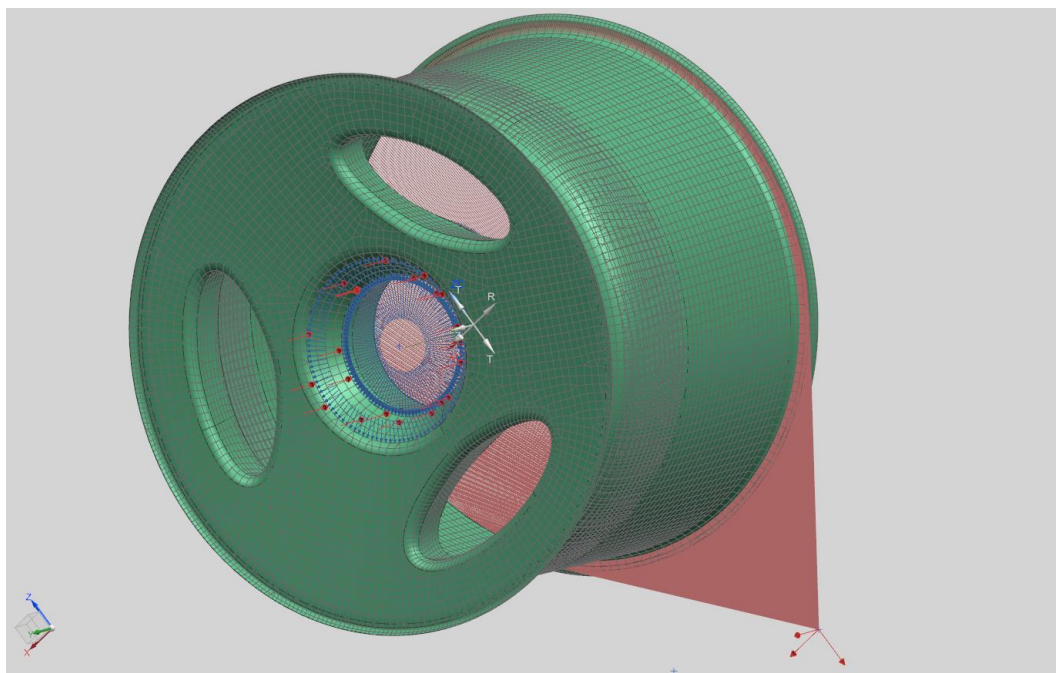
V původních výpočtech byl ráfek uchycen na vnitřní patce a zatěžován byl skrze virtuální náboj. Problémem tohoto zadání zatížení do výpočetního modelu je, že v reálné situaci je zatížení na ráfek aplikováno spíše skrze pneumatiku. Vzhledem k mechanickým vlastnostem pneumatiky, však není možné v běžném řešiči simulovat její chování během zatěžování. Proto je z výpočtu pneumatika vyřazena a nahrazena virtuálním dílem, opět pomocí RBE3 prvků. Ten spojuje příslušnou část ráfku, tedy vnitřní patku, s bodem, do něž jsou zavedeny zatěžující síly, a aplikuje toto namáhání na díl definovaným způsobem. Kolektorem, na něž budou aplikovány zatěžující síly, byl zvolen vhodný bod na pneumatice, respektive bod v prostoru, v místě, kde by v reálné situaci docházelo ke kontaktu pneumatiky s vozovkou. Díl je pak uložen na jeho střed, podobně jako v reálném použití. Tento postup má tendenci deformovat spíše límec ráfku oproti původnímu výpočtu, který deformoval spíše střed ráfku. Nový výpočet je tedy bližší realitě.

Tímto způsobem zadání zatížení a především uložení však vzniká problém se zavedením síly od utažení centrální matice. Nakonec byl tento problém vyřešen tak, že jsou hranám unašeče odebrány translační stupně volnosti a hranám dosedací plochy pro matici je povolen pouze posun ve směru osy rotace ráfku a deformace zadaná v cylindrických souřadnicích, který vznikne utažením matice. Hodnota deformace byla zjištěna simulací se zatížením pouze od dotažení matice. Takto zadané okrajové podmínky simulace zaručí co možná nejreálnější chování modelu bez nutnosti užití modelů náboje a centrální matice a výpočetně náročných, kontaktních vazeb.

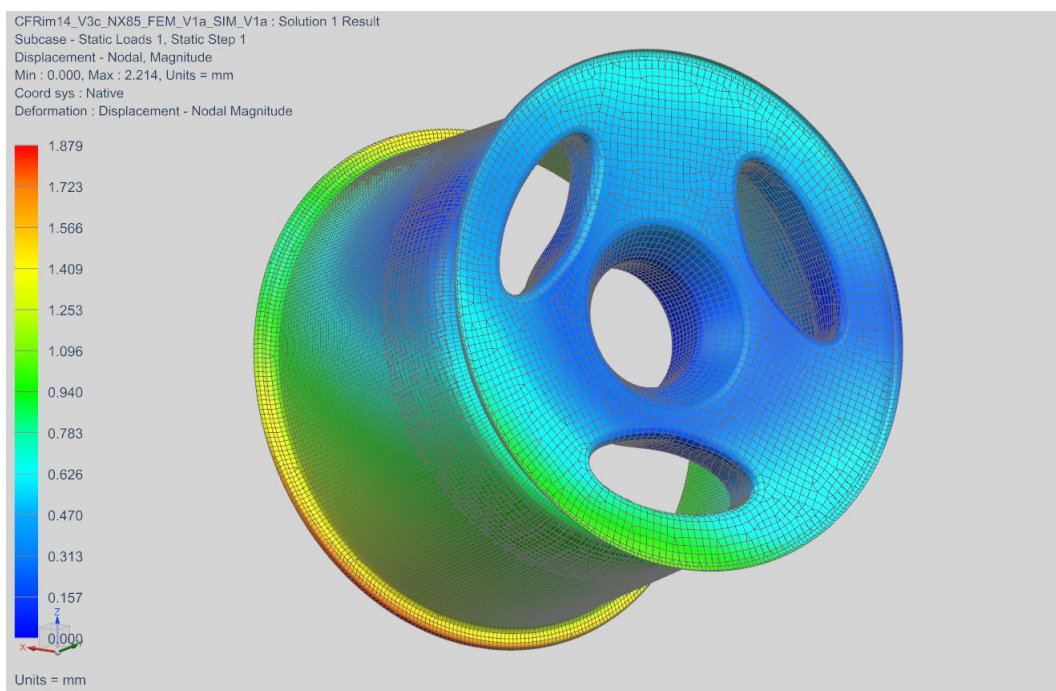
Hodnoty zatěžujících sil jsou pak shodné s hodnotami v tabulce čtyři.

Pro nový díl je též použita jiná tkanina, avšak opět z uhlíkových vláken. Tato tkanina má, oproti původní, vyšší pevnost i tuhost. Navíc má i vyšší gramáž. To znamená, že stejná plocha tkaniny obsahuje více vláken. Všechny výše zmíněné faktory mají za následek, že je možné vytvořit díl s obdobnými mechanickými vlastnostmi jako

původní, avšak s menším počtem vrstev. To je výhodné opět především z důvodu snazší a rychlejší výroby. Materiálový model je opět založen na experimentálních datech společnosti LA Composites. Materiál pěnového jádra zůstává stejný, Rohacell IG-F 71.



Obr. 66 – Zadání simulační úlohy



Obr. 67 – Deformace přepracovaného ráfku

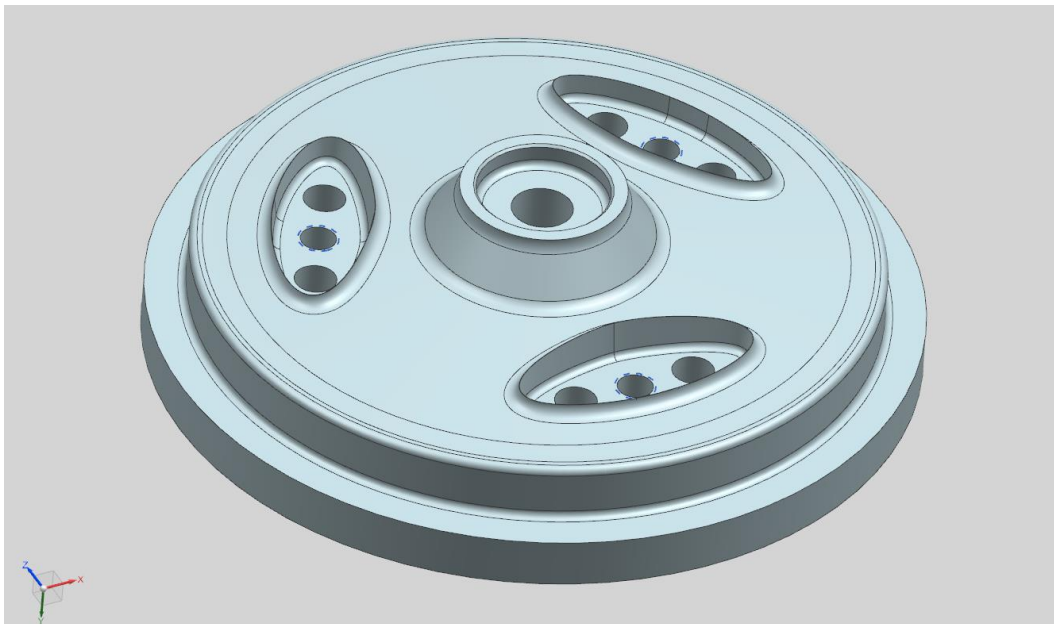
Na výsledku přetvoření je jasně vidět, že se nový ráfek deformuje více než původní. To je však způsobeno zpřesněním simulace. Při aplikaci nových podmínek analýzy na původní ráfek, dosahovala hodnota jeho maximální deformace zhruba 2 mm. Dle výpočtu by se měla hmotnost výsledné skladby i s jádrem přepracovaného kompozitního ráfku pohybovat těsně nad hranicí jednoho kilogramu. Nový návrh ráfku je tedy, ke všem již zmíněným výhodám, tužší a zároveň lehčí.

Oblast	Počet vrstev	Orientace vrstev [°]	Základní osa orientace	Tloušťka laminátu [mm]
Patka Out	16	[0,120,240,45,165,285,(0,0,0,45,45) ^s]	y	3,2
Límec 1	10	[0,0,0,45,45] ^s	y	2
Límec 2	10	[0,0,0,45,45] ^s	y	2
Límec 3	10	[0,0,0,45,45] ^s	y	2
Límec 4	10	[0,0,0,45,45] ^s	y	2
Patka In	14	[45,45,0,0,0,45,45] ^s	y	2,8
Paprsky Out	6	[0,120,240,45,165,285]	z	2,4
Centrlock	22	[0,120,240,285,165,45,165,285,240,120,0] ^s	z	4,4
Unašeč	29	[0,45,120,165,240,285,165,285,45,165,285,240,165,120,45,0] ^{sc}	z	5,8
Kapsy	9	[45,45,0,45,0,45,0,45,45]	y	1,8
Paprsky In 1	12	[0,120,240,45,165,285]	z	2,4
Paprsky In 2	6	[0,120,240,45,165,285] ^s	z	1,2
Střed	18	[45,0,0,0,0,0,0,0,0] ^s	y	3,6

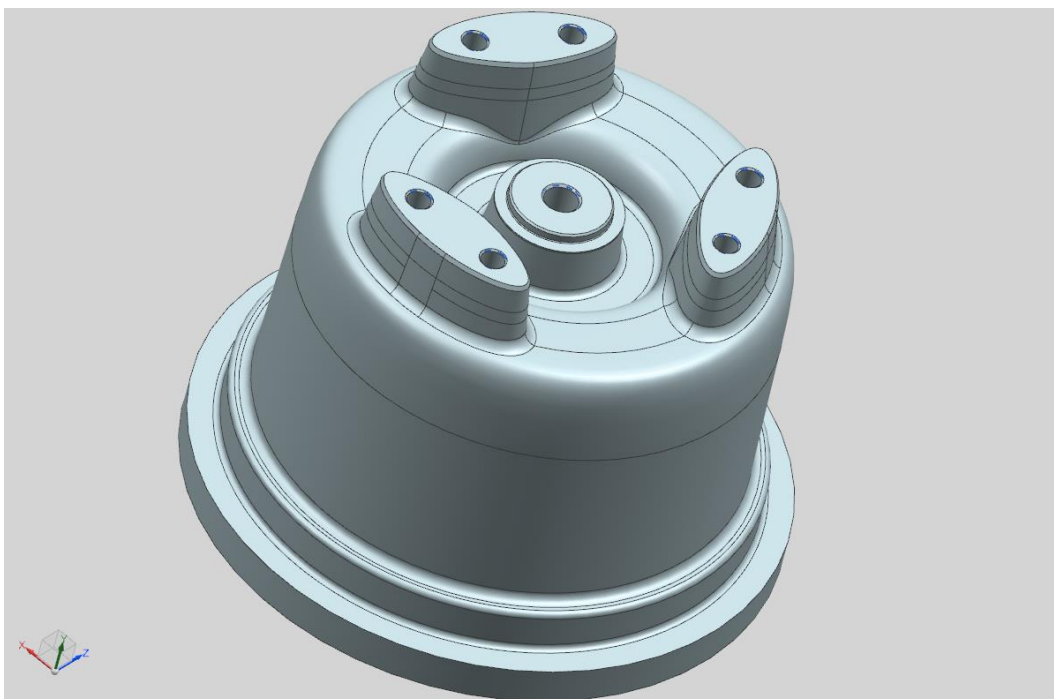
Tab. 10 – Skladba potahu přepracovaného ráfku (osa rotace je osa y)

6.4 Výroba

Postup výroby přepracovaného ráfku je prakticky stejný, jako u disku první generace. Rozdíl je v tom, že návrh byl již od počátku navrhován s důrazem pro její co možná největší usnadnění. Hlavní inovací je tedy nový koncept forem a s tím spojené pozměnění dělicích rovin a zvětšení technologických úkosů. Z důvodů těchto úkosů bylo též nutné pozměnit postup výroby pěnového jádra. Jeho výroba začíná opět soustružením pomocí prizmatických nožů. Z důvodu nemožnosti kvalitního přeupnutí obrobku v mezifázi obrábění na soustruhu je nyní nutné na číslicově řízené frézce obrobit nejen kapsy ale také střed.



Obr. 68 – Vnější část přepracované formy



Obr. 69 – Vnitřní část přepracované formy

7 Závěr

Cílem této práce bylo navrhnout konkrétní alternativu k doposud používaným konvenčním ráfkům v rámci soutěžní série Formula Student. Hlavní motivací bylo navržení nového ráfku, který bude lehčí a tužší než doposud používaný disk ze slitiny hliníku za účelem zlepšení dynamických vlastností vozu a zvýšení hodnocení za konstrukční a inženýrská řešení dílčích komponent monopostu.

Byla provedena rešerše používaných řešení v soutěži a jejich kladů a záporů. Na jejím základě byla následně stanovena koncepce nového dílu.

Dle stanovené koncepce byl vypracován vlastní návrh ráfku z kompozitního materiálu. Návrh byl podroben analýze metodou konečných prvků, na jejímž základě byla stanovena skladba laminátové struktury tak, aby díl vyhověl požadavku na nízkou hmotnost a dostatečnou tuhost. Následně byla navržena metodika výroby. Byly též navrženy formy a polotovary nutné k realizaci výroby.

Na základě zkušeností nabytých během vývoje tohoto dílu byla navržena druhá generace tohoto ráfku. Druhý návrh řeší především problémy složité výroby první verze. Byla také přepracována MKP analýza, která takto poskytuje reálnější výsledky. Ke druhé verzi ráfku byly také vypracovány návrhy forem a polotovarů pro výrobu.

Výsledkem této práce je tedy kompletní vlastní návrh designu a konstrukce nového kompozitního ráfku pro monopost kategorie Formula Student a to včetně návrhu technologie a postupu výroby a k ní potřebných přípravků.

Navržený ráfek druhé generace je v porovnání s původně používaným diskem ze slitiny hliníku o padesát procent lehčí a zároveň o dvacet procent tužší. Neméně významný je také o řád nižší moment setrvačnosti.

Přínos na konstrukci vozu je tedy celková úspora hmotnosti, ta je v této soutěži jedním z hlavních konstrukčních cílů, téměř čtyři a půl kilogramu, což jsou nezanedbatelná dvě celá čtyři procenta celkové hmotnosti současného vozu. Dále je to udržení lepší pozice pneumatiky vůči vozovce během jízdy díky zvýšení tuhosti ráfku. To vše má za následek zlepšení celkových dynamických vlastností vozu. V neposlední řadě přináší pokročilejší inženýrské řešení lepší ohodnocení konstrukce vozu v rámci soutěže.

8 Použitá literatura a zdroje

- [1] Racecar-engineering: Formula Student [online]. [cit. 2017-01-01].
Dostupné z: <http://www.racecar-engineering.com/formulastudent/>
- [2] SUCHÁČEK, P. Zástavba elektromotoru a planetové převodovky do kolové skupiny vozu Formula student. ČVUT v Praze, 2015. Diplomová práce.
- [3] KAPOUN, L. KONSTRUKCE DISKU KOLA OSOBNÍHO AUTOMOBILU. VUT v Brně, 2014. Diplomová práce.
- [4] FUSEK, M a R HALAMA. MKP a MHP. 2011. VŠB-TU Ostrava, ZČU v Plzni.
- [5] LAŠ, V. *Mechanika kompozitních materiálů*, Plzeň 2004.
- [6] Technical Information ROHACELL® IG/IG-F [online]. [cit. 2017-01-01].
Dostupné z: <http://www.rohacell.com/sites/lists/PP-HP/Documents/ROHACELL-IG-IG-F-mechanical-properties-EN.pdf>
- [7] NX Nastran User's Guide [online]. [cit. 2017-01-01]. Dostupné z: https://docs.plm.automation.siemens.com/data_services/resources/nxnstran/10/help/en_US/tdocExt/pdf/User.pdf
- [8] Element Library Reference [online]. [cit. 2017-01-01]. Dostupné z: https://docs.plm.automation.siemens.com/data_services/resources/nxnstran/10/help/en_US/tdocExt/pdf/element.pdf
- [9] OZ Racing [online]. [cit. 2017-01-01]. Dostupné z: <http://www.ozracing.com/>
- [10] Avon Tyres [online]. [cit. 2017-01-01]. Dostupné z: <http://www.avon-tyres.co.uk/>
- [11] KASPRZAK, E. M. The Formula SAE Tire Test Consortium—Tire Testing and Data Handling. University at Buffalo, 2006.
- [12] *Technical Data Sheet: Frekote® B-15™* [online]. Únor 2011. [cit. 2017-01-01]. Dostupné z: [https://tds.us.henkel.com/NA/UT/HNAUTTDS.nsf/web/1CADBA14148320868525715C001BD3BD/\\$File/FREKB-15-EN.pdf](https://tds.us.henkel.com/NA/UT/HNAUTTDS.nsf/web/1CADBA14148320868525715C001BD3BD/$File/FREKB-15-EN.pdf)
- [13] *Technical Data Sheet: Frekote® 700-NC™* [online]. Říjen 2009. [cit. 2017-01-01]. Dostupné z: [https://tds.us.henkel.com/NA/UT/HNAUTTDS.nsf/web/A2744398ECEBC4AF8525715C001BD4ED/\\$File/FREK700-NC-EN.pdf](https://tds.us.henkel.com/NA/UT/HNAUTTDS.nsf/web/A2744398ECEBC4AF8525715C001BD4ED/$File/FREK700-NC-EN.pdf)

- [14] Easy Composites [online]. [cit. 2017-01-01]. Dostupné z:
<http://easycomposites.co.uk>
- [15] Orenco Composites [online]. [cit. 2017-01-01]. Dostupné z:
<http://orencocomposites.com/>
- [16] Argo Mold Limited [online]. [cit. 2017-01-01]. Dostupné z:
<http://argomold.com/>
- [17] Keizer Aluminum Wheels [online]. [cit. 2017-01-01]. Dostupné z:
<http://keizerwheels.com/>
- [18] Black Wave [online]. [cit. 2017-01-01]. Dostupné z:
<http://blackwave.de/>
- [19] Carbon Parts [online]. [cit. 2017-01-01]. Dostupné z:
<http://www.carbon-parts.cz/>
- [20] LA Composites [online]. [cit. 2017-01-01]. Dostupné z:
<http://www.lacomposite.com/>

9 Seznam příloh

Přílohy na CD:

- Příloha 1 – CAD model finální verze první generace kompozitního ráfku
- Příloha 2 – Konečněprvková síť modelu prvního ráfku
- Příloha 3 – MKP analýza prvního ráfku a její konečné výsledky
- Příloha 4 – Modely forem pro výrobu prvního ráfku
- Příloha 5 – Model reálného jádra prvního ráfku
- Příloha 6 – Nástřihový plán tkaniny pro první generaci ráfku
-
- Příloha 7 – CAD model finální verze druhé generace kompozitního ráfku
- Příloha 8 – Konečněprvková síť modelu druhé generace ráfku
- Příloha 9 – MKP analýza druhé generace ráfku a její konečné výsledky
- Příloha 10 – Modely forem pro výrobu druhé generace ráfku
- Příloha 11 – Model reálného jádra druhé generace ráfku