



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

**NÁVRH A VÝROBA KOMPOZITNÍHO KOLA
VOZIDLA FORMULE STUDENT**

FORMULA STUDENT COMPOSITE WHEEL DESIGN AND MANUFACTURING

DIPLOMOVÁ PRÁCE

DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Josef Jelínek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Michal Janoušek, Ph.D.

BRNO 2019

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav automobilního a dopravního inženýrství
Student: **Bc. Josef Jelínek**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Automobilní a dopravní inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Michal Janoušek, Ph.D.**
Akademický rok: 2018/19

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č. 111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Návrh a výroba kompozitního kola vozidla Formule Student

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Úkolem je vytvořit konstrukční návrh a vyrobit kola vozidla s využitím kompozitních materiálů pro monopost Formule Student.

Cíle diplomové práce:

Provést rešerši konstrukčního provedení kol vozidel Formule Student.

Vytvořit konstrukční návrh kompozitního kola v systému CAD pro novou generaci vozidla Formule Student.

Navrhnout způsob zatížení navrženého kola.

Na základě návrhu vytvořit technologické řešení výroby kola.

Zhodnotit navrženou konstrukci po funkční a výrobně technologické stránce.

Seznam doporučené literatury:

MILLIKEN, William F. a Douglas L. MILLIKEN. Race car vehicle dynamics. Warrendale, PA, U.S.A.: SAE International, c1995. ISBN 978-1-56091-526-3.

KRISHAN KUMAR CHAWLA. Composite materials science and engineering. 3rd ed. New York: Springer, 2012. ISBN 978-038-7743-653.

MCBEATH, Simon. Competition car composites: a practical handbook. Somerset: Haynes Publishing, 2008, 208 s. : il. ; 24 cm. ISBN 978-1-85960-624-7.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Josef Štětina, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato diplomová práce je krokem ke zlepšení jízdní dynamiky monopostů Formula Student týmu TU Brno Racing Vysokého učení technického v Brně. Úvodem práce je rešerše existujících lehkých řešení vozidlových kol. Úkolem práce je navrhnout a vyrobit kompozitní kolo pro použití na závodním monopostu Dragon 9. V rámci konstrukce jsou definovány omezení pravidly, zástavbovými požadavky vozidla, silové zatížení a limity technologie výroby kompozitních dílů. Práce ukazuje sbírku CAD dokumentace sestavy dílů kola, forem a pomocných přípravků. Navržené formy byly vyrobeny. V práci se důkladně popisuje technologie výroby kompozitních kol. V práci je navržen způsob zatěžování kol. Výstupem práce je vyrobení několika prototypů kompozitních kol. Závěrem je zhodnocena navržená konstrukce po funkční a výrobně technologické stránce.

KLÍČOVÁ SLOVA

Návrh kola vozidla, Formule Student, Kompozitní materiály.

ABSTRACT

This master thesis represents a step forward in vehicle dynamics of TU Brno Racing Formula Student team from Brno University of Technology monoposts. A detailed research focused on light automotive wheels. Its main part is to design and make a composite wheel for a formula monopost Dragon 9. The wheel design was formed from the rules side, car packaging, forces acting and limits of composite parts production. There's a collection of CAD documentation of wheel designs, moulds and connected fixtures. The designed moulds for hollow carbon fiber wheels were manufactured. The technology in making of composite wheels is described in detail. Also, the ways of testing the wheel before a straight use on a race car were designed. There are several wheel prototypes made as an outcome of this thesis. The wheel design is reviewed in terms of functionality and manufacturing side of things.

KEYWORDS

Vehicle wheel design, Formula Student, Composite materials.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

JELÍNEK, J. Návrh a výroba kompozitního kola vozidla Formule Student. Brno, 2019. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství. 91 s. Vedoucí diplomové práce Michal Janoušek.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce, *Návrh a výroba kompozitního kola vozidla Formule Student*, je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Michala Janouška, Ph.D. a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 24. května 2019

.....

Bc. Josef Jelínek

PODĚKOVÁNÍ

V první řadě musím srdečně poděkovat své rodině a nejbližším přátelům za podporu během celého studia. Další díky patří zástupcům fakulty a celé univerzity za podporu tak úžasného projektu, jakým je soutěž Formula Student. Obzvláště děkuji Ústavu automobilního a dopravního inženýrství a Leteckému Ústavu fakulty strojního inženýrství za ochotu vždy pomoci. Děkuji také členům týmu TU Brno Racing za vytváření úžasného motivačního a přátelského prostředí a pomoc s dílčími úkoly této práce.

Dále chci moc poděkovat následujícím společnostem a jejich zástupcům, se kterými jsem mohl spolupracovat. Společnosti Fiberpreg GmbH za poskytnutí materiálu na výrobu kompozitních kol, společnosti JetSurf – MSR Engines s.r.o. za konzultaci návrhu a výroby kola a možnosti využívat řezací plotr a autokláv pro vytvrzování kompozitů, společnosti ALFUN a.s. za poskytnutí hliníkových polotovarů pro výrobu forem a středových vložek kola, společnosti DATRON Technology za školení a umožnění obrábění dílů na zapůjčené CNC frézce, společnosti MCAE Systems, s.r.o. za umožnění optického 3D skenování přesnosti geometrie forem, společnosti AWAC spol. s.r.o. za řezání tahových vzorků, společnosti R-Pro.cz s.r.o. za obrobení ocelového přípravku na vrtání hlavy kola, společnosti Hestego a.s. za vypálení plechů na přípravek pro montáž pneumatik, společnosti AS Chemie s.r.o. za poskytnutí separačních a čisticích prostředků pro laminování. Vaše podpora umožnila realizaci tohoto projektu. Děkuji za podporu a všechny cenné rady k této i budoucí práci. Závěrem vřele děkuji panu Ing. Michalu Janouškovi, Ph.D. za příkladné vedení diplomové práce a ochotu vždy poradit.

OBSAH

Úvod	10
1 Cílová oblast využití návrhu.....	11
1.1 Soutěž Formula Student.....	11
1.2 Tým TU Brno Racing	13
1.3 Monopost Dragon 9	13
1.4 Motivace k vývoji nových kol	14
2 Lehká vozidlová kola.....	16
2.1 Základní pojmy	16
2.2 Druhy kol	20
2.3 Kola vozů v soutěži Formula Student.....	24
2.4 Práce s vozidlovými koly.....	28
3 Kompozitní materiály na bázi polymerů	30
3.1 Výztuže	31
3.2 Matrice	34
3.3 Technologie transferu matrice do výztuže	35
4 Požadavky na návrh kola	40
5 Konstrukční řešení.....	42
5.1 Konstrukce kola	43
5.2 Začlenění kola do sestavy	48
6 Analýza silových účinků	49
6.1 Uvažovaná dynamika vozu	49
6.2 Limitní zátěžné stavy	50
7 Zatížení kola	54
7.1 Materiálové testy.....	54
7.2 Dynamické testování.....	56
8 Návrh forem.....	59
8.1 Výroba forem	62
8.2 Kontrola geometrie formy	64
9 Výroba kola	66
9.1 Nářezový plán prepregu.....	66
9.2 Příprava jader	67
9.3 Výroba kola.....	69
10 Testování kol	75
10.1 Montáž pneumatik.....	75
10.2 Měření na systému pro kontrolu vibrací	75

11	Zhodnocení	78
11.1	Funkčnost	78
11.2	Technologie výroby.....	78
11.3	Návrhy pro zlepšení	79
	Závěr.....	81
	Seznam použitých zkratk a symbolů	87
	Seznam obrázků.....	89
	Seznam tabulek.....	91

ÚVOD

Smyslem většiny soutěžních disciplín v motorsportu je urazit stanovenou vzdálenost za co nejkratší možný čas. K dosažení nejlepších výsledků je vhodné použití vozidel za tímto účelem maximálně upravených nebo ještě lépe, tj. od základu navržených. Dnes návrh závodních automobilů na počátku obnáší především spolupráci mezi aerodynamickými prvky a podvozkem vozu. Optimalizace obnáší výběr nebo navržení pneumatik vozu, účinky aerodynamického paketu na vůz spolu s chováním podvozkového mechanismu během jízdy. Pneumatiky jsou patrně těmi nejdůležitějšími prvky na vozidle, neboť během jízdy jsou jediným prvkem spojujícím auto s vozovkou. Všechny síly a momenty tvořící zrychlení vozu jsou zprostředkovány a limitovány účinky pneumatik. Proto je největším cílem jakéhokoli návrhu závodního vozidla maximálně využít jejich potenciál. Dalším z nejdůležitějších aspektů při návrhu vozidla je jeho hmotnost. Zrychlení, jaké bude vozidlo schopné vyvíjet je totiž dáno silami a momenty působícími na hmotnost celé soustavy. Snížení hmotnosti má také vliv na celkovou ovladatelnost vozu. Přímo navazujícím přenosovým prvkem mezi pneumatikou a dalšími částmi vozidla jsou kola automobilu. Jejich úkolem je přenášet co nejefektivněji všechny vlivy, které na něj působí. A to v obou směrech. Pro správnou funkci pneumatiky, ale i navazujících systémů jako kinematiky, tlumení nebo například řízení, je nutné minimalizovat jeho deformaci. To znamená zajistit jeho dostatečnou tuhost a pevnost. Zároveň je nutné pamatovat na co nejmenší hmotnost. V rámci rozložení hmotnosti také na moment setrvačnosti v rotačním směru. Pro nejlepší výkon je nezbytné všechny tyto požadavky skloubit nebo spíše dosáhnout nejlepšího kompromisu. Jde o kombinaci efektivního tvaru, materiálu a dobrého technologického zpracování.

Předmětem této práce je navržení lehkého kola pro jednomístné vozidlo formulového typu týmu TU Brno Racing Vysokého učení technického v Brně pro globální studentskou soutěž Formula Student. Pravidla této soutěže částečně korigují návrh kol. Na začátku je přiblížena soutěž, představení týmu s přehledem stávajících řešení a stroje, pro který je navrhované kolo určeno. Poté následuje sumarizace možných konceptů řešení se zhodnocením jednotlivých variant. Následuje detailnější pohled na obecnou geometrii kol. Jedna kapitola je věnována pojednání o kompozitních materiálech a možnostech technologie výroby této konstrukce. Dalším krokem je shrnutí požadavků na návrh. Návrh formuje kooperace se zbytkem návrhu vozu. Kola musí být geometricky vhodná pro zástavbu do soustavy. Pozornost je věnována zatížení, která působí na kola vozu. Použitý materiál pro výrobu kola je nutné otestovat pro zjištění přesných materiálových vlastností. Poté byl vytvořen návrh konstrukce kola s ohledem na limity technologií výroby laminováním. Po dokončení návrhu jsou formy obrobena a byl finálně upraven jejich povrch. Následuje výroba samostatných dílů různými metodami. Byla vyrobena čtyři kompozitní kola. Bylo u nich změřeno házení na funkčních plochách dosednutí pneumatiky na ráfek a vyzkoušeno vyvážení kola. Pro bezpečnost montáže a demontáže pneumatik na kolo byl navržen a vyroben přípravek. Před použitím kola na vozidle je nutné experimentálně ověřit. Závěrem je po funkční a výrobně technologické stránce zhodnocen návrh kola a jeho výroba různými metodami. Na základě nabytých znalostí a zkušeností je navržen další postup.

1 CÍLOVÁ OBLAST VYUŽITÍ NÁVRHU

Návrh kola vozidla této práce je určený pro monopost Dragon 9 týmu TU Brno Racing Vysokého učení technického v Brně pro globální soutěž Formula Student. Pro uvedení do cílové oblasti návrhu je v následujících podkapitolách shrnuto zařazení návrhu této práce.

1.1 SOUTĚŽ FORMULA STUDENT

Soutěž Formula Student je soutěž především technických vysokých škol globálního měřítka. Původní a základní myšlenkou soutěže je zapojení studentů ve velice komplexním projektu za účelem získání znalostí, dovedností a zkušeností ve všech oblastech práce. Tím je myšleno především zdokonalení inženýrských dovedností, ale i organizace práce, plánování, komunikace, týmová práce i praktické dovednosti z výroby nebo obchodní zkušenosti. Tím vším se studenti v této soutěži zabývají. Dnes je do soutěže zapojeno celosvětově téměř 800 týmů. Největší soutěží na světě je v tuto chvíli Soutěž Formula Student Germany pořádaný na německém Hockenheimringu. Této soutěže se každoročně účastní přes 3000 studentů ze 115 týmů z různých koutů světa.



Obrázek 1 – Soutěž Formula Student Germany [20]

Hlavním úkolem všech studentských týmů je každou závodní sezónu od základu navrhnout a vyrobit nový jednomístný závodní vůz formulového typu vyhovující přísným pravidlům soutěže, která jsou zaměřena především na bezpečnost řidiče. Drobné nedostatky prvotního konstrukčního návrhu je třeba odladit testováním. Poté je řada na výkonnostních nastaveních pro nejlepší výsledky vozu. Pro samotné soutěže je nutné vypracovat několik velmi obsáhlých analýz o voze. V časovém horizontu necelého roku za současného studia na univerzitě jde o velmi náročný projekt.

Jedná se v první řadě o výukový projekt, ne o motorsport. I proto je každý závod rozdělený na 3 části. Nejprve musí vůz projít důkladnou technickou přejímkou. Kontroluje se zde soulad s pravidly. Je změřena hmotnost vozu, proběhne test náklonu, hluku a funkčnosti brzdícího systému. Technická přejímka není bodově hodnocena. Její zvládnutí je ale podmínkou pro vjezd vozidla do dynamické zóny, tedy na závodní trať.

Další částí soutěže jsou statické disciplíny hodnocené váženými odborníky z praxe. Jedná se o prezentaci inženýrského návrhu, kde tým obhájí návrh vozu a dokazuje znalosti z konkrétní oblasti. Další prezentace se zaměřuje na nákladovou studii a technologii výroby formule v sérii. Každý díl na voze musí být zmíněn v odevzdaném reportu. Hodnotí se úplnost a technologické postupy při sériové výrobě. Jako třetí je prezentován business plán, tzn. marketingový plán na využití vytvořeného vozu jakožto předmětu generujícího profit pro fungující podnik. V této prezentaci je cílem zaujmout potenciální investory a získat požadovanou částku pro rozvoj podnikání.

Po prezentacích přichází dynamické disciplíny. Závodí se v pěti disciplínách. První je akcelerace vozu 75 metrů v přímém směru. Poté následuje Skid Pad, což je průjezd trati ve tvaru číslice osm. Tato disciplína testuje výkonnost vozu v tzv. ustáleném stavu zatáčení. Další disciplínou je Autokros. Zde se jedná o jedno ostré kolo na technické trati. Tato disciplína je také považována za kvalifikaci do poslední disciplíny. Tou je disciplína Endurance nebo-li vytrvalostní závod. Jedná se o závod na mírně upravené trati autokrosu v délce 22 kilometrů, přičemž v polovině závodu se musí vyměnit řidiči. Během této výměny probíhá i technická kontrola vozu. Zároveň s touto disciplínou je hodnocena i spotřeba paliva vozu označovaná jako Efficiency. Pro celkový výsledek v soutěži jsou důležité vyrovnané výkony ve všech disciplínách. Nejdůležitější je však díky maximálnímu počtu možných bodů společně s připojenou disciplínou Efficiency vytrvalostní závod. Maximální počet získaných bodů v soutěži je 1000. Rozdělení bodů za jednotlivé disciplíny je znázorněno v tabulce 1.

Tabulka 1 – Rozdělení bodů v závodě [19]

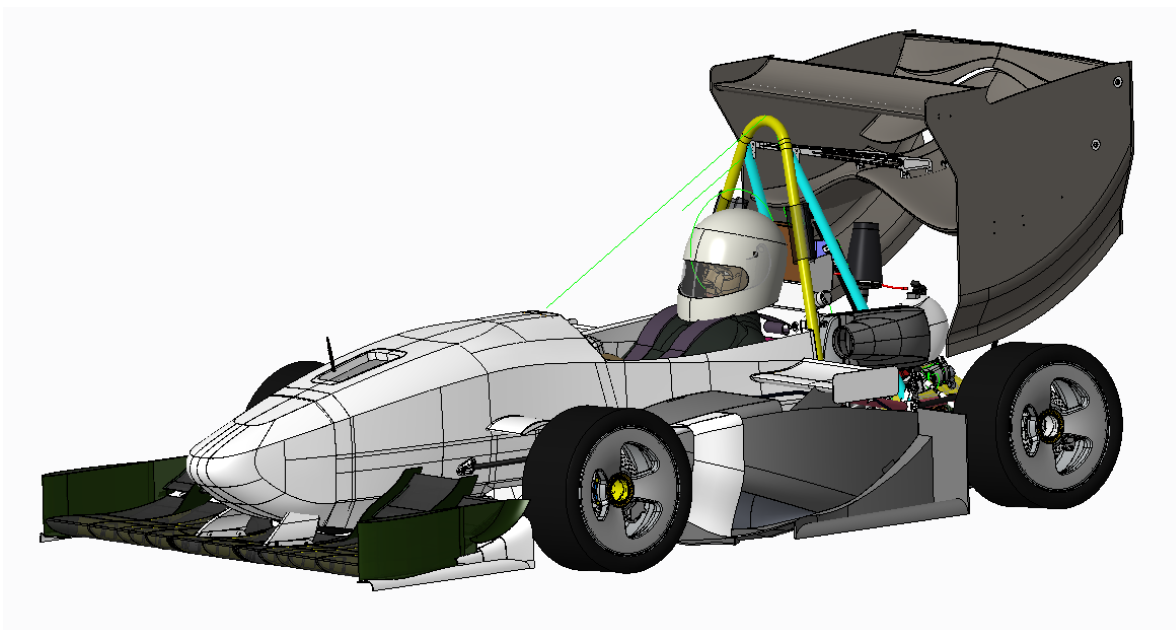
	Disciplína	Maximální počet bodů
Statické disciplíny	Prezentace inženýrského návrhu	150
	Výrobní náklady a technologie	100
	Prezentace business plánu	75
Dynamické disciplíny	Akcelerace	75
	Skid Pad	75
	Autokros	100
	Vytrvalostní závod	325
	Spotřeba paliva	100

1.2 TÝM TU BRNO RACING

Tým TU Brno Racing působí v soutěži pod záštitou Ústavu automobilního a dopravního inženýrství Fakulty strojního inženýrství Vysokého učení technického v Brně od sezóny 2010/2011. První práce spojené s vývojem monopostu pochází však už z roku 2008. Od první generace nesou monoposty po vzoru tradice města Brna název Dragon. V roce 2019 se tedy jedná již o 9. generaci monopostu Dragon.

1.3 MONOPOST DRAGON 9

Nejnovější generace formule s označením Dragon je na vysoké technické úrovni. Její chassis je tvořeno kombinací kompozitního sendvičového monokoku z uhlíkových vláken a hliníkových voštin a ocelového příhradového trubkového rámu z pevnostní oceli v zadní části. Technologie karbonového monokoku jako nosného chassis vozu se dnes využívá ve Formuli 1, Indycar i sérii závodů LeMans. Použití kompozitního chassis má velký potenciál v poměru nízké hmotnosti ku vysoké torzní tuhosti chassis. Nový vůz je nadále poháněn jednoválcovým motorem Husqvarna FE 501 přeplňovaným turbodmychadlem. Tento koncept pohonné jednotky tým stále hodnotí jako velkou konkurenční výhodu. Na voze je optimalizován systém chlazení vody a oleje. Vůz také prošel razantní změnou v oblasti optimalizace aerodynamického paketu a cílem snížit odpor a zvýšit přítlak vozu. Jde o druhou generaci monopostu Dragon, při které byl pro návrh podvozku primární koncentrací vycházet z maximalizace potenciálu aerodynamického paketu vozu. Pro stabilní aerodynamický přítlak je stěžejní téměř konstantní jízdní výška. Na předchozí generaci toho bylo dosaženo systémem tří tlumičů a velice tuhých pružin na každé nápravě. Konstantní jízdní výška se ukázala jako krok správným směrem. Pro nový vůz byl však zvolen dvoutlumičový systém roll-heave na každou nápravu, který je oproti předchozí variantě dohromady s celým příslušenstvím lehčí, byť má vizi stejného výsledku. Navrhovaná kola v této práci jsou určena pro použití na této formuli. Je možná snadná záměna s doposud užívanými hoříčkovými koly OZ Racing. Celková hmotnost nového monopostu činí 174 kg.



Obrázek 2 – CAD návrh monopostu Dragon 9

1.4 MOTIVACE K VÝVOJI NOVÝCH KOL

Pneumatiky jsou tou nejdůležitější součástí na autě. Jednou ze základních filozofií pro zlepšení výkonu vozu je maximalizovat využití možného potenciálu pneumatiky. Kola jsou hned dalším článkem v soustavě vozu od vozovky směrem k rámu. Nedostatečná tuhost kola může být příčinnou špatného přenosu sil ve všech kontaktech. Malá pevnost této součásti může mít na obou koncích soustavy tragické následky. Tato oblast je často přehlížena. Kolo vozidla musí hlavně přenést účinky brzd či motoru na vozovku a naopak. Je nutné, aby bylo za současné nízké hmotnosti dostatečně pevné a tuhé, také aby deformace samotného kola pod zatížením neměnila charakteristiku přenášených sil. Tým TU Brno Racing směřuje kromě jiného pozornost na snížení hmotnosti vozidla. Jde o jeden ze základních principů konstrukce vozidel doporučený světovým odborníkem v této oblasti, Pat Clarkem, mimo jiné popsany v článku Back to Basics. [1]

Tento článek upozorňuje na důležitost základů v procesu navrhování vozidel. Prvním a nejdůležitějším principem konstrukce celého vozidla je druhý Newtonův zákon:

$$F = m \cdot a, \quad (1)$$

kde F je síla působící na vozidlo, m hmotnost vozidla a a jeho zrychlení. Aplikace tohoto zákona je důležitá hlavně kvůli tomu, že týmy soutěže Formula Student mají limitovanou maximální sílu, kterou mohou pohánět svá vozidla vpřed. Je to předepsaným použitím restriktoru sání, který omezí maximální množství vzduchu vstupujícího do motoru. Takže pro zvýšení zrychlení stroje je třeba snížit hmotnost. Snížením hmotnosti zmenšíme všechny setrvačné síly působící na vozidlo. Maximální výkon je ale vždy spojen i s vysokou spotřebou hnacího média, a proto je hnací soustava optimalizovaná na přijatelný poměr výkonu a spotřeby. Důležitost uvedeného principu setrvává. Pat Clarke opakuje 3 pravidla pro navrhování vozidel. Jsou jimi:

- Snížení hmotnosti
- Snížení těžiště
- Centralizace hmotnosti

Snížení hmotnosti u závodních vozidel je intuitivně důležité, výše uvedený vzorec napovídá proč. Uvažujeme-li např. konstantní sílu a sníženou hmotnost, pak vozidlo dosahuje vyššího zrychlení, za předpokladu ceteris paribus, tj. předpokladu, že během změny jednoho vstupního parametru zůstávají ostatní parametry neměnné. Snížení těžiště umožňuje obecně vyšší boční zrychlení. Centralizace hmotnosti neboli snížení momentu setrvačnosti celého vozu pak umožňuje rychlé zatáčení, napomáhá vyšší stabilitě a celkově snazšímu ovládání vozidla. Každé rozhodnutí ohledně konstrukce musí být zváženo s ohledem k těmto principům. Kola jsou z hlediska konstrukce daleko od středu vozu a snížení jejich hmotnosti tak vyvolá velký rozdíl v ovladatelnosti. [1]

Hmotnost vozu se také rozlišuje na odpružené a neodpružené hmoty. Odpružené hmoty jsou závislé na odpružení, resp. tlumící jednotce. To zahrnuje rám, motor, převodovku, palivo, řidiče, tedy většinu. Neodpružené hmoty jsou částí celkové hmotnosti vozu nepodpořené pružením. Jedná se o pneumatiky, kola, náboje, těhlice, v případě brzd uložených v kolech brzdy a další části. Tato hmotnost je kontrolována tlumiči. Jde o svislý pohyb kola. Nižší hodnota neodpružené hmotnosti vede k rychlejší reakci zavěšení. Rychlé reakce podvozku na

podněty jízdy dávají předpoklad k lepší ovladatelnosti. Snížení této hmotnosti vede k lepším výkonům při zrychlení, zpomalení i zatáčení. Zjednodušeně lze říci, že čím lehčí neodpružená soustava je, tím lépe se vypořádá s nerovnostmi vozovky a pneumatika si udrží dostatečný kontakt s povrchem vozovky. [2]

Reakční doba odpružení se charakterizuje pomocí své přirozené frekvence ω_0 definované:

$$\omega_0 = \frac{\sqrt{m_1}}{k_2}, \quad (2)$$

kde m_1 je hmotnost neodpružených částí vozidla a rychlost kol k_2 (konstanta pružiny s přihlédnutím ke všem poměrům pohybu. [3])

Nakonec, má smysl odlehčit kolo i z důvodu snížení jeho vlastního momentu setrvačnosti. To má za následek snížení setrvačných sil při úhlovém zrychlení kola při akceleraci i brždění. Přináší to zlepšení v reakční době vozidla na řidičovy impulzy, a také přesnější zpětnou vazbu pro řidiče. Jízda vozu je předvídatelnější, což je další předpoklad pro lepší výsledky.

2 LEHKÁ VOZIDLOVÁ KOLA

V obecnější části této kapitoly, pro základní orientaci v oblasti vozidlových kol, jsou zohledněna kola určená především pro sportovní využití. Na konci kapitoly je řešerše kol v soutěži Formula Student.

2.1 ZÁKLADNÍ POJMY

Základní pojmy používané v souvislosti s vozidlovými koly a jejich geometrií jsou:

Diskové kolo... kolo skládající se z disku a ráfku; je nerozebíratelné

Lité kolo... kolo odlité jako monoblok

Ráfek... část kola, na kterou dosedá pneumatika

Hlava kola... část kola sloužící pro upevnění na nápravu

Disk kola... část kola sloužící jako spojovací prvek hlavy kola a ráfku

Okraj ráfku... část ráfku zajišťující boční oporu patce pneumatiky

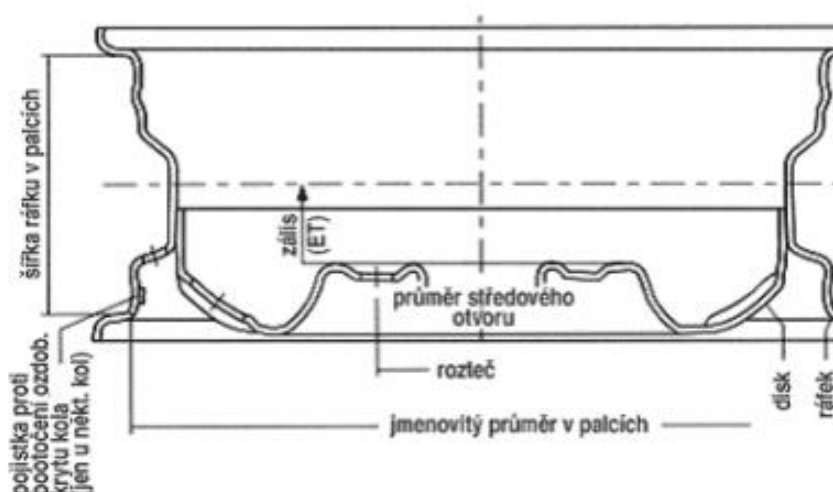
Dosedací plocha... část ráfku sloužící pro usazení patky pneumatiky; bezdušová kola jsou navíc osazena tzv. bezpečnostním profilem zabraňujícím sklouznutí pláště z dosedací plochy

Prohloubení... část ráfku pro usnadnění montáže a demontáže pneumatiky

Jmenovitá šířka ráfku... vzdálenost mezi vnitřními okraji ráfku udávaná v palcích

Jmenovitý průměr ráfku... průměr ráfku v oblasti dosedací plochy udávaný v palcích

Zális... vzdálenost mezi středem kola a vnitřní dosedací plochou hlavy [4]



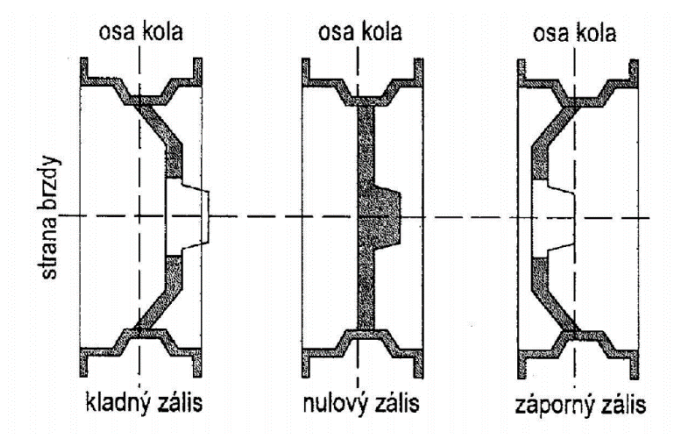
Obrázek 3 – Hlavní rozměry diskového kola [4]

Zális je udávaný v milimetrech. Může nabývat kladné (pozitivní), nulové nebo záporné (negativní) hodnoty.

Kladný zális... vnitřní dosedací plocha hlavy je posunuta směrem k vnější straně kola své osy

Nulový zális... vnitřní dosedací plocha hlavy je v ose kola

Záporný zális... vnitřní dosedací plocha hlavy je od osy kola posunuta směrem k rámu vozu



Obrázek 4 – Typy zálisu kola [4]

2.1.1 RÁFKY

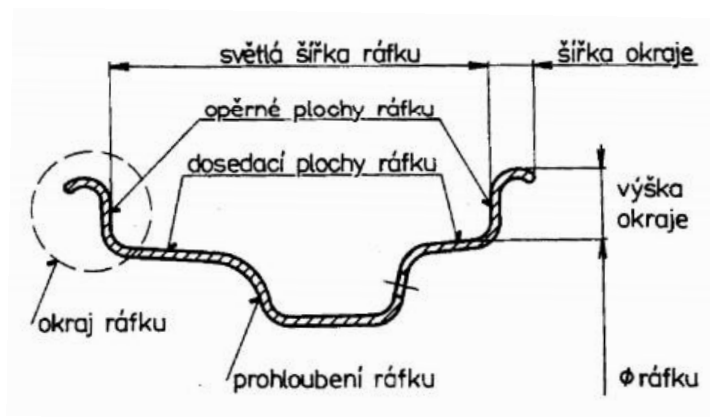
Ráfek je součást, která slouží k montáži pneumatiky. Montáž pneumatiky na ráfek musí přenášet svislé, boční a obvodové síly bez smýkání pláště na ráfek. Obvykle bývá u sportovních vozů ze slitin hliníku nebo hořčíku. Skládá se z následujících částí [5]:

Opěrné plochy ráfku... boční podpory pro patky pneumatik

Dosedací plochy ráfku... u bezdušových kol mají obvykle oproti ose kola sklon 4° až 6°

Okraj ráfku... tvar okraje ráfku je dnes především plochý, dříve se však často používal tvar J (obrázek 5) – tvar J zvyšuje tuhost okraje ráfku. Zpravidla má okraj ráfku výšku 17,3 mm

Prohloubení ráfku... geometrie ráfku umožňující montáž pneumatik na jednoduchý ráfek.

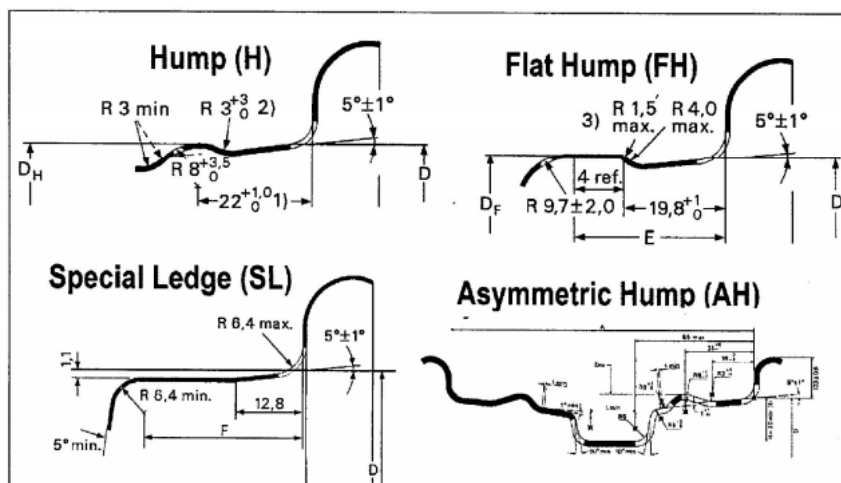


Obrázek 5 – Části ráfku [4]

U soudobých automobilů se používají především bezdušové radiální pneumatiky, které mohou být montovány přímo na ráfky, jejichž dosedací plochy mají tzv. bezpečnostní profily. Tyto profily zamezují náhlému uniknutí vzduchu při zatáčení vozidla (vlivem boční síly by mohlo dojít ke ztrátě kontaktu patky pneumatiky s dosedací plochou na ráfku a tím uniknutí vzduchu), resp. při poklesu huštění. Tyto profily jsou vlastně obvodové hrbolky („hump“) na rameni ráfku, které zamezují úniku vzduchu a sesmeknutí bezdušové pneumatiky. Uspořádání profilů na vnější i vnitřní straně kola tedy zabraňuje, aby i v případě ztráty tlaku vzduchu v pneumatice v malých rychlostech (zatíženích) patky sklouzly z dosedací plochy do prohloubení ráfku, při kterém by automobil mohl dostat smyk.

Pro bezpečnostní ráfky se používají tyto profily:

- Hump (H)
- Flat-Hump (FH)
- Special-Ledge (SL)
- Asymetric-Hump (AH)



Obrázek 6 – Tvary bezpečnostních ráfkových profilů [5]

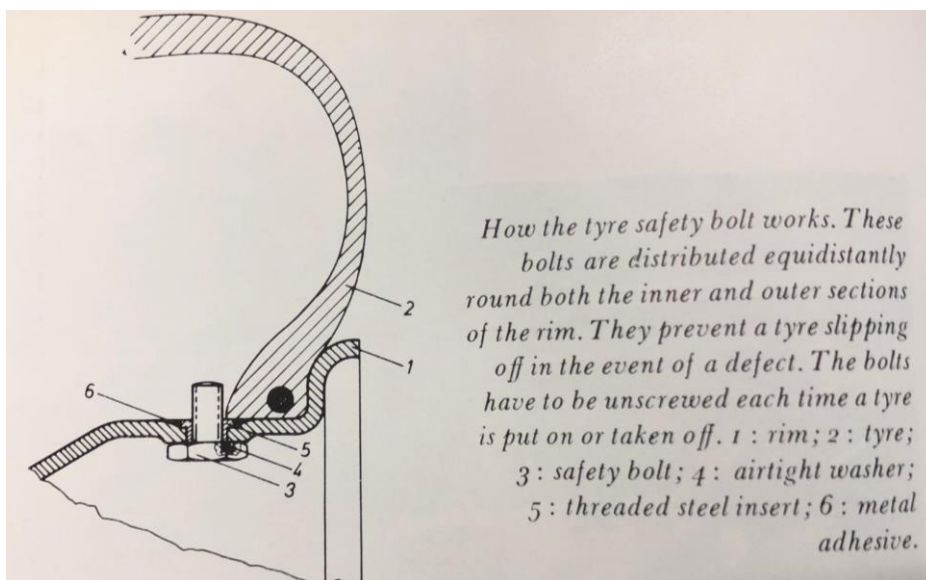
Bezpečnostní ráfky pro osobní i jiné automobily mají na konci označení ráfku kód podle následující tabulky (obrázek 7).

Název	Profil dosedací plochy na straně ráfku		Označení
	vnější	vnitřní	
Jednostranný Hump	H	5°	H
Oboustranný Hump	H	H	H2
Jednostranný Flat Hump	FH	5°	FH
Oboustranný Flat Hump	FH	FH	FH2
Kombinovaný Flat Hump	FH	H	CH
Special Ledge	SL	5°	SL
Asymetrický oboustranný Hump	AH	AH	AH2

Obrázek 7 – Přehled označení ráfků [5]

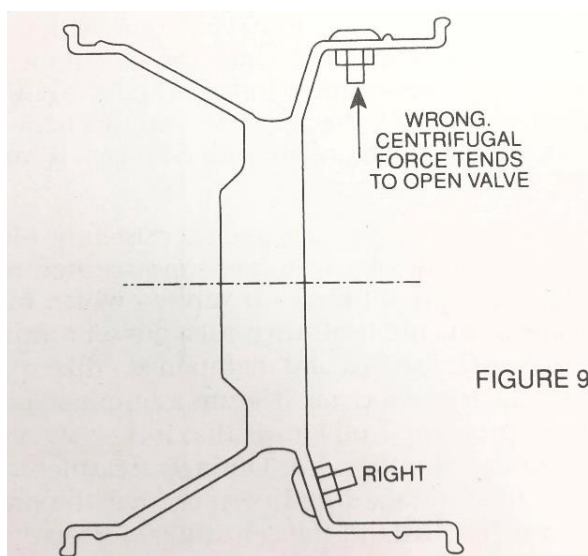
Pro pneumatiky typu Runflat se používá speciální ráfek EH2 (Extended Hump). Jde o rozšířený hump na obou stranách ráfku, který při defektu bezdušové pneumatiky bezpečně zamezuje sesmeknutí pneumatiky z ráfku do rychlosti, které uvádí výrobce.

Týmy soutěže Formula 1 s problematikou sesmeknutí pneumatiky za jízdy bojovaly od počátku používání bezdušových pneumatik. V roce 1975 tým Ferrari používal k zamezení tohoto problému na kolech bezpečnostní šrouby, viz obr. 8 Po obvodu bylo několik takovýchto šroubů. Vibrace a nečistoty, jako prach a guma z pneumatik se stejně dostávaly na dosedací plochu pneumatiky a kola často ucházela. Častou kontrolou se ale docílilo řešení problému. Dnes se toto řešení na silničních vozech nepoužívá, nahradily ho přesně dělané bezpečnostní profily.



Obrázek 8 – Bezpečnostní šrouby v kolech [36]

Pozice vzduchového ventilků na ráfku není náhodná. Uvažujme ventilek uložený radiálně nebo axiálně k ose kola viz obr. 9. Působení setrvačných sil na části ventilků během jízdy může způsobit ztrátu tlaku v pneumatice. Některé ventilků jsou konstruovány na radiální uložení, avšak u strojů s vysokými otáčkami kol je axiální uložení ventilků vždy bezpečnější variantou.



Obrázek 9 – Pozice vzduchového ventilků v kole [37]

2.2 DRUHY KOL

2.2.1 DISKOVÁ KOLA

Disková kola tvoří základem dvě části. Jednou je ráfek prstencového profilu, který nese pneumatiku a disk, který tvoří spojovací část mezi nábojem a ráfkem. Části diskového kola jsou běžně tvářeny bez dalšího zpřesnění geometrie, což může způsobovat házení. U běžných plechových kol jsou tyto části většinou pevně spojeny odporově nebo obloukově svařeny. Existují však i varianty o nižší hmotnosti. Těmi jsou kombinace ráfku a disku z různých kovů, které jsou dohromady šroubovány. Rozměry a označení prodáváných kol je stanoveno normami DIN. [4]



Obrázek 10 – Diskové kolo z lehkých slitin [6]

2.2.2 PAPRSKOVÁ KOLA

Paprsková kola jsou obvykle z lehkých slitin. Průměrně jsou při zachování mechanických vlastností hliníková kola až o 20 % lehčí než ocelová. U hořčíkových kol je to až 40 %. Paprsková kola se buď odlévají metodou gravitačním nízkotlakým litím nebo se zápustkově kovají. Zápustkově kovaná kola mají velmi vysoké pevnosti současně s nízkou hmotností. Dosedací plochy a upevňovací otvory jsou před dokončením třískově obrobeny. Tím získají vysokou přesnost a nedochází u nich oproti svařeným diskovým kolům tolik k házení. Vyrábí se jak jednodílné, tak i vícedílné varianty. Paprsková kola mají obvykle díky své konstrukci lepší schopnost chlazení brzd. [4]



Obrázek 11 – Paprskové kolo [7]

2.2.3 KOVOVÁ KOLA

Na trhu je spousta možností nákupu různých kol z lehkých slitin. Výrobou se zabývá mnoho firem. Nejrozšířenější jsou kola ze slitin hliníku. Nazývají se hliníkovými kvůli majoritnímu podílu hliníku. Další možností jsou hořčíková kola. Konkrétním příkladem je slitina hořčíku nazývaná elektron. Tato kola jsou ještě výrazně lehčí než hliníková. Tato kola jsou přirozeně také mnohem dražší alternativou. Některé slitiny mají také malou odolnost vůči korozi, která může začít uvnitř kola a způsobit prasknutí. Kvůli tomuto se tato kola kontrolují pomocí rentgenového záření. Patrně největší nevýhodou je ale jejich tendence k hoření. A pokud začnou hořet, je obtížné oheň uhasit. Z tohoto důvodu bylo jejich použití na některých závodech úplně zakázáno, ale i v této oblasti probíhá postup ve vývoji. V rámci soutěže Formula 1 je pravidly povolené použití pouze dvou slitin hořčíku (AZ70, AZ80) [38]. U hliníkových kol tolik problémů není. Zde je několik příkladů zmíněných kol.



Obrázek 12 – Paprskové kolo OZ Racing Superforgiata [11]



Obrázek 13 – Paprskové kolo Sparco Assetto Gara [10]

2.2.4 LAMINÁTOVÁ KOLA

Tato kola jsou poměrně vzácná. V mnoha soutěžních sériích jsou, stejně jako kola z hořčíkových slitin, zakázána. V oblasti laminátových kol se již dlouho pohybuje švédský výrobce hypervozů Koenigsegg. Jejich kola jsou dutá a jsou testována pro rychlost 450 km/h. Kolo s pěti paprsky modelu Agera, jehož průměr je 19 palců šířka je 10 palců, váží 13 liber, tedy přibližně 5,9 kg. [39] Společnost Koenigsegg tato kola vyrábí ručním skládáním tkanin prepreg a následným vytvrzováním v autoklávu. Více o této metodě v další kapitole o kompozitech. V současnosti nabízejí 2 designy kol viz. obr. 14.



Obrázek 14 – Karbonová kola Koenigsegg; Agera [12], Regera [13]

Na trhu karbonových kol se už delší dobu pohybuje i společnost Carbon Revolution. Soustředí se především na sportovní použití. Jejich koly bývají osazeny například i sportovní vozy Porsche 911. Řidiči přechod z vozu s kovovými koly do vozu s koly z uhlíkových vláken Carbon Revolution hodnotí velmi pozitivně. I poměrně malá ušetřená hmotnost hraje velkou roli v odporu zatáčení, brzdění a stáčení celého vozu. Automobil Porsche 997 Gen 2 Turbo v sériovém provedení má přední kola rozměru 19 palců v průměru a 8,5 palců šířky, která váží 10,9 kg. Výrobce uhlíkových kol v tomto rozměru uvádí hmotnost 8,2 kg. Tato kola jsou vyráběna stejnou technologií, jako kola automobilky Koenigsegg. [14]



Obrázek 15 – Karbonové kolo Carbon Revolution [14]

V roce 2017 přišla na trh s automobilovými koly z uhlíkových vláken o průměru 19 palců i společnost Porsche. Přestože nebyli první v tomto odvětví, jejich technologický postup přináší do této oblasti velký potenciál. Nabízí dobrou opakovatelnost kvality a především efektivní produkci. Tato technologie je pokryta v následující kapitole této práce zaměřené na kompozitní materiály.



Obrázek 16 – Karbonové kolo Porsche [40]

Raritou na trhu kol je semikarbonové kolo od výrobce HRE. Ráfek tohoto kola je z plného karbonu, střed z kovaného hliníku. Na pravé straně je ještě extrémnější varianta s obdobným ráfkem, avšak diskem tištěným z kovových slitin. Dohromady jsou obě varianty spojeny titanovým šroubovým spojem.



Obrázek 17 – Semikarbonová kola HRE [15]

2.3 KOLA VOZŮ V SOUTĚŽI FORMULA STUDENT

V soutěži Formula Student je přirozená různorodost. Na světě neexistují 2 stejné monoposty této kategorie. Výjimkou není ani osazení monopostů různorodými koly.

2.3.1 KOMERČNĚ PRODÁVANÁ KOLA

Za spolehlivá i relativně dostupná lze považovat různá prodávaná kola z lehkých slitin. Například hliníková kola Keizer nebo hořčíková kola OZ Racing používaná na formulích Dragon od čtvrté generace viz obr. 13. Kola Formula Student OZ Racing 13“ Magnesium váží 2,47 kg.



Obrázek 18 – Hliníkové kolo značky Keizer; Hořčíkové kolo značky OZ Racing

2.3.2 VLASTNÍ KOVOVÁ KOLA

Alternativou je vývoj vlastních kovových kol s příslibem snížení jejich hmotnosti, vhodnosti pro zástavbu do celkové koncepce vozu nebo pro získání zkušenosti s návrhem vlastních kol. Pro návrh vlastních kovových kol jsou používány hlavně slitiny hliníku. Při výrobě prototypů je těžké najít možnost výroby hořčíkových kol. Vlastní kola byla vyvinuta kvůli nestandardnímu rozměru uchycení centrální maticí i na monopostu Dragon 3 nebo na voze univerzitního týmu High Octane Motorsports.



Obrázek 19 – Kolo vlastní výroby týmu High Octane Motorsports [16]

2.3.3 SEMIKARBONOVÁ KOLA

Krokem vstříc novým technologiím s velkým potenciálem je vlastní návrh kola s kombinací kompozitního ráfku a kovového disku spojených dohromady šroubovými spoji. Tento koncept není příliš složitý na výrobu. Hmotnostní úspora se projevuje především na ráfku, tedy po obvodu kola, kde z hlediska momentu setrvačnosti kola na hmotnosti nejvíce záleží. Na vozech se objevují 2 základní řešení. Prvním je uchycení příčně na rovinu boční strany kola, tj. ve směru osy kola viz kolo týmu Rennteam uni Stuttgart e.v. nebo poslední koncept kola týmu UNI Erlangen, kde disk je s nábojem spojen v jeden díl.



Obrázek 20 – Semikarbonová kola týmu Rennteam Stuttgart e.v. a UNI Erlangen

Druhým řešením je šroubové spojení ráfku s diskem v radiálním směru kola. Tento typ je možné vidět například u týmu DHBW Engineering Stuttgart e.v.



Obrázek 21 – Semikarbonová kola týmu DHBW Engineering Stuttgart e.v. [17]

Relativně novou alternativou na trhu jsou buďto samostatné ráfky z uhlíkového kompozitu nebo celé komplety se šroubově připevněným diskem z hliníkových slitin od společnosti Blackwave. Ty jsou vyrobeny z netkaných uhlíkových vláken.



Obrázek 22 – Blackwave semikarbonové kolo Formula Student [42]

Naprostou ojedinělostí je kolo týmu TU Delft o jmenovitém průměru 8''. Kolo tvoří v podstatě pouze ráfek. Ten je spojen pomocí šroubů z více dílů. Disk a náboj kola v centru ráfku nahrazuje uložení v ložiscích po vnitřním obvodu ráfku, kde je připevněn brzdový kotouč. Celá zástavba je na obrázku č. 23. Toto řešení tým TU Delft vyvinul společně se samotnou pneumatikou.



Obrázek 23 – Kolo týmu Formula Student Team Delft [18]

2.3.4 CELOKARBONOVÁ KOLA

Celokarbonová řešení kol se nyní jeví jako nejvíce pokročilé. Kvalitní konstrukce dohromady s odbornou výrobou mají obrovský potenciál snížení hmotnosti kola za současného zachování nebo zvýšení tuhosti a pevnosti. Vývoj tohoto kola je však také nejsložitější a výroba je velice časově náročná. Celokarbonovými koly jsou osazeny například monoposty rakouských týmů TU Graz a Joanneum Fachhochschule Graz, a to ve velikostech jmenovitého průměru kol 10“ a 13“. Meziročně se u těchto týmů nemění tvar. Nevyrábí nové formy, protože po dobu několika let nezměnili jmenovité průměry kol. Existuje několik variant tuhosti. Nejnižší hmotnost vyrobeného kola TU Graz Racing je okolo 800 g. Běžně používaná kola váží okolo 1200 g. Toto kolo je vyrobeno ze dvou kusů a následně slepeno a snýtováno. Kola týmu Joanneum Racing Graz mají stejný rozměr, jako náš tým TU Brno Racing. Nejlehčí vyrobené kolo váží jen 1300 g, ale běžně používají kola o hmotnosti okolo 1700 g. Každý rok se experimentuje s různými variantami vzhledem k požadavkům na životnost nebo hmotnosti zbytku vozu.



Obrázek 24 – Celokarbonová kola týmů TU Graz a Joanneum Fachhochschule Graz

Tým TU Fast z mnichovské technické univerzity v minulém roce přišel s novým konceptem zadních kol. Speciální zástavba pohonu a brzd kol umožnila naplno využít možností skořepinové konstrukce. Výsledkem je celokarbonové duté kolo vyrobené pomocí vodou vyplavitelného jádra o velké teplotní roztažnosti. Hmotnost kola je 1,35 kg při velikosti kola průměru 10“ x 7“. Profil ráfku je tvaru DIN 7817.



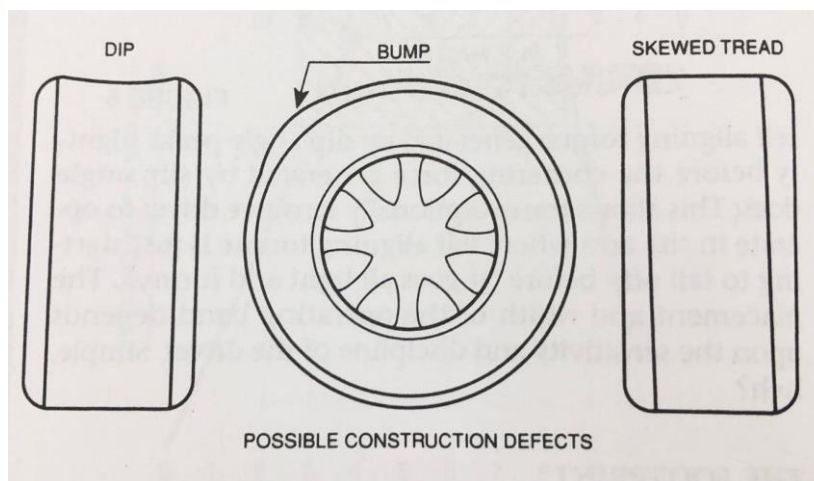
Obrázek 25 – Duté zadní kolo týmu TU Fast München [43]

2.4 PRÁCE S VOZIDLOVÝMI KOLY

2.4.1 POČÁTEČNÍ INSPEKCE A MONTÁŽ PNEUMATIK

Montáž pneumatik je nebezpečná operace. Pro daný rozměr pneumatiky je nutné používat předepsanou velikost kola. Před montáží se musí zkontrolovat technický stav pneumatiky i kola. V případě montáže nových pláštů se doporučuje použít současně i nové bezdušové ventily, případně novou duši. Bezdušové pláště se montují vždy jen na ráfky s bezpečnostním provedením profilu dosedací plochy. Tlak vzduchu při montáži, také nazývaný jako tzv. dosedací tlak, dosahuje až 150 % nejvyšší tabulkové hodnoty. Nesmí však přesáhnout 350 kPa. Při montáži bezdušových pneumatik musí patky vždy překonat bezpečnostní profil proti sesmeknutí. Namontovaná pneumatika nahuštěná na předepsaný provozní tlak je třeba dynamicky vyvážit. Doporučuje se používat ochranné čepičky vzduchových ventilů na kolech. Chrání ventil proti vnikání nečistot a následné netěsnosti. Nové pneumatiky se doporučují prvních několik set kilometrů jízdy používat při nižších provozních rychlostech. Dojde tak ke stabilizaci povrchu běhounu, což se příznivě projeví vyšší životností pláště. [5]

V závodech na vysoké úrovni hraje roli každý detail. Přestože se závodní pneumatiky už nevyrábí ručně, žádné dvě pneumatiky nejsou identické. Před montáží pneumatiky na kolo je dobré každou pneumatiku zvážit a podle toho se rozhodnout, kam je lepší jí na vůz dát z hlediska rozvážení na jednotlivá kola. Někdy máme páry s různou tloušťkou běhounu. Pneumatiky s tlustší stěnou běhounu se obecně více zahřívají. Jejich namontování na přední nebo zadní nápravu záleží například na rozvážení vozu, jaká náprava je hnaná, charakteru trati nebo jízdní styl řidiče. Rozhodnutí uložení různých kol může ke konci závodu rozhodnout, jestli bude vůz mít character nedotáčivosti nebo přetáčivosti. Vždy je dobré pneumatiky prohlédnout a hledat možné konstrukční chyby, jako například prohlubeň (dip) nebo výrazný hrbolek (bump) v běhounu, případně osově nepřesně navinutý běhoun pneumatiky (skewed tread) viz obr. 26.



Obrázek 26 – Vady pneumatik [37]

2.4.2 HUŠTĚNÍ PNEUMATIK

Klasicky se pneumatiky hustí stlačeným vzduchem. Ten nemá konstantní vlastnosti. Především vždy obsahuje podíl vlhkosti. Po zahřátí pneumatik se vzduch uvnitř rozpíná a mění se tlak vzduchu v pneumatice, což může výrazně měnit jízdní vlastnosti vozidla. Na závodních vozech může tlak v pneumatice vzrůst například z 14 kPa až na 55 kPa. Toto je problém, a proto se testuje, jaký tlak v pneumatice po zahřátí koresponduje počátečnímu studenějšímu médiu. To přináší potíže s velmi nízkým tlakem v pneumatice při začátku jízdy (startem závodu), než se tlak dostane do ideálního rozmezí. Může dojít k protočení pneumatiky na dosedací ploše ráfku nebo k jejímu sesmeknutí. Tento problém má několik řešení. Závodní týmy hustí pneumatiky s často odvodněnými kompresory s aditivními vysoušecí vzduchu.

Jiné řešení je huštění pneumatik dusíkem. Pro získání asi 50 % benefitu používání tohoto inertního plynu stačí vypustit nasazenou pneumatiku a nahustit ji dusíkem. Daleko účinnějšího plnění dusíkem lze dosáhnout vakuováním pneumatiky po jejím nasazení na kolo.

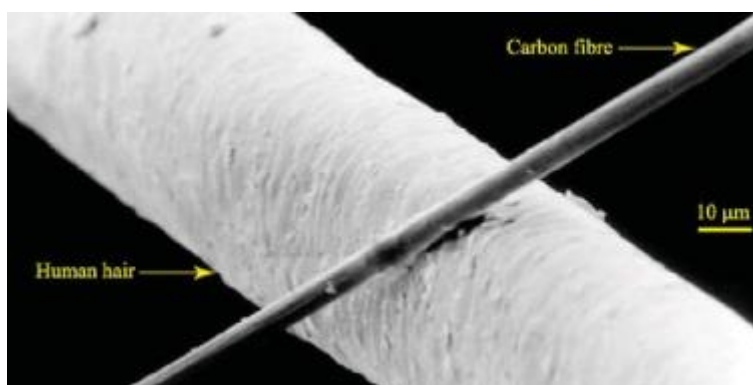
Další možností je použití přednastavených přepouštěcích ventilů, které odpouští tlak, jak se pneumatika zahřívá a nastavený tlak je během jízdy zachován.

2.4.3 VYVAŽOVÁNÍ KOL

Pro běžný provoz se kola vyvažují. Jejich nevyváženost má různé příčiny. Například nevyvážené pneumatiky z výroby, špatné usazení pneumatiky na ráfek, nerovnoměrné opotřebení běhounu pneumatiky, opravy pláště nebo deformace kola. V běžném provozu pneumatiky po nasazení ujedou tisíce až několik desítek tisíc kilometrů. Nevyváženost kola v tomto případě může mít negativní vliv na stav dalších částí podvozku, což může vést ke zkrácení servisního intervalu vozu, může produkovat hluk a vibrace, a tak horší komfort při jízdě. Velký vliv na intenzitu projevení nevyváženosti má rotační rychlost kola, tzn. rychlost vozidla. [9] V motorsportu se vyvažování kromě vysokorychlostních disciplín příliš neužívá. O komfortu jízdy se neuvažuje. V kabině závodního vozu jsou dominantní vibrace a hluk od jiných zdrojů, především od motoru a převodovky. Ještě důležitějším důvodem může být i velmi rychlé počáteční či úplné opotřebení pneumatik, a tedy buď vyvážení kola během jízdy či proměnlivost charakteru nevyváhy, které způsobí například poměrně časté probrzdění pneumatik závodních vozů při jízdě. U těchto aplikací má význam uvažovat i krátkou dobu mezi intervalem jejich výměny. Co se týče časového intervalu údržby závodního vozu, vibrace od nevyvážených kol patří pravděpodobně mezi minoritní ovlivnění. V samotné soutěži Formula Student se kola nevyvažují. Směsi pneumatik určených pro použití v soutěži Formula Student jsou velice měkké a jejich opotřebení se výrazně mění s každou prudkou akcelerací, brzděním i zatáčením. Za nevyvážeností kol a pneumatik může stát několik možných příčin. Může to být vlivem nevyváhy pneumatiky, nevyváhy ráfku nebo proměnné radiální tuhosti pneumatiky, případně ráfku. Ráfek nebo pneumatika mohou mít oválný, nebo dokonce nekruhový tvar. Každá tato varianta má několik možností a celkový charakter nevyváženosti ovlivní, zda jsou iregularity na sestavě kola s pneumatikou pouze v jedné části nebo se na kole radiálně opakují. Zda jsou úhlově souměrné či ne. Možností důvodu nevyváhy je mnoho.

3 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY NA BÁZI POLYMERŮ

Materiály jsou považovány za kompozitní, pokud je tvoří dvě nebo více vrstev různých materiálů. Tyto kombinace jsou tvořeny tak, aby se materiály svými vlastnostmi navzájem doplňovaly. Tímto způsobem lze u kompozitních materiálů dosáhnout skvělých vlastností. Celkové charakteristiky nabízí nové konstrukční možnosti a v mnohých případech překonají použití kovových materiálů. Kompozity jsou oproti konvenčně užívaným materiálům odlišné svým chováním. Většina konvenčně používaných materiálů je homogenní a izotropní. To znamená, že mají ve všech směrech stejné vlastnosti. Konstrukce součástí s jejich využitím je jednodušší. Naproti tomu kompozitní materiály jsou většinou nehomogenní a anizotropní. Chovají se při zatěžování v různých směrech různě. Pro splnění požadavků na použití při složitých návrzích je nutné studovat mikro i makro mechaniku kompozitních materiálů. Kompozitní struktury se často skládají z milionů vláken. Na obrázku č. 27 je pro představu velikost uhlíkového vlákna. [21]



Obrázek 27 – Porovnání uhlíkového vlákna s lidským vlasem [44]

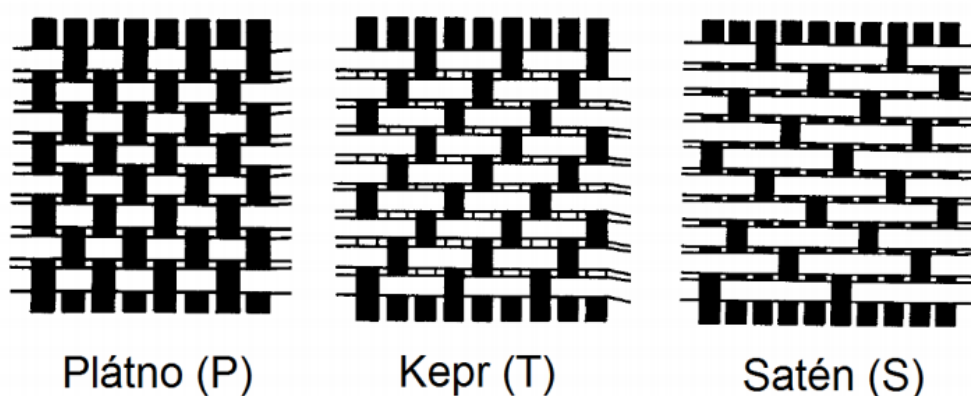
Využití kompozitních materiálů je v mnohých případech přínosné. Jejich výhody se odráží na ceně výrobků. Výroba s použitím těchto materiálů je často pracná a časově náročná. Méně komplexní výrobky lze automatizovat, a tedy snížit jejich cenu.

Pro potřeby této práce je uvažováno pouze o kompozitních materiálech na bázi polymerů FRP Fiber Reinforced Plastic. Ještě konkrétněji se uvažují pouze matrice typu termoset, které mají po vytvrzení například výhodu udržení si tvaru podle typu 80 až 165 °C. FPR kompozity se zmíněným konkrétním druhem se díky své možnosti vytváření lehkých, ale zároveň pevných struktur, chemické a tepelné odolnosti, používají v letectví, motorsportu a dalších sportech. Kompozity na bázi polymerů se skládají z pojiva a výztuží. [22]

Optimálně navrhnuté a vyrobené kompozity jsou takové, které celé na ně působící zatížení přenášejí výztuži. K tomu je potřebné vytvořit kvalitní spojení výztuže a matrice. Pro zajištění dobrého spojení se na vlákna nanášejí tenké filmy, které zvýší pevnost vazby s matricí. Toto je dnes běžně zavedeno do procesu výroby tkanin. Pro konkrétní výrobu dílů je následně velice důležité vyvarovat se laminování s vlhkými tkaninami. Z tohoto důvodu se tkaniny samotné například na 24 hodin vakuují se stálým odsáváním. Vlhkost se díky sníženému tlaku začne i za běžných pokojových teplot vypařovat a je tak odstraněna. Jinou možností je tkaniny dát do pece. Jejich teplotní odolnost je popsána v kapitole 3.1.1.

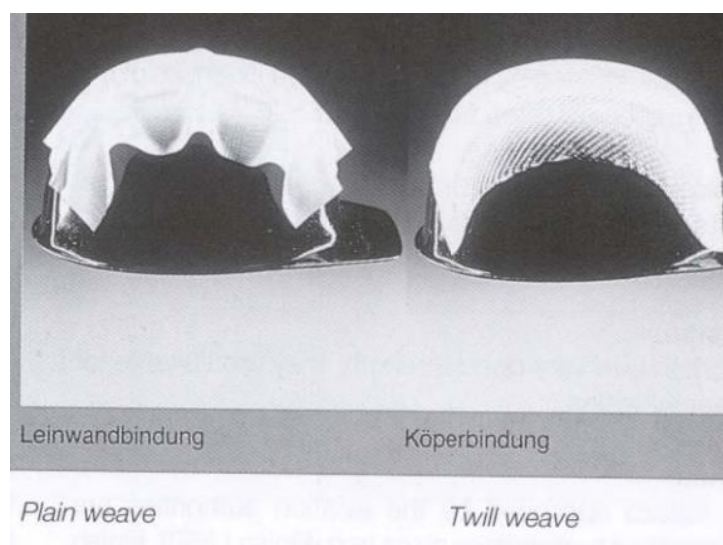
3.1 VÝZTUŽE

Samostatná vlákna se jako konstrukční materiál běžně nepoužívají. Využívá se jich v rámci kompozitů jako výztuží. Výztuže z velké části definují mechanické vlastnosti materiálu. Jsou namáhány především tahovými silami. Používají se především skelná, uhlíková a aramidová vlákna. Pro skořepinové kompozitní konstrukce se používají dlouhovláknové pásy jednosměrné (UD – Uni Directional) či křížové tkaniny z polymerních vláken. Jednosměrné uspořádání má ve svém hlavním směru sice výbornou odolnost vůči tahovému zatížení, nelze však téměř tvarovat, to platí o většině tzv. plochých tkanin. Křížové tkaniny se díky svému intenzivnímu propletení ve svých vláknech mírně periodicky prohýbají, dohromady s matricí se poté mají tendenci chovat jako pružiny. Křížové tkaniny se dále dělí na několik typů dle vazeb. Do těchto patří vazba plátnová (plain), saténová (satin) a keprová (twill) viz obr. 28.



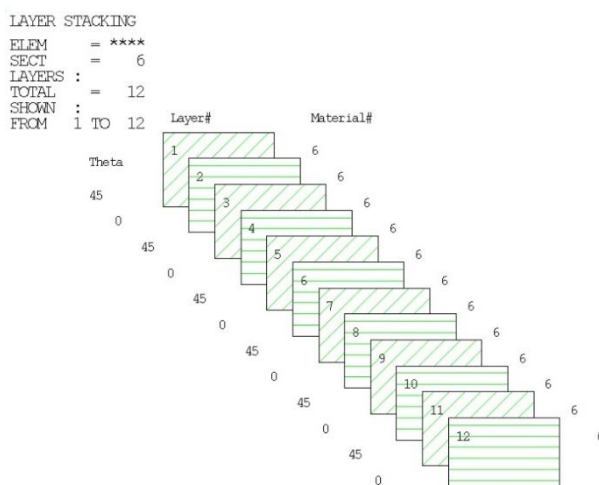
Obrázek 28 – Druhy vazeb výztuží [23]

Pro optimalizaci pevnosti a hmotnosti dílů lze kombinovat na jejich geometrii tkaniny různých vazeb. Pro začátek je na složitě geometrie vhodná hlavně tkanina s keprovou vazbou kvůli její schopnosti oproti dalším dobře kopírovat povrch viz obr. 29.



Obrázek 29 – Přizpůsobení plátnové a keprové vazby povrchu [24]

Jednotlivé dlouhoválkové jednosměrné i vícesměrové výztuže se pokládají na sebe do vrstev s různými natočeními pro homogenizaci vlastností ve více směrech. Záleží na aplikaci, úrovni expertízy. V rámci pravoúhle tkaných vláken se většinou vrstvy dávají na sebe s rovinným úhlovým posunutím 45° s minimálně 2 vrstvami, případně s pootočením o 30° s minimálně třemi vrstvami. Roli může hrát i použití tzv. hybridních tkanin, tedy tkanin s více druhy vláken, například kombinace aramidových vláken s uhlíkovými. Jako příklad je na obrázku ilustrační návrh skladby tkanin gramáže 420 g/m^2 s vazbou kepr.



Obrázek 30 – Příklad skladby tkanin

3.1.1 TYPY VLÁKEN

SKLENĚNÁ VLÁKNA

Skleněná vlákna (GF – Glass Fiber) mají průměr $3,5\text{--}24 \text{ }\mu\text{m}$. Skleněná vlákna jsou izotropní. Při teplotě 250°C vykazují téměř neměnné mechanické vlastnosti prodloužení. Dobré mechanické vlastnosti vykazují do teploty až 625°C . Jsou nehořlavá. Mají malou elektrickou vodivost, stejně tak teplotní roztažnost. Existuje několik jejich druhů. Rozdělují se na vlákna s vyšší vlastností s označením S, vlákna s vynikajícími elektrickými izolačními vlastnostmi s propustností záření s označením E nebo s chemickou odolností proti kyselinám s označením C. Výroba skleněných vláken je řešena tažením taveniny, skládající se z křemičitého písku, vápence, dolomitu, kyseliny borité a kazivce, o teplotě 1400°C z trysek. Tavení je energeticky velice náročný proces, protože probíhá i několik dní, aby se zajistila homogenizace taveniny. Vlákna poté odcházející z trysky z platinové slitiny, mají asi 2 mm v průměru. Postupně se poté vlákna natahují až na zmíněné hodnoty podle požadovaných mechanických vlastností. Vlákna se poté povrchově povlakuji lubrikantem pro ochranu vlákna, lepší manipulaci a spojení s matricí. Vlákna se zpracovávají do nití, pramenců, rohoží z kontinuálních nebo sekaných vláken a tkanin (plátno, kepr, satén, trojsměrové tkaniny atd.)

ARAMIDOVÁ VLÁKNA

Aramidová vlákna (AF – Aramid Fiber) vytvářejí dlouhé lineární řetězce s aromatickým jádrem spojené kovalentní vazbou, což tvoří jejich vysokou pevnost a tuhost v tahu. Odhadovaná teoretická mez pevnosti je 200 GPa. Výroba vláken z taveniny není možná, protože teplota tavení se nachází nad teplotou nevratného tepelného rozkladu. Spřádá se z 20% roztoku o vysoké viskozitě v koncentrované kyselině sírové. Poté se vlákna propírají, neutralizují, suší. Zlepšení mechanických vlastností se docílí prodlužováním. Paradoxně se se snižováním průměru vlákna zvyšuje jeho pevnost. Vlákna mají záporný součinitel teplotní délkové roztažnosti. Měrná hmotnost aramidových vláken je pouhých 1,45 g.cm⁻³. Jsou velice anizotropní, citlivá na tlak působící v podélném směru. Odolnost aramidových vláken vůči teplotě je okolo 300 °C. Jejich následné zpracování je obtížné. Velice špatně se stříhají nebo sekají. Následné obrábění nebo broušení po vytvrzení je také obtížné, neboť často se vlákna místo oddělení na rozhraní vytáhnou z výztuže dílu. Zajímavostí je, že aramidová vlákna jsou hydrofilní. Absorbovaná vlhkost ale samozřejmě snižuje pevnost a kvalitu spojení s matricí, proto se musí před laminováním připravit. Tato příprava je popsána v následujících odstavcích.

UHLÍKOVÁ VLÁKNA

Uhlíková vlákna (CF – Carbon Fiber) mají velice vysokou pevnost, Youngův modul pružnosti v tahu, tuhost, ale i nízkou tažnost. Vysoký modul pružnosti v tahu a pevnost trvá až do 500 °C. Uhlíková vlákna jsou kromě oxidačního prostředí mimořádně odolná vůči korozi, mají dobrou elektrickou a tepelnou vodivost, nízkou hustotu 1,6 - 2,0 g.cm⁻³, jsou silně anizotropní, jsou křehká, snadno se lámou, jsou vysoce odolná proti dynamickému namáhání.

Běžně se vyrábí buďto z polyakrylonitrilu (PAN) nebo ze surovin bohatých na uhlík. To jsou obvykle smoly.

Výroba z polyakrylonitrilu probíhá ve třech stupních. Nejprve probíhá oxidace materiálu za 200 až 300 °C, poté karbonizace za maximální teploty 1 600 °C, následně grafitizace do 2 500 °C. Zjednodušeně se tedy vlákno navíjí se stupňující se teplotou a nakonec se ochladí a navine pro další zpracování. Ve fázi oxidace se PAN vlákna za zvýšené teploty natahují. Přitom nastává dehydratace a změna mikrostruktury nitrilových skupin na žebříčkový polymer. Ve druhém stupni se v inertní atmosféře karbonizací struktura žebříčkovitá přemění na grafitickou. Tato struktura má vysokou hodnotu pevnosti. Speciální vysokopevnostní vlákna mají mez pevnosti 5 GPa. Lze připravit i vysokomodulová vlákna s Youngovým modulem pružnosti v tahu 400 GPa, čehož se dosahuje další tepelnou úpravou za teploty 2500 °C. Standardně vyráběná mez pevnosti je přibližně 3,5 GPa a Youngův modul 230 GPa.

Smoly pro druhou možnost výroby uhlíkových vláken jsou z kamenouhelného dehtu nebo z dehtů vzniklých při destilaci ropy. Smoly se zpracovávají při 350 °C na tzv. mezofázi (přechodná fáze mezi krystalickou a kapalnou fází), která je anizotropní a obsahuje kapalně krystaly. Tento speciální stav umožňuje při spřádání získat vysoce orientovanou strukturu. Poté se zahřeje až na 2 000 °C, čímž nastává karbonizace, přičemž se zachovává směr. Po následném žíhání v teplotě 3000 °C. Tímto způsobem lze získat vlákna s Youngovým modulem pružnosti v tahu o hodnotě 700 GPa, avšak se sníženou mezí pevnosti o hodnotě 2 GPa. Také lze rozdělit následovně. Vysoce pevné vlákno (HT) má roviny vrstev převážně rovnoběžné s osou vláken. Vlákno s vysokým modulem pružnosti (HM) má roviny vrstev zcela rovnoběžné s osou vláken. Sekaná vlákna s nízkou pevností (LM) nemají žádnou přesně danou orientaci, jde o velmi slabé uspořádání vláken v osovém směru. [22]

3.2 MATRICE

Matrice (pojivo, pryskyřice), je část kompozitu vytvářející jeho kontinuální fázi a zároveň obklopuje druhou fázi, výztuže. Matrice po zpracování zajišťuje geometrickou polohu vláken a tvarovou stálost výrobku. Dále zprostředkovává přenos sil na vlákna a mezi nimi. Zároveň také chrání vlákna před okolními vlivy. Zásadním faktorem pro vytvoření kvalitního kompozitu je zajištění adheze na fázovém rozhraní vlákno-matrice. Adheze na tomto rozhraní je dána zejména viskozitou a povrchovým napětím pro dokonalé smočení vlákna a vytvoření fáze bez bublin. Zlepšení vazby se docílí nanesením povrchové vrstvy apretace na vlákna podle použité matrice. Značný rozdíl je ve viskozitě těchto skupin. Termosety mají významně nižší viskozitu než termoplasty. I z důvodu snadnějšího zpracování jsou termosety rozšířenější, ale je to ovlivněno dalšími vlivy, například teplotní odolností termosetů. Dalším jejich kladem je, že energetické nároky na impregnaci vláken jsou nižší. Přidáním tvrdidel, které iniciují polymeraci pryskyřic, urychlovačů, které urychlují síťování, dále katalyzátorů, aldehydů, které ovlivní exotermní teplo reakce, kterou se termoset vytvrdí a tím získá své výsledné mechanické vlastnosti, jako pevnost, tuhost, odolnost vůči teplu a chemickému působení, křehkost a nízkou houževnatost. Termoplasty vynikají svojí houževnatostí a jsou šetrnější k životnímu prostředí. Zpracovávají se pouze roztavením/ztuhnutím matrice. Lze je také recyklovat. Pro výrobu lehkých kompozitních pevnostních konstrukcí se ale moc nehodí. Z tohoto důvodu je dále pojednáváno už pouze o termosetech.

3.2.1 REAKTIVNÍ MATRICE

Reaktivní matrice přísluší mezi termosety. Nejčastěji používanými materiály jsou kapalné nebo tavitelné reaktivní pryskyřice. Typově jsou nejvýznamnější nenasyčené polyesterové (UP-R), vinylesterové (VER), epoxidové (EP-R), fenolické (PF-R), metakrylátové (MA-R) a izokyanátové pryskyřice. Proces vytvrzování probíhá za doprovodu exotermní reakce, zvýšení viskozity a změnou objemu, konkrétně smrštění. Během procesu změny tekuté směsi na pevnou prochází pryskyřice bodem „gelace“ (gelation point), což je stav vytvrzování, kdy pryskyřice už není ovlivnitelná rozpouštědly. Úplné vytvrzení je stav, kdy pryskyřice prochází nejvyšší teplotou skelného přechodu T_g . Od tohoto bodu má materiál počáteční dobré materiálové vlastnosti. Ve skutečnosti probíhají další reakce, které pryskyřici vytvrzují. Temperaci v teplotě podle daného materiálu je tento proces urychlen a lze dosáhnout nejlepších výsledků. Reaktivní pryskyřice můžeme dále rozdělit na nenasyčené polyesterové a vinylesterové pryskyřice.

NENASYCENÉ POLYESTEROVÉ MATRICE

Nenasycené polyesterové pryskyřice UP-R jsou nejpoužívanější. Jsou to bezbarvé nebo nažloutlé roztoky v reaktivních rozpouštědlech, které lze vytvrzovat za pokojových nebo zvýšených teplot. Během reakce vždy vzniká reakční teplo a dochází k objemovému smrštění do 10 %. Tyto pryskyřice disponují velmi dobrou smáčivostí vláken, vysokou rychlostí vytvrzování, nízkou viskozitou a cenou. Potřebnou složkou je rozpouštědlo styren, které snižuje viskozitu, usnadňuje vytvrzení nebo zvyšuje chemickou odolnost pryskyřice. Ve větší koncentraci ale způsobuje křehkost. Zároveň je velkou zátěží pro životní prostředí. Vlastnosti lze upravovat příslušnými příměsemi, např. tepelnou odolnost nebo houževnatost zvýší kyselina tetrahydroftalová.

VINYLESTEROVÉ MATRICE

Vinylesterové pryskyřice VE-R jsou v porovnání s UP-R houževnatější a dražší. Vynikají chemickou odolností, proto se používají v různých korozních prostředích. Často užívanou skupinou jsou VE-R na bázi bisfenolu A. Disponují vysokou houževnatostí a odolností proti alkalickému prostředí. Na bázi fenolických pryskyřic je navýšena odolnost proti vyšším

teplotám a aromatickým uhlovodíkům. Hybridní vinylesteruretanové pryskyřice (VEU-R) spojují dobré mechanické vlastnosti, chemickou odolnost a odolnost proti vysokým teplotám. Teplota skelného přechodu je $T_g = 220\text{ }^{\circ}\text{C}$

EPOXIDOVÉ MATRICE

Epoxidové pryskyřice EP-R jsou za normální teploty kapalné až pevné látky, které vynikají dobrými mechanickými vlastnostmi, rozměrovou stálostí a přilnavostí k podkladu. Jsou vhodné pro dynamicky namáhané díly. Spolu s tvrdidly, kterými jsou například aminy (odolnost proti alkáliím), anhydridy kyselin (odolnost proti kyselinám), fenoly apod., které je nutné přidat v přesném stechiometrickém poměru (epoxidové číslo), vytváří epoxidové systémy nejrůznějšího chemického složení, a tudíž vynikají širokou škálou aplikací. Nevýhodou je vyšší cena (až čtyřikrát dražší než UP-R), pomalejší vytvrzení, vysoká viskozita, možnost podráždění kůže. T_g je vyšší než u UP-R a VE-R. Nejdůležitějšími typy EP-R patří bisfenol A a novolakové pryskyřice. [45]

3.3 TECHNOLOGIE TRANSFERU MATRICE DO VÝZTUŽE

Velký rozdíl ve výrobě kompozitních dílů je v implementaci matrice do výztuže. Počet metod sycení výztuží maticí je dnes obrovský. Kromě spíše speciálních procesů jsou základem všech operací v následujících podkapitolách. Výběru správného procesu výroby pro specifické použití by měla předcházet minimálně rozvaha, ale spíše analýza. Z hlediska výroby je vždy nutné posoudit možnosti výroby, to znamená, například jestli dosáhneme požadované kvality výrobku, jaká je požadovaná produkce, jaký smysl dává výroba dílu danou metodou finančně. Časový horizont projektu je jistě jedním z důležitých aspektů rozhodování. Každá metoda má svoje klady a zápory. Ať jde o možnosti výroby jednotlivých metod, pořizovací náklady na metodu, náklady výroby nebo požadovanou kvalitu. U každého přístupu k výrobě níže jsou uvedeny základní charakteristiky.

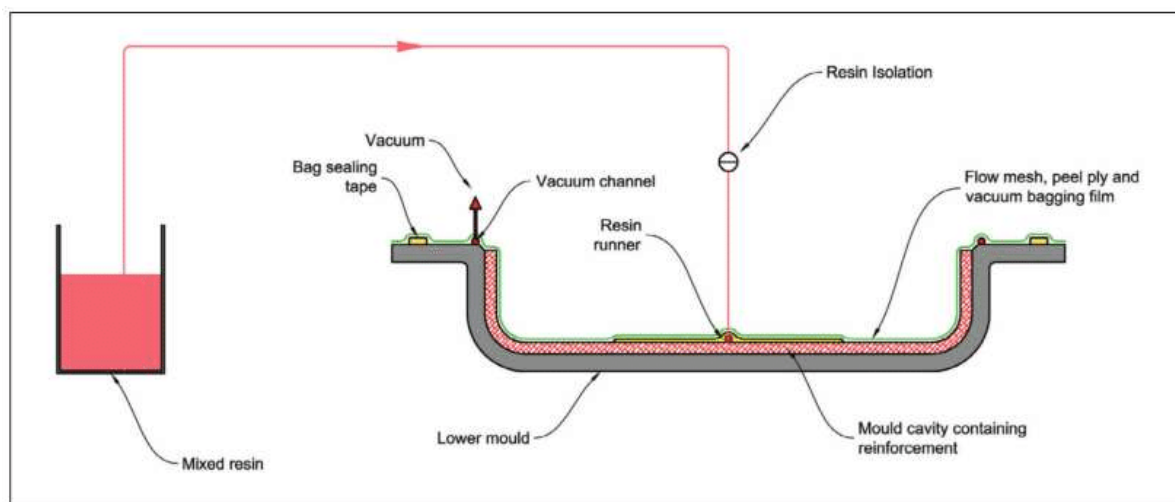
3.3.1 MOKRÉ LAMINOVÁNÍ

Jde o nejstarší a nejjednodušší metodu laminování. V případě technologie tzv. mokrým, resp. ručním laminováním se namíchané pojivo nanáší na výztuž do formy za atmosférického tlaku. Pro regulaci množství pryskyřice v kompozitu, tedy i kompaktnost a hmotnost dílu je vhodné použít další tkaniny a zavakuování dílu pro odsání nadbytečné pryskyřice vnesené do kompozitu. Vakuování kompozitu při výrobě je velice důležité pro předejití bublinám v matici. V případě technologie výroby mokrým laminováním není jednoduché aplikovat ideální množství pojiva pro dostatečné prosycení vláken se současným nepřidáváním zbytečné hmotnosti. Je to ale samozřejmě možné. Tímto způsobem je možné vyrobit malé i opravdu velké díly. Opakovatelnost s tímto procesem není jednoduchým úkolem. Metoda je obecně poměrně špinavý proces a je časově náročná. Není k ní potřeba téměř žádná počáteční investice, podobně ani co se týče spotřebního materiálu. Do velkoobjemové výroby se příliš nehodí kvůli své časové náročnosti a tedy neproduktivitě.

3.3.2 INFUZNÍ LAMINOVÁNÍ

Metoda je typicky stabilnější pro kvalitní prosycení tkanin a vytvoření hladkého povrchu laminovaného dílu. Metoda tkví ve vyskládání tkaniny do formy za sucha. Zde je velice důležité, aby byly výztuže opravdu suché. Následuje vytvoření rozvodné sítě pro vtok pryskyřice a odsávání vzduchu. Následně se díl zavakuuje a tkaniny se prosytí vsáním pryskyřice do celého dílu pomocí podtlaku. Počáteční investice do infuzního systému je větší než u mokrého laminování, ale není nijak závratná. O rozvodech v systému a tvaru formy je

dobré přemýšlet dopředu. Laminování pomocí infuze je kvalitní metoda vhodná pro díly od jednoho kusu po menší série. Stále se jedná o pomalejší proces, ale efektivita laminování více stejných dílů může být lepší než u mokrého laminování. Nevýhodou mohou být poměrně velké náklady na spotřební materiál při výrobě, formy obecně nemusí být nijak speciální. Náklady na jejich výrobu nenarostou. Metoda je vhodná od menších dílů až po díly typu trupy lodí, listové vrtule větrných elektráren, atp. Na obrázku č. 31 můžete vidět schéma infuzního laminování.



Obrázek 31 – Schéma infuzního laminování [46]

3.3.3 RTM

Někdy se tato metoda považuje jako za typ laminování infuzí. Hlavní rozdíl mezi těmito metodami je, že v případě RTM (Resin Transfer Moulding) se do výztuže nevtahuje matrice pomocí podtlaku, ale naopak tlakem. Metoda tkví v pumpování pryskyřice do suchých tkanin mezi 2 formy, tzn. že hotový díl má na obou stranách povrch podle formy. Metoda je vhodná pro libovolné velikosti dílů. Vyžadují vyšší vstupní investici v podobě systému na pumpování pryskyřice, následně její průběžné čištění a údržbu, u vysokotlakých systémů potom lisu na dotlačování forem, případně linky na automatizaci výroby. Formy na RTM jsou také obecně dražší. Jak drahé, to záleží podle konkrétní metody viz odstavce níže. Rozhodně se jedná o nejefektivnější výrobu kompozitů. Kromě údržby strojů je výroba bez dalších větších nákladů. Tyto systémy jsou vhodné pro díly od středních po velké série dílů. V některých aplikacích je možné nastavit pryskyřici tak, že je díl vytvrzený během několika minut. Pomocí RTM se vyrábí i většina strukturálních monokoků do závodních soutěží se sériovými chassis, jako některé druhy formule nebo LeMans vozů. [47]

ZÁKLADNÍ RTM

V rámci této metody se většinou vyrábí díly v laminátových tvarových formách vysoce vyztužených ocelovými konstrukcemi pro zvýšení tuhosti formy při stažení k sobě. Stažení částí forem do sebe je většinou realizováno šrouby nebo svorkami. Od pokročilejších metod se tato vyznačuje jedním vtokem pryskyřice a několika vyústěními pro výtok pryskyřice pod tlakem ven, když je díl nasycen pryskyřicí. Po dosažení této fáze se pumpování pryskyřice hned ukončí. Bolesť této metody je složité navržení forem tak, aby se celý díl prosytil pryskyřicí a aby odtoků zbytkové pryskyřice bylo ideálně dosaženo pryskyřicí ve stejný moment. Pro tuto nedokonalost se postupně od této metody v posledních letech odchází.

LIGHT RTM

Metoda Light RTM řeší hlavně problém základního systému RTM o nastavování formy na souběžné dosažení odtokových ventilů pryskyřice. Systém je zde v podstatě otočený. Do formy je buďto více vtoků pryskyřice nebo jeden vtok a následně rozvod pryskyřice okolo celé formy a jedno vyústění odtoku. Tímto způsobem se téměř dokonale eliminuje výroba zmetků s neprosycenými částmi dílu. Forma také často drží pohromadě díky vakuovanému lemu po obvodu formy, což výrazně zlevnilo formu a čas jejího zavírání. Nevýhodou metody je potřeba velké přesnosti dosedacích těsnicích ploch.

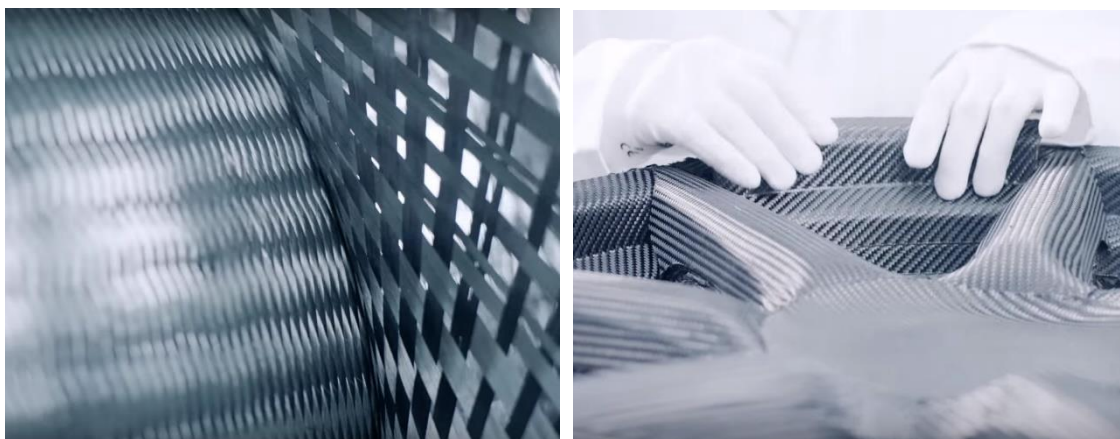
HP RTM

Vysokotlaká metoda (High Pressure) RTM je nejefektivnější metoda tvarových dílů, když pomineme mokré navíjení nebo půltruzi. Vyžaduje velké vstupní investice do tlakových systémů, systémů pro tlakové uzavření forem, formy jsou minimálně z hliníku, ale většinou ocelové přitlačené do sebe lisem. Dohromady s numerickým řezáním tkanin a automatizovaným vkládáním tkanin do formy jde o metody se skvělou opakovatelností. Tímto způsobem se vyrábí i chassis automobilů BMW i3 a i8. Jako příklad výroby je uvedeno karbonové kolo Porsche.



Obrázek 32 – Navíjecí zařízení pro výrobu ráfků Porsche kol [40]

Ráfková část je navinuta suchým tkaním v několika vrstvách. Disková část kola je následně přesně pomocí numerického plotru vyřezána z tkaniny, díly disku jsou natvarovány a vloženy do formy. Celé kolo se skládá z více než 200 dílů. Obrázek č. 33 ukazuje složené kolo.



Obrázek 33 – Výroba karbonových kol Porsche [40]

Celé kolo je pak uzavřeno do vysokotlakové formy, napuštěno pryskyřicí a vytvrzeno. Výroba kola tímto způsobem je velice přesná a rychlá.

3.3.4 PREPREG

Prepreg je tkanina nasycená pryskyřicí, jejíž vytvrzovací proces se nastartuje zahřátím. Po nasycení suchých tkanin touto pryskyřicí se prepreg z obou stran zabalí do neprodyšné fólie, aby byl chráněn před nečistotami a především vlhkostí. Prepreg se poté skladuje při velice nízkých teplotách, typicky kolem $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$, čímž se zpomalí vytvrzování pryskyřice. Od nasycení čerstvé pryskyřice výrobce většinou garantuje 8 až 12 měsíců životnosti prepregu skladovaného v mrazničce. Na pokojové teplotě může prepreg vydržet asi měsíc. V případě zahřátí před samotným laminováním je ale zničen. Započatá reakce vytvrzování je nevratná. Role skladované v chladu jsou navíc dobře zabaleny a je z nich odstraněno co nejvíce vlhkého vzduchu než se zmrazí. Při vyndávání role z mrazničky se musí nechat materiál pořád zatěsněný rozmraznout a ustátit na teplotu okolí, čímž se předchází kondenzaci vody na prepregu. Za pokojové teploty se prepreg dále zpracovává. Řezou se potřebné tvary kusů tkaniny a následně se prepreg skládá do naseparované formy. Po vyskládání všech vrstev do formy je forma dobře zavakuována a dává se vytvrdit. Dále se rozlišují prepregy pro použití mimo autokláv a pro autokláv. Prepreg pro použití mimo autokláv má často podobu pouze suché tkaniny s pryskyřicí v podobě fólie na vnější straně tkaniny. Tyto prepregy se většinou zavakuované vytvrzují v teplotně řízené peci. Typicky se metoda mimo autokláv používá hlavně na čistě kosmetické díly než funkční. Pro kvalitnější kompozitní díly se používá autoklávový prepreg. Autokláv je v podstatě řízená tlaková pec. Právě tlak, který na díl v autoklávu při vytvrzování společně s podtlakem zapojeným na pytlí dílu, dělá rozdíl v kvalitě finálních dílů. Autoklávy jsou obvykle schopné vyvinout tlak o velikosti 16 bar. Kompaktnost vrstev uhlíkových tkanin dohromady s přesně daným množstvím pryskyřice v prepregu dává dohromady s počítačově řízeným řezáním tkanin a přesným pokládáním vrstev do formy těmto dílům vysokou přesnost a opakovatelnost kvality výroby. Počáteční náklady pro celý systém autoklávu s příslušenstvím jsou relativně velké, prepregy jsou dražší než suché tkaniny s pryskyřicí zvláště a metoda skládání prepregu do složitých forem je časově náročná. Provoz autoklávu je poměrně levný a dohromady s formami, které mohou být vyrobeny z různých materiálů a poměrně levně se jedná o velice užitečnou metodu. V autoklávu je možné vytvrzovat více dílů současně. Záleží v podstatě na počtu vakuovacích konektorů autoklávu a jeho celkových rozměrech. Různá odvětví jako například letectví v současnosti například nepovoluje užití jiných dílů než vyrobených pomocí autoklávu.

Vytvrzovací cyklus je pro každou pryskyřici jiný a bývá uveden v materiálovém listu prepregu. Na počátku se navýší tlak na požadovanou hodnotu a postupně se podle daného teplotního gradientu zvedá teplota, přičemž se zvyšující teplotou klesá i viskozita pryskyřic a ta se tak dobře rozlije mezi vlákna. Aby pryskyřice dokonale nasýtila výztuž, bývá doba, kdy je pryskyřice velice řídká prodloužena. Velice důležitý pro vytvrzení je následně teplotní gradient pro klesání teploty v autoklávu. Nakonec se z autoklávu vypustí tlak a díly jsou vytvrzené. Velkou výhodou prepregu je ideální objemový podíl vláken a pojiva. To znamená dosažení předvídatelnějších vlastností součástí. Výsledná struktura není zbytečně přesycená pojivem, a to znamená konstantní hustotu a nižší hmotnost součástí. [24]

Příkladem výroby z prepregu jsou kola Koenigsegg. Je to dobrá volba pro kvalitní produkci malých sérií. Části prepregu jsou řezané na plotru a poté ručně skládány na formu. Vyskládání jednoho kola trvá více než 30 hodin.



Obrázek 34 – Výroba karbonových kol Koenigsegg [41]

4 POŽADAVKY NA NÁVRH KOLA

Pro správnou funkci kola a jeho začlenění do soustavy je nutné zohlednit několik požadavků na jeho návrh. Jelikož je kolo určeno pro užití v soutěži Formula Student v roce 2019, základním požadavkem je soulad s pravidly této soutěže. [19]

O konstrukci kol formule se pravidla zmiňují ve třech bodech:

- Kolo s upevňovacím systémem užívajícím jediný centrální šroubový spoj musí být opatřeno zařízením pro zajištění proti povolování. Tzv. kontra matice tomuto požadavku nevyhovuje
- Standartní upevňovací šrouby či matice musí být vyrobeny z oceli. V případě použití upravených zajišťovacích prvků je nutné prokázat důkaz, že tato úprava proběhla za správných inženýrských praktik.
- Upevňovací šrouby nebo matky mohou být vyrobeny z hliníku, ale musí projít povrchovou úpravou pro tvrdé eloxování a musí být viditelně neopotřebované.

Navrhované kolo je určeno k použití na monopostu Dragon 9. To udává velké množství dalších požadavků na návrh. Obecně je vozidlo navrženo pro maximalizaci potenciálu pneumatiky Continental C 19 205/470 R13. Jedná se tedy o kolo jmenovitěho průměru 13'' a šířce 7''. Kola OZ Racing z hořčíkové slitiny o průměru 13'' používaná na předešlých modelech jsou zaměnitelná. Také má doporučené specifické rozměry dané výrobcem pneumatik. Návrh kola v této práci musí být naprosto zaměnitelný s kolem OZ Racing. V případě nedostatku materiálu pro výrobu více kol, nestihnutí zatěžovacích testů nebo poruchy karbonových kol je potřeba mít spolehlivou alternativu. Ve smyslu této zaměnitelnosti je návrh částečně inspirován geometrií dosedací plochy kola na náboj, otvorů pro unašecí kolíky a kuželové plochy pro centrální matici. Zális musí být rovněž stejný. Monopost je konstruován na maximální povolenou šířku vozidla danou pravidly. Důležitá je geometrie v místě dosednutí pneumatiky, konkrétně tedy geometrie okraje ráfku, dosedací plocha ráfku pro pneumatiku, bezpečnostní profil FL proti sklouznutí pneumatiky směrem dovnitř ráfku, prostor zahloubení v oblasti ráfku pro usnadnění obutí pneumatiky. Nové kolo nesmí být v kolizi s žádnou další částí vozu. Je nutné dbát především na těsnou zástavbu okolo brzdového třmene, brzdového kotouče a těhlice.



Obrázek 35 – Prvky v kontaktu s kolem

Tento typ konstrukce přináší nutnost řešení dalšího problému, který nesmí být opomenutý. Brzdy a pneumatiky během jízdy generují velké množství tepla. U brzd byla naměřena teplota 110 °C, pneumatiky běžně operují okolo teploty 60 °C. Různými mechanismy přenosu tepla mohou tyto aspekty ovlivnit kompozitní kolo. Ať už přenosem tepla materiálem nebo zářením. Z tohoto důvodu by kolo nemělo být na vnější straně příliš uzavřené. Toto je obzvláště důležité u celokarbonových kol. Konstrukce ráfku a diskové části kola, tzn. hlavně jeho paprsky je navržena pro maximalizaci tuhosti a pevnosti skořepinové součásti. Na tento problém se musí u návrhu myslet. Možností jsou konfuzory směřující vzduch ze směru jízdy do prostoru kola ze strany monokoku. Běžnou ochranou je obalení povrchu po vnitřním obvodu kola tepluvzdornou fólií.

Kolo musí být geometricky velice přesné. Na kolo musí dobře dosednout a těsnit pneumatika. Už při malé odchylce průměru dosedacích ploch ráfku by mohla za jízdy pneumatika prokluzovat a přitom ucházet. Stejně tak přesný musí být bezpečnostní profil proti sesmeknutí pneumatiky do prohloubené středové části ráfku. Přesnost hlavy kola je důležitá, co se týče nastavení přesnosti rotační osy kola. Celá vnitřní skořepina kola musí být přesná, aby kolo nekolidovalo například s brzdovým třmenem. Osově souměrné kolo dále souvisí s dosedací plochou centrální matice. Ta musí být dokonale vystředěná. V případě, že by nebyla, nelze do celé plochy dotáhnout centrální matici. Ta by se mohla za jízdy i přes pojistné závlačky uvolnit, povolit a mohlo by to skončit i ztrátou kola za jízdy. S osovou přesností souvisí i dosedací plochy ráfku. Vyosení by generovalo házení kola a jeho vibrace.

Vyrobené kolo musí vydržet cyklické namáhání v tomto tepelném prostředí, odolávat přenášeným silám během maximální akcelerace, plného brzdění, ustálený stav zatáčení na hranici limitů adheze pneumatik nebo rázy při průjezdech nerovností ve vozovce. Nebezpečným stavem je i huštění pneumatiky pro její dosednutí na ráfek nad její obvyklý operační režim. Kolo musí jednoduše být velice pevné, aby vydrželo všechna namáhání. Také musí být velmi tuhé. Kinematika podvozku je navržena pro maximální využití potenciálu pneumatiky, ale počítá primárně s absolutně tuhým systémem podvozku. Žádná součást není nekonečně tuhá, ale musíme se k ní snažit přiblížit v rámci kompromisu s malou hmotností součásti. Tato tuhost musí být také souměrná, s čímž v případě laminátového kola souvisí správné umístění a natočení všech vrstev tkanin. Pro co největší tuhost a pevnost je úmyslem mít na díle co nejdelší nepřerušená vlákna.

Na voze Formula student je často kontrolován nebo měněn tlak v pneumatikách. S tím souvisí dobrý přístup ke vzduchovému ventilku. Vzduchový ventilek musí být na kole umístěn v axiálním směru, aby za jízdy nedocházelo setrvačnými silami k ucházení kola. Ventilek musí být lehký a spolehlivě těsný. V rámci servisovatelnosti se dále musí uvažovat teplotní roztažnost náboje a vložky kola, aby i po zahřátí šlo dobře vyměňovat. Dalším aspektem je montáž a demontáž pneumatiky. Laminátové kolo bude jistě křehčí než doposud používaná kovová kola. Částečně se k nim musí změnit přístup servisní technika, ale pro zajištění bezproblémového servisu kol je dobré navrhnout na to vhodný přípravek.

5 KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ

Pro návrh konstrukčního řešení kompozitního kola bylo využito CAD systému PTC Creo Parametric 3.0, který je hlavním modelačním programem pro vývoj monopostu Dragon 9 v týmu TU Brno Racing. Je také hojně využíván v praxi.

Pro případ této práce je nejvhodnější užití uhlíkových vláken. Ta jsou pro svůj poměr vysoké pevnosti ku nízké hmotnosti nejvíce využívána. Přesnější označení použitého materiálu je CFRP Carbon Fiber Reinforced Plastic.

Výroba kola z prepregu je primární volbou. Po vyrobení kol z prepregu je ale v plánu vyrobit kolo i infuzně a porovnat následně jejich vlastnosti. Mezi důvody volby výroby kola z prepregu s vytvrzováním v autoklávu patří větší garance finálních vlastností součástí, konstantní hustota materiálu, tzn. vyšší váhová přesnost. S tím souvisí i vyváženost součástí. Mezi vazbami je základem typ twill, neboli kepr. Tyto tkaniny jsou obecně velice přizpůsobitelné povrchu a pro takovéto konstrukce jsou jasnou volbou. V nižších gramážích je přizpůsobitelnost výraznější.

Rozhodně jednodušším konceptem kol na výrobu jsou semikarbonová kola. Jako úvod do výroby vlastních kol z kompozitních materiálů by se jednalo i tak o docela složitý projekt. Tyto koncepty kol také skrývají velký potenciál pro odlehčení. Filozofií pro tento typ by bylo odlehčení především po obvodu kola. Tato změna hmotnosti na kole má větší podíl na zmenšení vlastního momentu setrvačnosti kola, což by pomohlo celkovému chování vozu. Semikarbonová kola na druhou stranu přinášejí problematiku zajištění šroubů proti povolování a v případě kol s radiálními šroubovými spoji i se zajištěním těsnosti kola. Stejné problémy vykazují i kola z dvoudílných ráfků sešroubovaných v boční rovině.

Semikarbonová a celokarbonová kola jsou velmi rozdílná a jejich problémy jsou odlišné. S vizí vytvoření základu znalostí a zkušeností s výrobou kompozitních kol pro mě samotného a budoucí generace studentů v týmu TU Brno Racing byl pro tuto práci vybrán typ celokarbonových kol. Navzdory omezeným lidským zdrojům a časové náročnosti domluvení partnerů pro podporu tohoto projektu, koncepčního a konstrukčního návrhu, materiálových testů, výroby forem a výroby kol v oblasti technologicky náročné výroby kompozitů je to koncept s vizí nejlepších možných dosažitelných parametrů kola. Proto byl jasnou volbou.

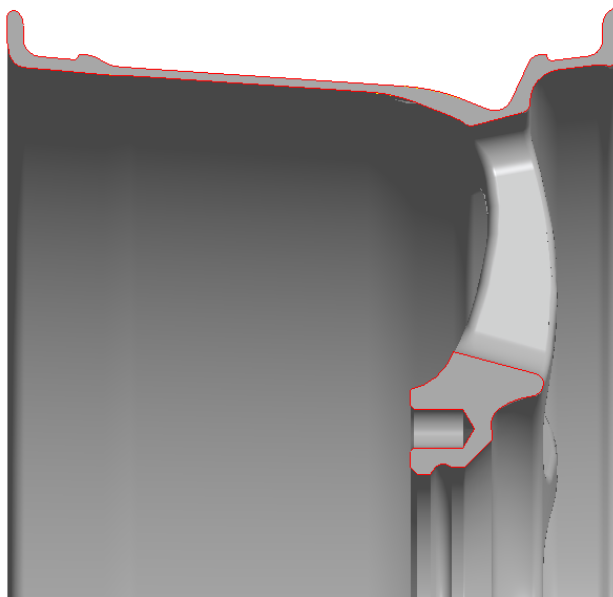
5.1 KONSTRUKCE KOLA

Jelikož hořčíkové kolo OZ Racing 13“ x 7“ s centrální maticí je doporučeno výrobcem použitých pneumatik Continental C19, byl vytvořen jeho přesný model podle výkresu výrobce. [33] Části tohoto modelu jsou základem nebo alespoň vzorem pro porovnání s navrhnutou geometrií.



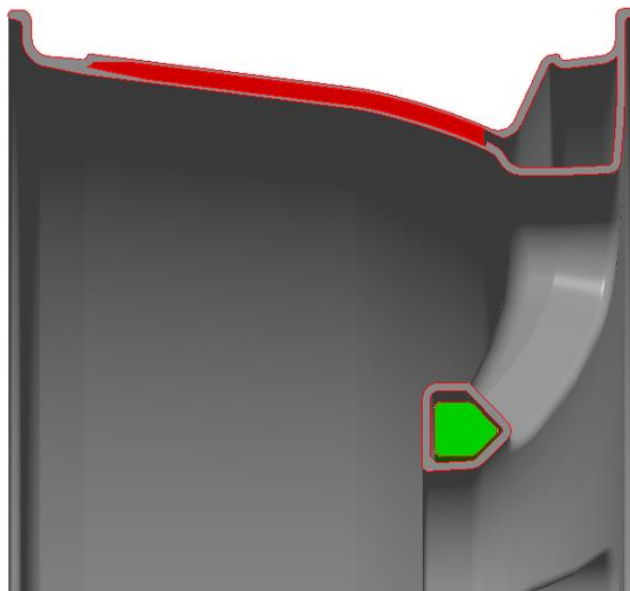
Obrázek 36 – Model hořčíkového kola OZ Racing

Uložení pneumatiky bylo u tohoto kola inspirováno fungující a doporučenou geometrií ráfku. Jedná se asymetrický ráfek o průměru vnějšího vrcholu dosedací plochy pro pneumatiku o průměru přesných 329,4 mm s oboustrannou tolerancí 0,2 mm. Dosedací plocha je skloněná pod úhlem 4°. Okraje jsou ploché a mají standardní výšku 17,3 mm. Ráfek má bezpečnostní profily tvaru flat hump. Blíže k vnější straně kola je ráfek prohlouben pro usnadnění montáže pneumatiky na ráfek. Pro návrh vnějšího tvaru skořepiny ráfku byla vytvořena stejná geometrie opěrné části okraje ráfku, dosedací plochy ráfku a částečně geometrie bezpečnostních profilů. V soutěži Formula Student se nejednou opomenulo použití zpětných hran na ráfku proti sklouznutí pneumatiky za jízdy. Při operačních tlacích pneumatik okolo hodnoty 0,6 bar je to nezbytný prvek kola. Na obrázku č. _ je příčný tvar průřezu kola OZ Racing Magnesium 13“.



Obrázek 37 – Příčný průřez kolem OZ Racing magnesium

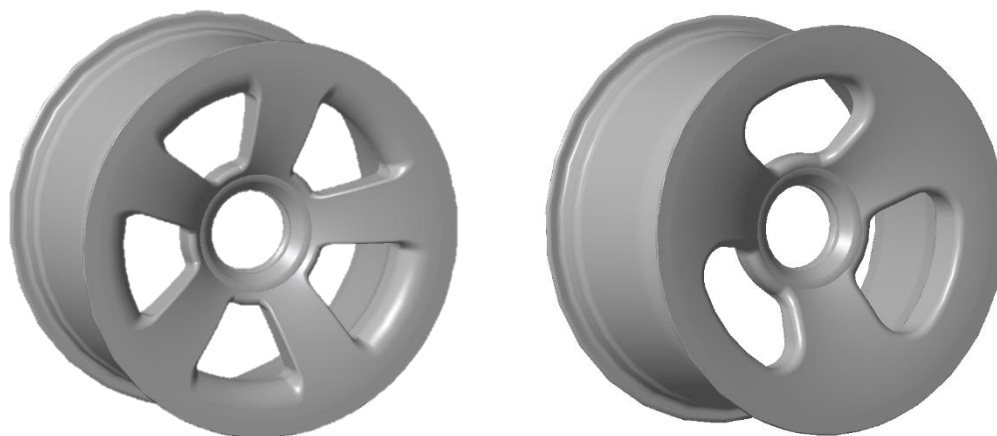
Ráfková část kola byla ale do velké míry upravena. Konce okrajů ráfku byly ohnuty do alternativy k tvaru J s myšlenkou aditivního přidání tuhosti kola. Jde ale spíše o okraj tvaru L. Bylo zkontrolováno, aby tato změna nerozšířila celkovou šířku vozu, kterou definují pravidla. Okraj je ale stále užší, než pneumatika.



Obrázek 38 – Příčný průřez navrhnutým karbonovým kolem

Dlouhá vnitřní stěna ráfku byla rozšířena pro vytvoření prostoru pro vložku v podobě límce ze strukturální pěny Rohacell. Tímto způsobem od sebe mohou být vzdáleny potahy kompozitu a vytvořena daleko tužší sendvičová kompozitní struktura. Vytvořená prostorná geometrie v této části umožní změnu skladby skořepiny v případě, že by se navržená skladba potahů ukázala po testování jako nedostatečná z hlediska malé tuhosti či pevnosti nebo naopak. Ráfek obecně nepatří mezi nejnebezpečnější části kola. Ráfková stěna byla více skloněna dovnitř kola. Touto úpravou bude zatížení částečně převedeno do tahu a tlaku spíše než ohybového druhu namáhání. Na vnitřní straně kola je pořád dostatečná rezervní mezera od brzdového těmnu o velikosti 5 mm, která je předepsaná i výrobcem OZ Racing. Ve formě se tím také zvětšil pozitivní úkos pro lepší sejmutí dílu z formy. Sklonem této stěny bylo také zvětšeno prohloubení v ráfku pro snazší montáž pneumatik. Touto úpravou se zároveň přesunul jistý materiál blíže ke středu otáčení a tím se může snížit osový moment setrvačnosti kola. Součástí úpravy bylo mírné napřímení vnitřní stěny paprsku kola do radiálního směru kola. Jde o vnitřní plochu ráfku v prohloubení na pravé straně obrázku č. 38. Smyslem této úpravy je odstranění dvojitého prohnutí jinak možného tvaru jedné linky, a tedy namáhání stěny kola na tlak (například při průjezdu velkou nerovností). Na druhé straně hlava kola byla také upravena. Byl zachován zális ET 30 mm s oboustrannou tolerancí 0,5 mm podle výkresu výrobce. Dosedací rovina hlavy kola byla až na zaoblení geometrie nezměněna. Na druhé straně hlavy byl zachován sklon dosedací plochy centrální matice o hodnotě 45° k ose kola. Dále byla hlava zbavena dalších drážek, ostrých hran a následně se upravovala velikost hlavy podle tloušťky uhlíkového potahu versus hliníkové vložky. Vložka je v tomto místě tlakovou oporou potahů pro dotažení centrální maticí na náboj utahovacím momentem až 140 N.m. Samotný kompozit nemá dobré vlastnosti na otlak ve směru podélných vláken. Proto byl za materiál středové vložky zvolen hliník navzdory své odlišné teplotní roztažnosti oproti karbonovému kompozitu.

Další na řadě tedy byla úprava diskové části kola a prvotní nastavení tvaru a následně počtu a tvaru paprsků. Bylo vyzkoušeno několik variant. Při návrhu se uvažovalo nad možnostmi výroby laminátových dílů a konkrétně zvolené technologie výroby pomocí prepregu a autoklávu.

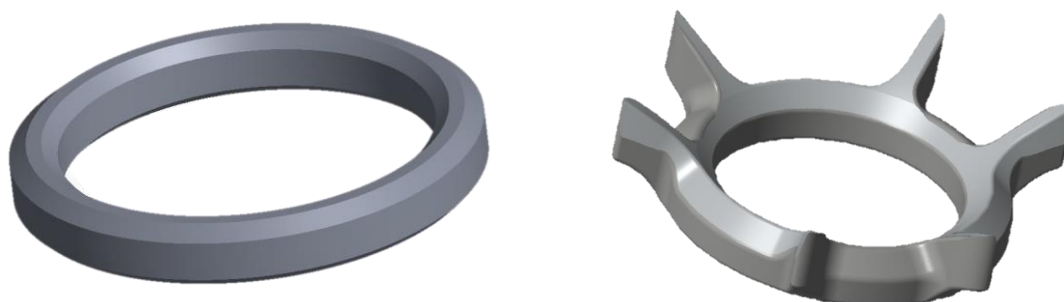


Obrázek 39 – Koncepty paprsků disku kola

Paprsky mají tvar rozšiřujícího se profilu o víceméně obdélníkovém průřezu se zaoblenými rohy s vizí maximalizace tuhosti paprsků ohybem. Limitní zátěžné stavy kola brzděním i zatáčením se totiž na paprsek projeví jako na ohyb. Byl zvolen koncept s třemi masivními paprsky především pro zjednodušení výroby. Pro výrobu se musí dopředu myslet na návrh kola vzhledem k dělicí rovině forem, typu formy, metodě výroby dílu. Dělicí rovina formy definuje, jaké úkosy musí následně mít všechny plochy dílu na obě strany od ní. Nesmí zde být žádné negativní úkosy, aby bylo vůbec možné díl z formy vyndat. Minimální doporučená hodnota úkosu je 3° , ale i to je u tuhých částí nebo větších ploch a pro rotační díly opravdu málo. Čím více, tím lépe, co zástavba dovolí. Stejně tak se snažíte zamezit všem ostrým hranám na díle, které by mohly tvořit vruby dílu a být potenciálním kritickým místem kola. Pokračování návrhu bylo postupně odladit tvar odebráním všech ostrých tvarů, přesná definice dělicí roviny a maximalizace úkosů směrem od dělicí roviny kola. Ve středové části podle toho byl poté finalizován tvar hliníkové vložky.

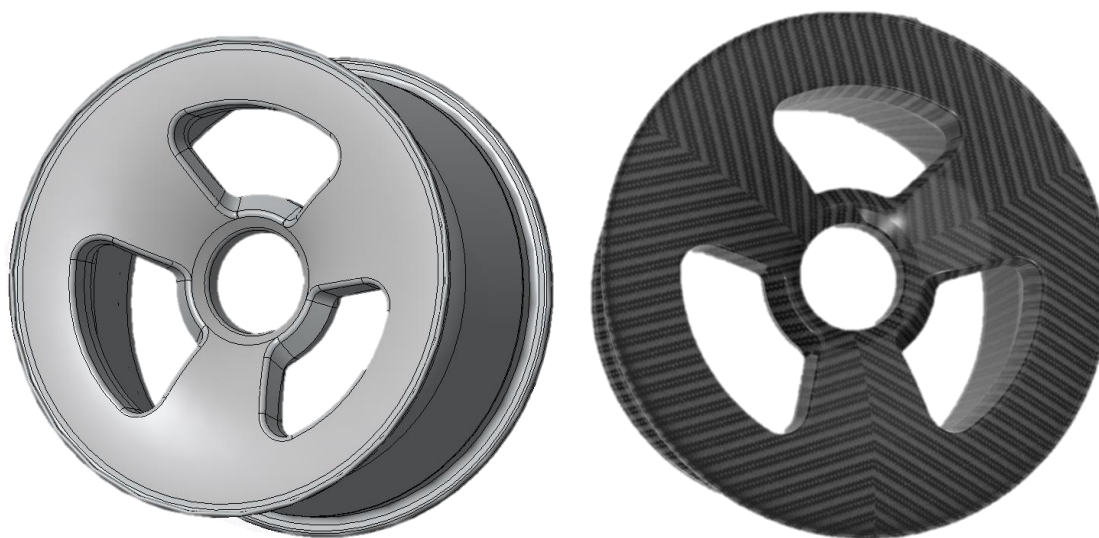
Do hlavy kola je na závěr výroby vytvořeno 16 souosých děr úhlově posunutých o $22,5^\circ$ pro unášecí kolíky náboje, možnosti využití více děr v případě otláčení některé z variant a také pro odlehčení vložky. Byla navržena kruhová středová vložka kola pro vlepení dovnitř skořepiny. Při dobrém upevnění čistě kruhové středové vložky se všechno zatížení na skořepinu kola může přenášet pomocí smykového zatížení spoje mezi vložkou a potahem, což je žádoucí. Pro tuto úvahu ale zjednodušujeme reálné druhy zatížení na ideální. Ve skutečnosti se vlivem různého místa a intenzity zatížení kolo různě deformuje a teoreticky čistě tahové zatížení je často doprovázeno například ohybem nebo krutem. U insertů pro přenos síly na kompozitní struktury je kromě pevnosti samotné vložky důležité i její prostorové opásání. Často jsou vložky uloženy mezi 2 kompozitní potahy a jsou namáhány na tah/tlak příčně na stěnu sendvičové struktury. V tom případě je důležité prostorové opásání vložky potahem, do které se síla rozkládá. Konkrétněji z testů, které jsou nutností pro návrh pevnostních vložek pro výrobu strukturálního kompozitního chasis formule, víme, že proti střihu vložky skrz potah kompozitu je daleko důležitější vnější obvod vložky více než její plocha. To přináší další možnosti odlehčování vložky uvnitř ploch, které se opírají do potahu. Oproti návrhům jiných týmů, které mají v kolech pouze kruhové středové vložky byl navržen insert se zmíněnou filozofií pro rozprostření

zatížení přes velký vnější obvod na kompozitní potah. Výsledkem je konstrukce vložky na obr. 40. Smyslem příček mířících do paprsků kola je lépe rozprostřít zatížení od krutu celého kola akcelerací nebo brzděním, tzn. ohybové namáhání paprsků na potah kola. Tato úprava se ale může ukázat nepřínosnou nebo nežádoucí. Můžeme tímto způsobem přenášet ze středu kola na stěny paprsku kola zatížení, které by jinak v tomto místě nepůsobilo. Cílem je vytvořit obě varianty kol s různými středovými vložkami a zátěžové zkoušky ukážou na rozdíly.



Obrázek 40 – Středové hliníkové vložky do kola

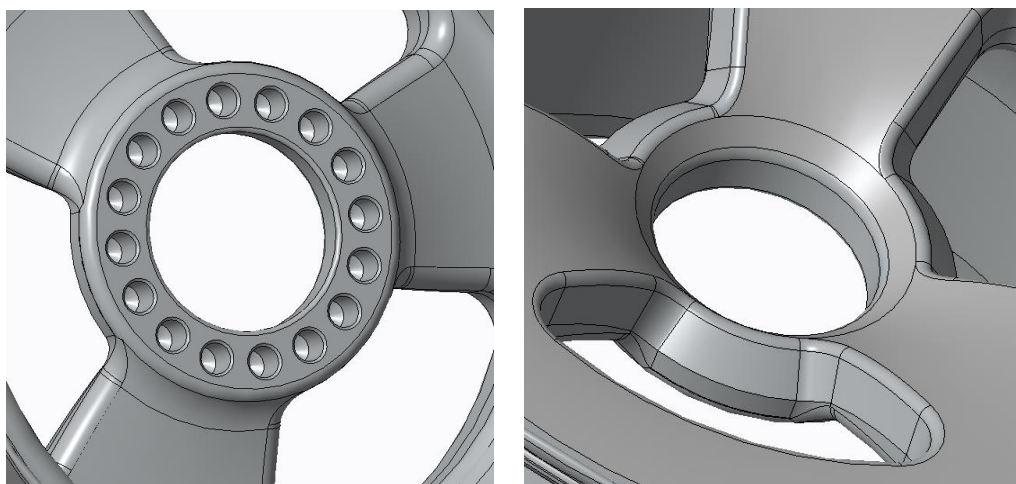
Základní tvary v ráfkové a hlavové části kola byly tím pádem vyřešeny. Následovala disková část. Při porovnání tvarů průřezů navrhovaného a komerčního hořčíkového kola můžete vidět, že při dalším návrhu bylo dbáno na maximální možné využití pozitivních vlastností v konstrukci kompozitních dílů vytvořením dutých objemných skořepin pro co nejlepší vlastnosti v lokálních oblastech zatížených tahem, tlakem nebo ohybem či krutem. Střední geometrie ráfku byla posunuta směrem ke středu kola pro větší natočení materiálu do směru zatížení při vertikálním zatížení kola. Současně je v této části použit strukturální sendvičový panel z uhlíkových tkanin dohromady s teplotně odolnou pěnou Rohacell. Vnější tvar skořepiny maximálně využívá volného prostoru a vytváří tak z diskové oblasti kola objemnou skořepinu, která je výhodná pro zvětšení kvadratického momentu průřezu profilu tělesa.



Obrázek 41 – Model a render karbonového kola

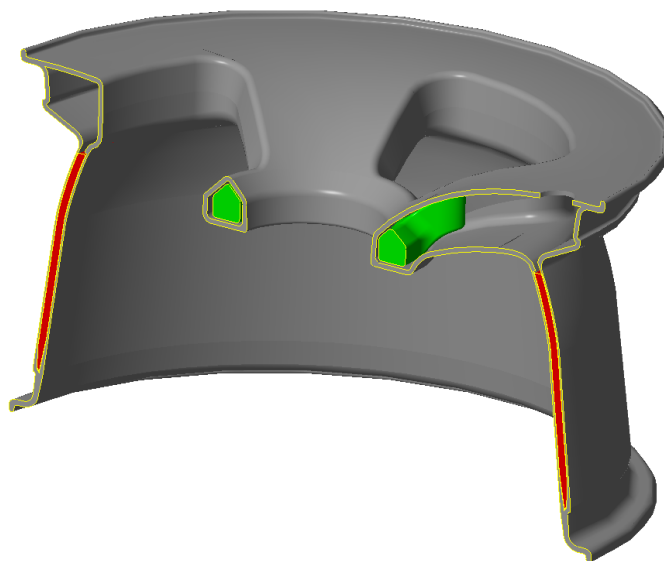
FINÁLNÍ NÁVRH KOLA

Z části bylo nutné pro první konstrukční návrh vycházet z geometrie kola OZ Racing. Musí být zaměnitelná. V novém návrhu bylo přihlédnuto ke geometrii pneumatiky Continental C19 a kola OZ Racing v oblasti hlavy kola pro upevnění na náboj a v oblasti dosednutí pneumatiky na ráfek vzhledem k dobrým zkušenostem s tímto kolem. Na jedné straně připevnění kola na náboj musí kolo přesně doléhat na plochu náboje, na druhé straně musí obsahovat identickou dosedací plochu centrální matice. Dále musí mít středovou díru s dostatečnou vřtí a musí být kompatibilní se vsouváním unášecích kolíků. Ze zmíněných důvodů je v místě uchycení disku na náboj geometrie téměř stejná. [33]



Obrázek 42 – Finální návrh středové části kola

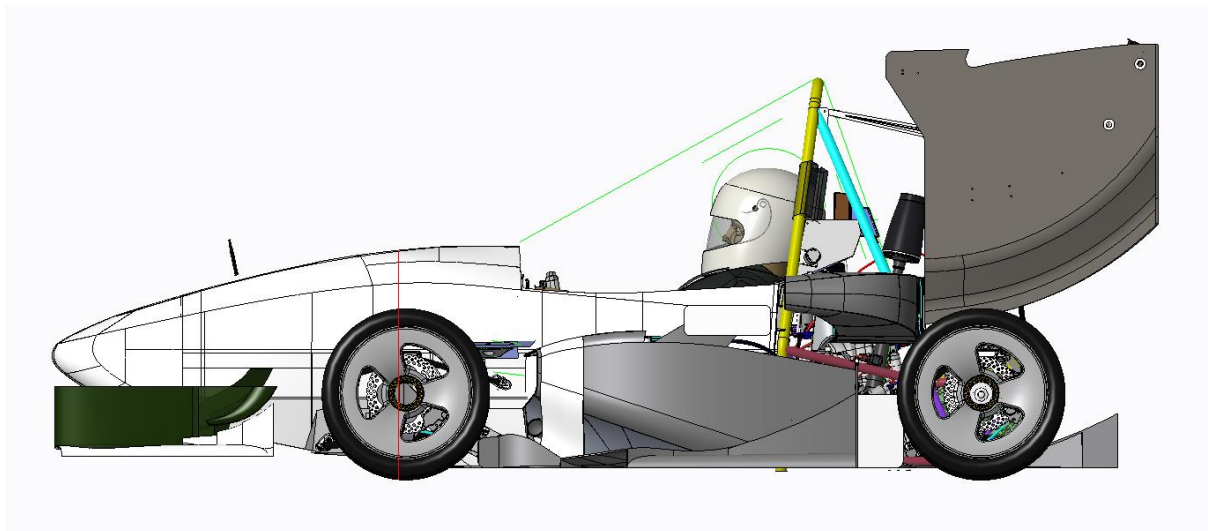
Dokončení návrhu vzniklo spojením výše zmíněných částí navrženou geometrií kola. Vzájemné pozice disku a ráfku byly vytvořeny tak, aby byl zachován zális kola. Čímž je zachována i šířka celého vozidla. Při návrhu byl kladen důraz i na vyvarování se ostrých hran. Zaobleními je možné vyhnout se vrubovým účinkům. Na obrázku můžete vidět kolo v řezu se šedou kompozitní skořepinou, červené pěnové jádro a zelené hliníkové středové jádro.



Obrázek 43 – Příčný průřez finální sestavou kola

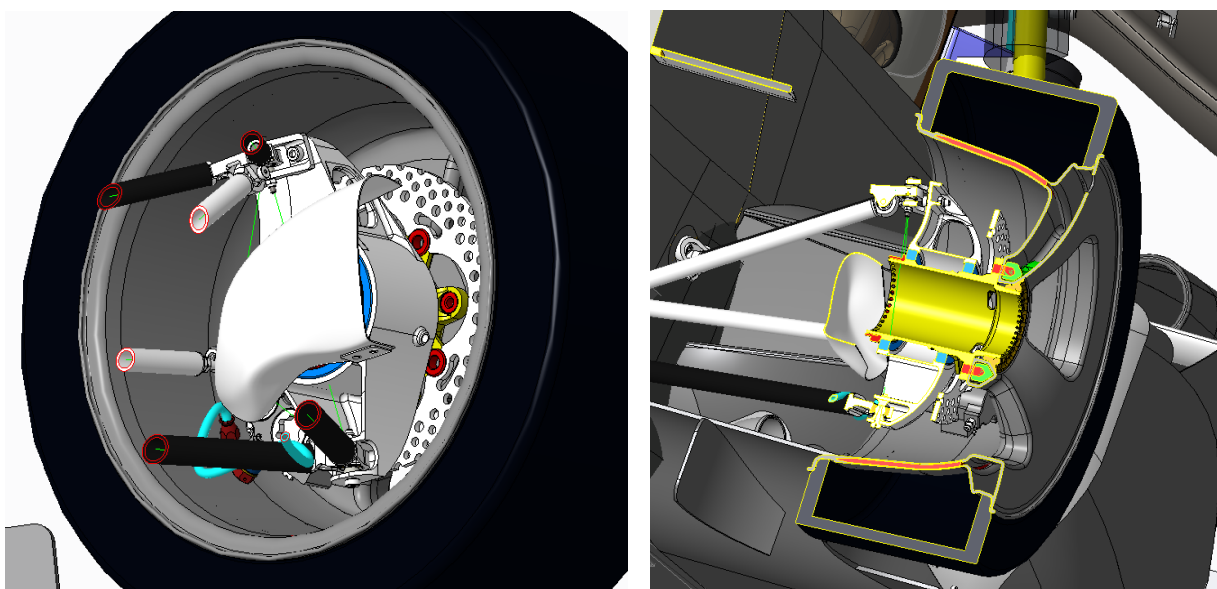
5.2 ZAČLENĚNÍ KOLA DO SESTAVY

Usazení kola do sestavy vozu slouží pro kontrolu, že žádné části nekolidují. Sestava by na případnou kolizi upozornila.



Obrázek 44 – CAD sestava monopostu Dragon 9 z profilu – uložení navržených kol

Na následujících obrázcích je vyobrazeno usazení předního kola z vnitřní strany od monokoku chassis a v řezu. Na přední nápravě je těhlice, brzdový třmen i kotouč mohutnější a zástavba je těsnější. Nejbližší součástí v zástavbě kola je šroub typu „banjo“ pro přívod brzdové kapaliny do třmenu. Mezera kola OZ Racing je v tomto místě 8 mm. Uhlíkové kolo má v tomto místě mezeru 5 mm. Sestava vozu je připravena na náfuky na brzdy a v zadní části na brzdič a lepený spoj karbonové poloosy.



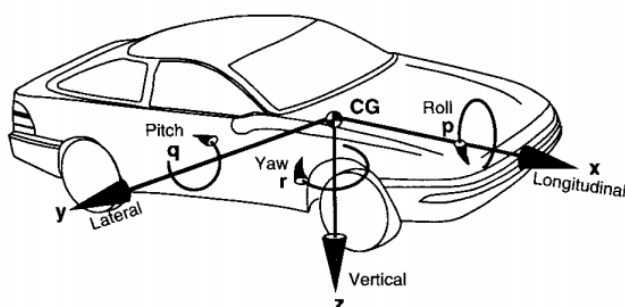
Obrázek 45 – CAD začlenění kola do sestavy vozu Dragon 9

6 ANALÝZA SILOVÝCH ÚČINKŮ

Před samotným zatěžováním navrženého dílu musí být známe kritické účinky působící na konstrukci. Pohybem se zabývá dynamika vozidel. Bere se v potaz akcelerace, brzdění a zatáčení. Dynamické chování vozidla je určeno silami, které na něj působí od pneumatik, gravitace a aerodynamiky. Je třeba definovat jaké síly v soustavě působí. [26]

6.1 UVAŽOVANÁ DYNAMIKA VOZU

Pro výpočty sil v soustavě potřebné pro napětově deformační analýzu stačí použití modelu soustředěné hmotnosti. Hmotnost celého vozidla reprezentuje jeden účinek v jeho těžišti. Pro lepší orientaci je definovaný souřadnicový systém vozu dle konvence SAE. [26]



Obrázek 46 – SAE souřadnicový systém vozidla [26]

CG je těžiště vozidla, x osa vozu v podélném směru (kladné hodnoty ve směru jízdy), y osa vozu v bočním směru (kladná z pravé strany vozu), z vertikální osa vozidla (kladný směr směrem dolů), p Roll (tj. klopení), q Pitch (tj. klonění) a r Yaw (tj. stáčení).

Pohyb vozidla je obvykle udáván v rychlostech (dopředná, boční a vertikální). Síly a momenty se udávají tak, jak působí na vozidlo dle souřadného systému. Síla odpovídající zatížení pneumatiky působí nahoru, proto má zápornou velikost. Normálová síla je zavedený pojem pro směr dolů a vertikální síla působí naopak. [26] Základním vztahem, kterým začíná většina analýz dynamiky vozidel je 2. Newtonův zákon. Zákon pojednává o translačních a rotačních systémech. V této práci postačí translační vyjádření. To říká, že součet vnějších sil působících na těleso v daném směru se rovná součinu hmotnosti tělesa a zrychlení v daném směru. [26]

$$\sum F_x = M \cdot a_x \quad (3)$$

F_x jsou síly ve směru osy x , M hmotnost tělesa, a_x zrychlení ve směru osy x .

Aplikací tohoto zákona a několika jednoduchých přepočtů společně s rozměry a dalšími parametry vozu je možné zjistit silové působení na nápravy vozidla i jednotlivá kola. Při zrychlení vozu vždy dochází k přesunu zatížení náprav. Pro výpočet upraveného rozvážení na nápravách se používá následující vzorec pro přesun hmotnosti m_t . [27]

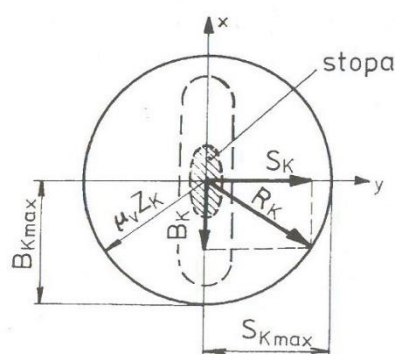
$$m_t = \frac{\frac{M \cdot a}{g} \cdot h_t}{l_r} \quad (4)$$

M je hmotnost soustavy, a zrychlení soustavy, g gravitační zrychlení, h_t výška těžiště, l_r rozvor vozu (podélná vzdálenost mezi osami náprav).

V tomto případě je navíc vůz vybaven přitlačným aero paketem. Samotný přitlak vozu vzniká prouděním okolo speciálně navržených profilů. Při obtékání profilu vzniká na jedné straně nižší tlak, což způsobuje vztakovou sílu. Aerodynamické pakety v soutěži Formula Student výrazně zlepšují čas na kolo v disciplínách Autokros a Endurance, tedy vytrvalostním závodě. Hodnoty aerodynamického přitlaku působícího na vůz při různých rychlostech byly získány pomocí simulací proudění. Pro účely této práce je důležitá přitlačná síla. Zpětná síla v podélném směru vlivem odporu není uvažována. Výhodou použití aerodynamického paketu je nižší moment setrvačnosti vozu za současného většího vertikálního zatížení, což umožňuje maximálně využít potenciál adheze pneumatik. Na vůz přitom během zatáčení nepůsobí výrazné setrvačné boční síly. Boční síla na pneumatiku je tak mnohem menší. [28]

6.2 LIMITNÍ ZÁTĚŽNÉ STAVY

Pro simulace zatížení kola je nutné nejprve určit limitní zátěžné stavy, kterým může být v praxi vystaveno. Prvním uvažovaným stavem je huštění pneumatiky nad běžný pracovní tlak kola při její montáži na kolo. Dalšími stavy jsou akcelerace z nulové rychlosti, brzdění z maximální rychlosti, neboť během tohoto stavu na vozidlo působí kromě brzdných sil ještě maximální přitlak generovaný aero paketem. Patrně nejkritičtější stavem je však jízda po obou vnějších kolech v ustáleném stavu zatáčení. Tento stav na monopostu v praxi doposud nenastal, ale může se vyskytnout. Tyto stavy jsou dány především maximálním využitím potenciálu pneumatik [31]. Potenciál pneumatiky přenést síly v libovolném směru se znázorňuje na tzv. Kammově elipse. Někdy se mluví o Kammově kružnici, avšak většina pneumatik má vlastnosti bližší elipse o delší ose ve směru podélné jízdy. Reálně z Kammovy elipsy vychází, že maximální síly, které je možné s pneumatikou přenést, jsou vždy pouze v jednom nebo druhém směru osy dle souřadného systému vozidla. V jiném obecném směru nepřenesou pneumatika tak velké zatížení. Vně kružnice poskytují pneumatiky menší přilnavost. [29]



Obrázek 47 – Kammova elipsa přilnavosti [29]

B_k je brzdná síla, S_k boční síla, Z_k radiální reakce kola a R_k výsledná síla pneumatiky

Pro stanovení limitních zátěžných stavů se vychází ze simulací pro návrh podvozku. V podélném směru při brzdění má teoretické maximální zrychlení vozu hodnotu 2,8 G, tj. definováno jako násobek gravitačního zrychlení Země. V bočním směru při zatáčení je teoretické maximum zrychlení 2,5 G. Pro experimentální zjištění kinematického poloměru kola byl vůz zatížený řidičem potlačen po rovině a změřen obvod kola o délky 1,44 m. Z tohoto byl ze vztahu:

$$o = 2\pi r \quad (5)$$

zjištěn poloměr kola r o velikosti 0,23 m. Výška těžiště vozu h_t činí 0,3 m.

Při všech jízdních stavech bude v simulaci zatížení zavedeno i stažení kola od utažení závitu o průměru d_{zc} velikosti 68 mm spojující centrální matici a náboj. Tato matice se utahuje momentovou ráčnou na hodnotu M_u o velikosti 140 Nm. Vztah mezi utahovacím momentem a silou předpětí F_i je [30]:

$$M_u = K \cdot F_i \cdot d_{zc} \quad (6)$$

K je součinitel utahovacího momentu (zahrnuje tření na dosedacích površích a v závitu)

$$F_i = \frac{M_u}{K \cdot d_{zc}} = \frac{140}{0,18 \cdot 0,068} = 11438 \text{ N} \quad (7)$$

Hodnota součinitele utahovacího momentu je přibližná. Působení této síly předpětí na výsledek simulace má minoritní vliv.

6.2.1 ZÁKLADNÍ ROZVÁŽENÍ VOZU

Tabulka 2 – Hmotnost vozidla

Hmotnost monopostu Dragon 9	174 kg
Hmotnost řidiče s vybavením	74 kg
Celková hmotnost	248 kg

Hmotnost vozu je v tabulce 2. Statické rozvážení vozidla na nápravy v klidu je v tabulce 3.

Tabulka 3 – Statické rozvážení vozidla

Zatížení přední nápravy	49,6 %	123 kg
Zatížení zadní nápravy	50,4 %	125 kg

Tabulka č. 6 znázorňuje celkový přítlak generovaný aero paketem při rychlostech uvažovaných limitních stavů. To znamená při maximální rychlosti vozidla a rychlosti, při které se dosahuje maximálního bočního přetížení. Při rychlosti 60 km/h působí 57 % celkového aerodynamického přítlaku na zadní nápravu. Při rychlosti 115 km/h je to 65 % přítlaku na zadní nápravu.

Tabulka 4 – Celkový přítlak při ustálených rychlostech zátěžných stavů

	60 km/h	115 km/h
Celkový přítlak	600 N	2200 N

6.2.2 MAXIMÁLNÍ DECELERACE

Největší zrychlení při brzdění probíhá z maximální rychlosti. Toto zrychlení má hodnotu:

$$a_{x1} = 2,8 \cdot G = 27,5 \frac{m}{s^2} \quad (8)$$

Přitom vzniká přesun hmotnosti M podle vztahu (4) na přední nápravu m_{t1} o velikosti:

$$m_{t1} = \frac{\frac{M \cdot a_{x2} \cdot h_t}{g}}{l_r} = \frac{\frac{250 \cdot 2,8 \cdot 9,81}{9,81} \cdot 0,3}{1,53} = 137,3 \text{ kg} \quad (9)$$

Na jedno přední kolo je to polovina, tj. 68,6 kg.

Tabulku č. 7 tvoří hodnoty vertikálních zatížení při rychlosti 115 km/h v přímém směru na jednotlivá kola.

Tabulka 5 – Přehled přítlaku generovaného aero paketem při ustálené maximální rychlosti

	Přední kolo	Zadní kolo
Statické rozvážení	603 N	613 N
Přenos hmotnosti	+ 673 N	-673 N
Přítlak	385 N	715 N
Celkem	1661 N	655 N

Ze vztahu (3) je celková síla F_{x2} působící na vůz:

$$F_{x1} = M \cdot a_{x2} = 250 \cdot 2,8 \cdot 9,81 = 6867 \text{ N} \quad (10)$$

Na přední nápravu působí v tento stav součet statického zatížení, přenosu zatížení a přítlaku, což je celkem 3322 N. Na zadní nápravu nyní působí statické zatížení ponížené o přenos zatížení a přítlak. To je celkem 1310 N. Na přední nápravu působí v tento moment 71,7 % celkové vertikální síly na vůz. Z této části tedy na přední nápravu působí i brzdná síla. Hodnota síly zpomalující rotaci jednoho předního kola je 2462 N.

Vliv na chování kola mají i setrvačné síly vlivem úhlového zrychlení ε_2 :

$$\varepsilon_1 = 94 \frac{rad}{s^2} \quad (11)$$

Maximální krouticí moment M_k působící na kolo je poté přepočítán podle vztahu (12), kde r_k je poloměr kola s pneumatikou.

$$M_k = F_x \cdot r_k = 2462 \cdot 0,2325 = 572,4 \text{ Nm} \quad (12)$$

6.2.3 USTÁLENÝ PRŮJEZD ZATÁČKOU

Tento limitní stav vychází z úvahy, že vnitřní kola v zatáčce na okamžik ztratí kontakt s vozovkou a veškeré vertikální zatížení v ten moment působí na vnější kola. Klopení není tak markantní, aby se výrazně změnil přítlak působící na vozidlo. Hodnota přítlaku při této rychlosti je 600 N.

V tab. 10 je uvedeno rozvážení na kola při ustáleném zatáčení. Z tabulky je zřejmé, že větší je vertikální zatížení zadního kola. Simulace bude tedy prováděna na něm.

Tabulka 6 – Celkové rozvážení na jednotlivá kola při ustáleném zatáčení

	Přední kolo	Zadní kolo
Statické rozvážení	1207 N	1226 N
Přítlak	258 N	342 N
Celkem	1465 N	1568 N

Maximální boční zrychlení a_y se objevuje při rychlosti okolo 60 km/h. Maximální boční zrychlení činí:

$$a_y = 2,5 \cdot G = 24,5 \frac{m}{s^2} \quad (13)$$

Ze vztahu (3) je vypočtena síla F_y působící na přední kolo v bočním směru. Zde je třeba připomenout, že zatížení od aerodynamického přítlaku negeneruje boční sílu.

$$F_y = M \cdot a_y = 125 \cdot 2,5 \cdot 9,81 = 3066 \text{ N} \quad (14)$$

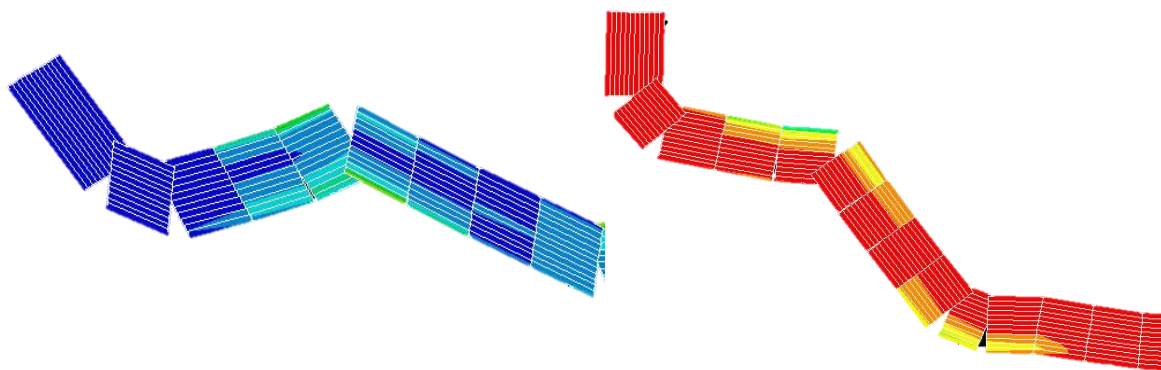
Maximální ohybový moment M_o působící na kolo je poté přepočítán podle vztahu (15), kde r_k je poloměr kola s pneumatikou.

$$M_o = F_y \cdot r_k = 3066 \cdot 0,2325 = 712 \text{ Nm} \quad (15)$$

7 ZATÍŽENÍ KOLA

Při napětově deformačních simulacích zatížení kola je problematický přenos zatížení z pneumatiky na kolo. Pevný spoj na celých dosedacích plochách ráfku není vhodný. Pneumatika se na ráfku v provozních režimech deformuje a pohybuje. Přenosy sil neodpovídají pevnému spoji. V případě zanesení pneumatiky do výpočtového modelu vznikají chyby dané nepřesností výpočtového modelu pneumatiky. Problematika výpočtového modelu pneumatiky je složitá a je předmětem celých diplomových a dizertačních prací. Pneumatika má totiž části o různé tuhosti, které se navíc mění při změnách teploty a vnitřního tlaku během jízdy. Tuto problematiku jsem řešil v bakalářské práci.

Ideální vyhodnocování výsledků simulací kompozitního kola je řešit napjatost v jednotlivých vrstvách. Laminární materiál vykazuje jiné rozložení napětí než homogenní materiál. Toto je například vyobrazení 1. a 3. hlavního napětí při limitním zatáčení na laminární úrovni. [BP]



Obrázek 48 – 1. a 3. hlavní napětí ve vrstvách laminátu [48]

Vzhledem k časovému omezení tvořeného sezónou projektu Formula Student a lidským zdrojům se pro tento projekt zvolil přístup odhadu vhodné skladby skořepin kompozitního potahu na základě zmíněné bakalářské práce. Odhadnutá skladba kompozitního kola bude poté testována reálným experimentem a na základě výsledků bude navržen další postup práce. Konstrukce formy kola umožní, aby bylo možné skladbu měnit a nastavit tak vlastnosti kola jako jsou pevnost, tuhost nebo jeho hmotnost.

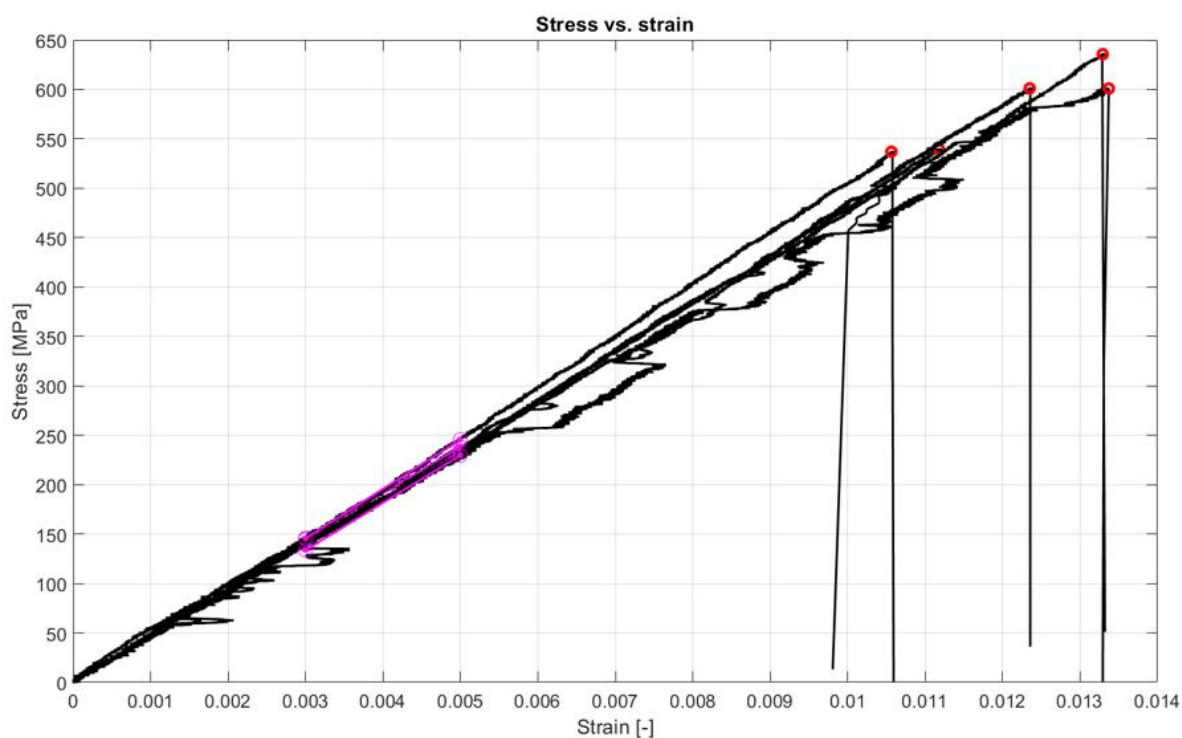
7.1 MATERIÁLOVÉ TESTY

Pro vytvoření základu pro výpočetní modely byly z použitého materiálu alespoň vytvořené materiálové vzorky pro tahovou zkoušku. Byly navrženy tři různé skladby skořepiny kola z použitého prepregu Fiberpreg T245 EP1 a poté vytvrzené rovné desky o těchto skladbách. Z vytvrzených desek byly následně vodním paprskem ve firmě AWAC spol s.r.o. podle výkresu vyříznuty pruhy skladby daných rozměrů pro vytvoření tahových vzorků. Pro tahové zkoušky vzorků je nutné zamezit tomu, aby upínací čelisti trhací zkušební stanice vytvořily ve vzorku vruby. V takovém případě by byly výsledky zkoušky značně ovlivněny. Tohoto bylo dosaženo přilepením částí proužků na obě strany konců vzorku pro bezpečné upnutí čelistmi. Smykové namáhání lepeného spoje nebylo kriticky namáhaným místem, nehavarovalo. Na obr. jsou připravené vzorky pro tahovou zkoušku a tahová zkouška samotná. Každý typ vzorku měl 5 zkušebních vzorků pro zjištění opakovatelnosti výsledků. Tahové zkoušky byly provedeny na Leteckém ústavu FSI VUT.



Obrázek 49 – Vzorky určené pro tahovou zkoušku, tahová zkouška

Většina potahů kola má skladbu jako vzorky A na obrázku. Na obr. _ jsou znázorněné průběhy tahových zkoušek vzorků A. Nejpevnější vzorek vydržel tahové zatížení o síle 29800 N. V osmi směrech (s úhlovým posunutím 45 °) ze zkoušky vychází pro potah Youngův modul pružnosti v tahu o velikosti $47,8 \pm 1,4$ GPa a pevnost v tahu $582,8 \pm 43,2$ MPa. Výsledky takové zkoušky jsou do budoucna základem pro napěťově deformační analýzy.



Obrázek 50 – Výsledky tahové zkoušky

7.2 DYNAMICKÉ TESTOVÁNÍ

Pro účel motorsportu není homologace a legislativa pro provoz na pozemních komunikacích potřebná. Pro užití v soutěži Formula Student ani závodní homologace. Přesto se jedná o zkoušky, které důkladně prověří návrh prototypu kola a jeho spolehlivost. Zároveň je s jejich pomocí možné získat charakteristiky prototypového kola. Pro prokázání vhodnosti užití musí komerční kola splnit zkoušku odvalováním, ohybu za rotace a nárazovou zkoušku.

Zkouška odvalování simuluje napětí od přímé jízdy. Tato zkouška probíhá odvalováním po válci, jehož vnější průměr je minimálně 1,7 m. Obvykle zkouška běží 72 hodin.



Obrázek 51 – Zkouška kola odvalováním [25]

Zkouška ohybem za rotace simuluje zatížení kola zatačením. Testované kolo se pevně uchytí a za rotace na něj působí ohybový moment představující až 75 % maxima boční síly.

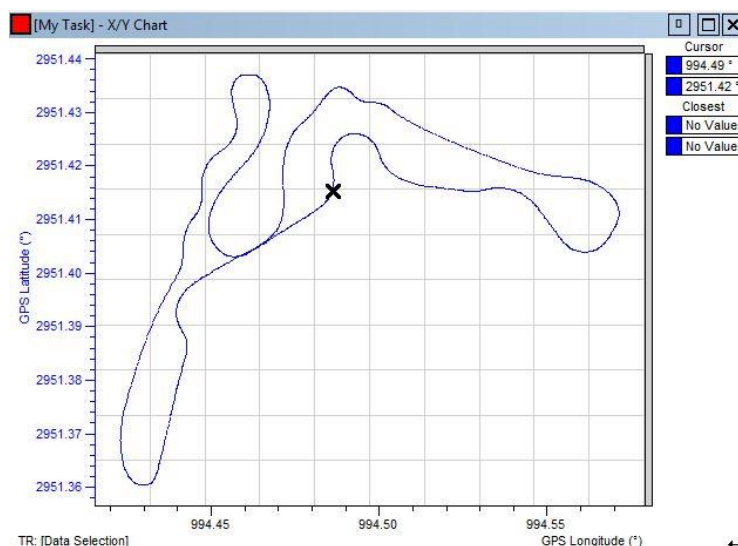


Obrázek 52 – Zkouška ohybem za rotace [25]

Rázová zkouška simuluje nárazy kola na překážky. Na pevně upevněné kolo v zařízení dopadne kladivo. Při všech těchto testech se pro homologaci nesmí na kole objevit známky trhlin. [8]

Testování kola navrhovaného v této práci má zcela jistě smysl. Zejména odvalovací zkouška, zkouška ohybem za rotace a zkouška zatížení krutem. U zkoušek by bylo dobré otestovat kvůli bezpečnosti kolo maximálním možným zatížením, kterým bude vystaveno. Jedná se o závodní vůz a těchto stavů kolo v krátkých intervalech dosahuje běžně. Všechny testy by probíhaly uchycením kola pomocí náboje. Rázová zkouška nezbytná není, neboť na tratích soutěže Formula Student kolo nepřijde do kontaktu s velkými rázy.

Pro návrh dynamického zátěžného cyklu se na nasbíraná data používá metoda FFT (Fast Fourier Transformation), pomocí které lze jízdní data z vozu filtrovat na zatížení různých spekter frekvencí. Ty se poté dělí do bloků a zátěžný cyklus je rozdělen podle nich. Pro účely zatížení kola je stručně navrženo zatížení vycházející ze změřených dat na vozidle. Navržené zatížení je zaměřeno striktně na bezpečnost, a proto uvažuje vždy největší možné zatížení, byť reálně může zatížení být menší. Silové působení bylo z přetížení přepočítáno na konkrétní síly působící na kola v kapitole 6. Dále je třeba definovat cyklus. Na obr. _ je mapa běžné trati Formula Student vykreslená pomocí GPS modulu na voze Dragon 8.



Obrázek 53 – GPS mapa tratě

Trat' je dlouhá 720 m a skládá se z 13 levotočivých a 10 pravotočivých zatáček, přitom 11 prudkých brzdění. Pro nastavení cyklu uvažujeme jedno kolo.

7.2.1 ZKOUŠKA OHYBEM ZA ROTACE

Průměrně můžeme vzít 12 maximálních zátěžných cyklů zatáčení jednoho kola za projetí jednoho okruhu. To znamená průměrně zátěžný cyklus zatáčením každých ujetých 60 m. Za sezónu ujede vůz běžně vzdálenost 600 až 800 km, maximálně 1000 km. Počet maximálních zatížení zatáčením vozu za sezónu je 16667. U kola chceme větší bezpečnost, proto je celkový počet cyklů dvojnásobný, konkrétně 33334. Z telemetrických dat vozidla vychází průměrný čas maximálního zatížení kola při zatáčení 0,6 s. To znamená celkem 5,6 hodiny v maximálním zatížení. Do testu se musí přičíst doba zatížení a poklesu zatížení za cyklus. Jednodušší zátěžné cykly mají ale většinou charakteristiku sinusoidy. Obecně jsou rázová zatížení těles horší než výdrž na daném zatížení. Frekvence maximálního zatížení je poměrně malá. Maximální ohybový moment zadního kola má podle rovnice č. 18 hodnotu 712 Nm, což by odpovídalo amplitudě zatížení při testu. Kolo se pro tento test uchytí pevně po celém obvodu ráfku do kleštin. Uchycení za pneumatiku by znamenalo příliš velké deformace. Moment na kole bývá vyvozen kmitáním nevývažku o dané frekvenci na definovaném rameni. Tato zkouška proběhne podle předpisu EHK 124 společnosti TÜV-SÜD.

7.2.2 ZKOUŠKA ODVALOVÁNÍM

Zkouška odvalováním může projít běžným cyklem, maximálně se započítáním zatížení s aerodynamickým přítlakem podle tabulky č. 6.

7.2.3 ZKOUŠKA KRUTEM

Z předchozí úvahy vychází v průměru průměrně brzdění každých ujetých 65,5 m. Za sezónu to znamená 15267 cyklů. Pro bezpečnost je počet cyklů zdvojnásoben na 30534. Brzdění trvá podle dat průměrně 1,8 s, což je celkem 15,2 hodiny plného zatížení. Pro cyklus brzdění může ale opět být důležitější proměnlivost zatížení. Samotný proces brzdění z volného stavu do maximálního zatížení obvykle trvá několik desetin sekundy vlivem rychlosti stlačení brzdového pedálu řidiče a ustálení tlaku v brzdovém potrubí. Charakter zatížení může být sinusoidní s amplitudou v podobě hodnoty maximálního krouticího momentu. Uchycení je totožné se zkouškou ohybem za rotace. Maximální krouticí moment na kolo má podle rovnice č. 16 hodnotu 572,4 Nm.

8 NÁVRH FOREM

Vybraným výrobním procesem pro kolo je vytvrzování prepregu v autoklávu. Na tento výběr navazuje výběr vhodného typu formy. Autokláv i prepreg na formu kladou požadavky. Forma musí být odolná teplotě pro vytvrzovací cyklus. Materiály, které jsou na hraně teplotní odolnosti vytvrzovacího cyklu se vlivem působení tepla mohou zdeformovat. U některých nedůležitých dílů a nutnosti produkce pouze několika kusů to možnou variantou je. Duté kompozitní kolo na formuli má vysoké nároky na přesnost. Forma by měla vydržet přinejmenším několik sezón, a tedy desítky kusů laminovaných kol. Tlak v autoklávu při vytvrzovacím cyklu je dalším vlivem, který je nutno zvážit. Pod tlakem se forma nesmí zdeformovat. Nesmí se opomenout žádoucí povrch formy, neboť ten dává základ povrchu finálnímu výrobku. Na formě chceme minimální pórovitost a možnost upravit povrch do vysokého lesku. Do autoklávu se pro formy typicky používají tři základní typy materiálů. Jde o formy z teplotně odolného technického dřeva, to většinou pro výrobu několika kusů, laminátové formy nebo kovové formy (většinou hliníkové). Ojedinělou alternativou kromě rovných desek jsou skleněné formy, které ale poskytují perfektní povrch pro laminování. Laminátové formy stejného materiálu, jaký je na formě vytvrzovaný, mají stejnou teplotní roztažnost, která je téměř nulová, což je dáno vlastnostmi matrice kompozitu. To znamená, že velikost formy odpovídá hotovému výrobku. Lamináty v sobě během vytvrzovacího cyklu neakumulují velké množství tepla. Jejich ochlazení při vytvrzování v autoklávu je proto relativně rychlé. Pro výrobu negativní nebo pozitivní formy z laminátu ale prvně potřebujete opačnou formu, která je pro finální předlohou. Tohoto lze v sériové výrobě využívat pro produkci více forem. Pro jeden kus je to výroba více forem, ale i tak to má výhody. Vyrobit perfektní laminátovou formu z laminátu je ale náročnější než vyrobit z formy perfektní díl. Je to důležité kvůli kvalitě každého dalšího výrobku a životnosti formy. U forem je důležité nemít žádné bubliny, to znamená i pórovitost. Formy s bublinami v laminátu brzy v autoklávu popraskají. Vyrobit laminátovou formu do autoklávu můžeme několika způsoby. Někdy se vyrábí úplně atmosférickou laminací, pro kvalitní výsledek je častou volbou infuzní výroba. Ve velké produkci se formy dělají z prepregů na to určených. Toto je typ formy, která byla pro výrobu kola zvažována. Je rozhodně levnější než kovová forma, ale její kvalita a časová náročnost s tím spojená je problémem. Kovové formy mají největší životnost, jejich povrch je dobře opravitelný, formy jsou tuhé a kvalitního povrchu dílu z kovové formy lze dosáhnout snadněji. Pórovitost se u prodáváných litých slitin nemusí v podstatě vůbec uvažovat. Jinak by to bylo v případě vlastního přesného odlévání formy. V tom případě by se musela kontrolovat kvalita litých povrchů formy.

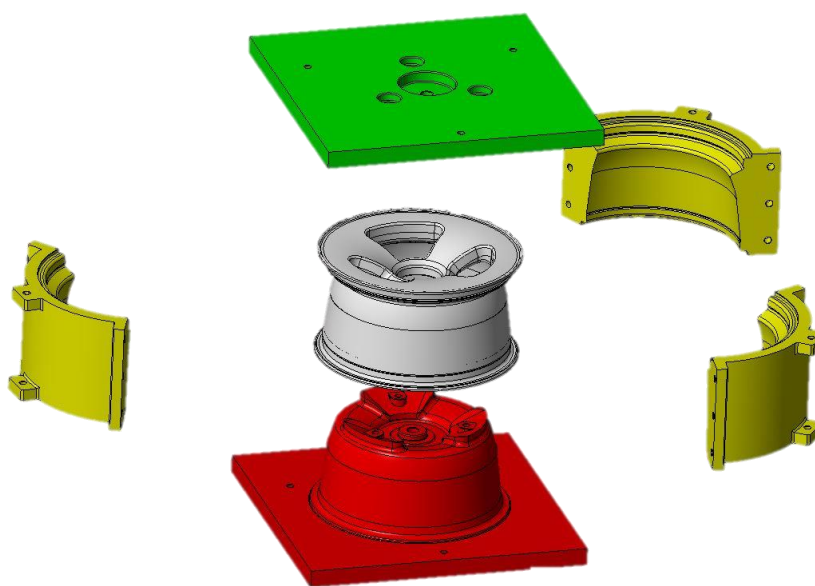
Polotovar na formu darovala společnost ALFUN a.s. Forma na kola je obrobena z litých bloků hliníku. Hliník je při správném navržení geometrie formy a správném zacházení vhodný pro střední i větší sériovou výrobu. To záleží i na kvalitě separátoru a jeho aplikace. Povrch hliníkové formy stačí po jistém počtu dílů přeleštit. Hliník je ale také materiálem, který dobře akumuluje teplo, a přitom se poměrně hodně roztahuje. Z hlediska akumulace tepla je potřeba formu navrhnout tak, aby stěny formy byly co nejtenčí, aby nahřáté formy při procesu v autoklávu šly relativně rychle dochlazit a nezdržovat tak vytvrzovací cyklus autoklávu. Druhým hlediskem pro jejich návrh je dostatečná tuhost formy. Roztažnost formy při jejím návrhu hraje velkou roli. Forma se v poměru k dílu převádí do takového velikostního měřítko, aby při teplotě tvrdnutí pryskyřice měla forma velikost požadované velikosti dílu.

Jednou z prvních věcí, kterou si je potřeba stanovit při návrhu formy, je její koncept. Ten je částečně daný geometrií dílu, nad kterou se v této souvislosti uvažovalo už při návrhu konstrukce kola. Většina cizích návrhů forem pro karbonová kola byla konceptu pouze dvou forem. Jedna forma na přední část kola v oblasti disku, druhá oproti ní v oblasti ráfku. Je to

jednodušší a samozřejmě i levnější o vnější ráfkovou formu. Tímto směrem jsem se ale rozhodl nevydat a důvody jsou následující. Právě tato metoda je totiž napříkladem počátkem problému s netěsností kola. Pokud totiž ráfková oblast není vyrobena ve formě, není vůbec přesná a má vlnitý povrch. Proto je potom nutné kolo soustružit v oblasti okrajů ráfku, jeho dosedacích ploch a bezpečnostních profilů proti sesmeknutí pneumatiky z ráfku. Snad v žádném případě se nejedná pouze o lehké soustružení v rámci pryskyřicové vrstvy, ale soustruží se struktura tkanin, čímž se kolo kromě potenciálu k unikání tlaku kola také zeslabuje. Proto bylo rozhodnuto vytvořit formu i okolo ráfku. Ráfková část byla rozdělena do 3 identických dílů o úhlovém rozdělení 120°. Je to možné udělat i se dvěma částmi, ale zvyšuje se tím pravděpodobnost horšího odformování dílu, tím se formy více opotřebovávají, což vede ke geometrickým vadám.

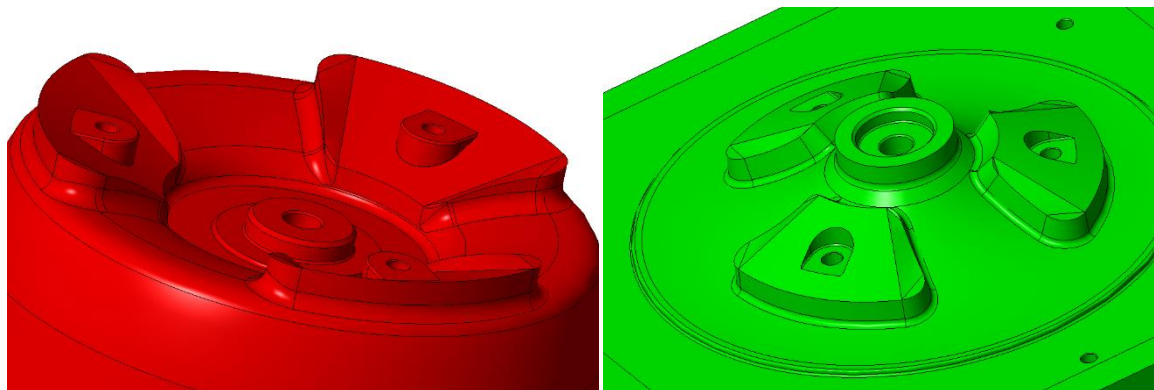
Celá forma je navržena tak, aby byla vhodná pro libovolnou metodu laminování. Je s ní možné kolo laminovat ručně, pomocí infuze, v autoklávu a po nějakých úpravách i pomocí technologií RTM. V případě výroby kol různými metodami bude zajímavé porovnání výsledků ve výkonech ve spojení s náklady na výrobu.

Forma je rozdělena do pěti dílů (obr. 54), které jsou spolu složitelny pomocí šroubových spojů. Forma kopíruje tvary zmenšeného modelu kola podle výpočtu teplotní roztažnosti materiálu, přičemž pro stanovení zmenšení formy oproti finálnímu kolu byly rozměry, ze kterých se vycházelo, vnější průměry dosedacích ploch na ráfku. Vnější forma pro ráfek byla poměrně jednoduchá. Nikdy na formě nesmí být negativní úhel, aby šel díl odformovat. S tím souvisí rovnou i technologie obrábění formy, na kterou se míří. Třísosé obrábění je jednodušší, rozšířenější, není tak složité na naprogramování, a tudíž je i levnější. Negativní úkosy se ale kontrolovaly už během návrhu kola. Obvod byl rozdělen do třech částí, kde se vytvořily dosedací plochy na sebe navzájem a elementy pro spojení s diskovou a vnitřní ráfkovou formou. Tloušťka stěny formy byla nastavena podle konzultace s odborníky ve společnosti JetSurf - MSR Engines s.r.o., kde byl díl následně také vytvrzován v autoklávu.



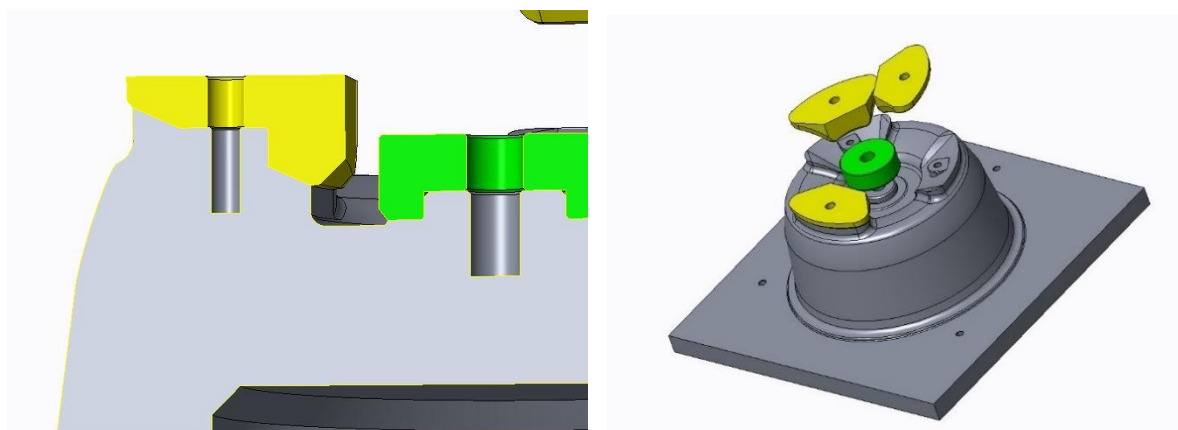
Obrázek 54 – Sestava pěti hlavních výrobních forem a kola

Na dělicí rovinu na kole v oblasti disku a ráčku zevnitř se myslelo už při návrhu kola, takže rozdělení geometrie nebylo náročné. Komplexnost návrhu tkvěla v oblasti spojení těchto dvou forem. Bylo nutné vytvořit dosedací plochy, které budou perfektně středit jednotlivé dosedací plochy na sebe. Řešením byly dosedací zámky ve tvaru půlkruhů. Ty jsou zároveň navrženy pro dotěsnění tak, aby bylo možné využít je pro různé metody výroby. Formy se do sebe stahují čtyřmi šrouby. Takto ve formě z pěti částí je možné laminování kola v jednom kuse. Obě tyto formy jsou z druhé strany částečně duté pro možnost upnutí do sklíčidla.



Obrázek 55 – Dosedací plochy na dělicí rovině ráfkové a diskové formy

Při výrobě, kdy mezi dvě pevné stěny formy vkládáme potahy dohromady s přesným insertem je těžké navrhnut a vyrobit přesnou tloušťku potahu na komplexní geometrii. Celá forma je ještě stále poměrně masivní, aby bylo možné toto přesné vyložení tkaninami perfektně dotlačit do formy. Pokud by forma nebyla dotlačena a byla by vložena do procesu v autoklávu, tlak by ji dovrhel, ale zřídka se stane, že správně. Místo toho se formy mohou vzpříčit a poškodit, přičemž při jakémkoliv nedotlačení díl disponuje asymetrií a následně při rotaci házením. Pro výrobu kola z více vylaminovaných částí následným slepením je potřeba vytvoření aditivních přílohek na formu pro vytvoření geometrie rozšířeného potahu pro lepený spoj. Tato cesta je jednodušší, ale také nedokonalá oproti výrobě kola v jednom kuse. Na druhou stranu je pro formu bezpečnější. Lepený spoj na hranici vnějšího potahu ráčku s diskovou i vnitřní ráfkovou částí je daný geometrií okrajů ráčku. Prodloužení bylo nutné navrhnut na rozhraní diskové a vnitřní ráfkové formy. Ve středové části byla navržena rotační příložka s postupným rozšířením z původní geometrie pro složení zámku z potahů. Složitější tvar byl na částech formy, které tvoří otvory v disku kola mezi jeho paprsky. Výsledkem je rozšířená prodloužená forma vnitřní ráfkové části kola viz obr. 56



Obrázek 56 – Příložky na formu

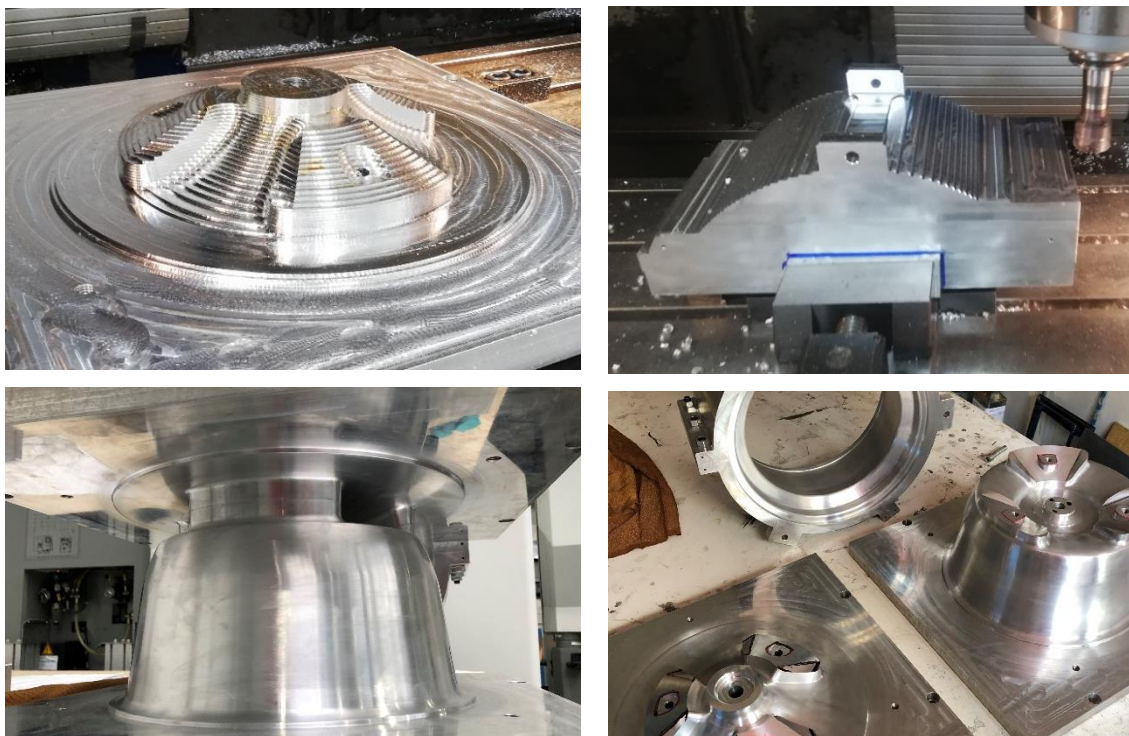
8.1 VÝROBA FOREM

Po uzavření návrhu forem pro výrobu kola bylo nutné formy vyrobit. Základem jsou bloky hliníkové slitiny EN AW 5083 na obrobení velkých částí formy. Slitina použitá na formy je poměrně měkká a pro formu byla vhodná, protože je poměrně dobře leštitelná. [52]



Obrázek 57 – Hliníkové polotovary na formy

Všechny jednotlivé formy mají tvar určený pro třískové obrábění na tříosých frézkách. Obrobení pěti hlavních forem do podoby technického lesku bylo provedeno podle zadaných CAD modelů ve formátu STEP, výrobních výkresů forem a konzultací.

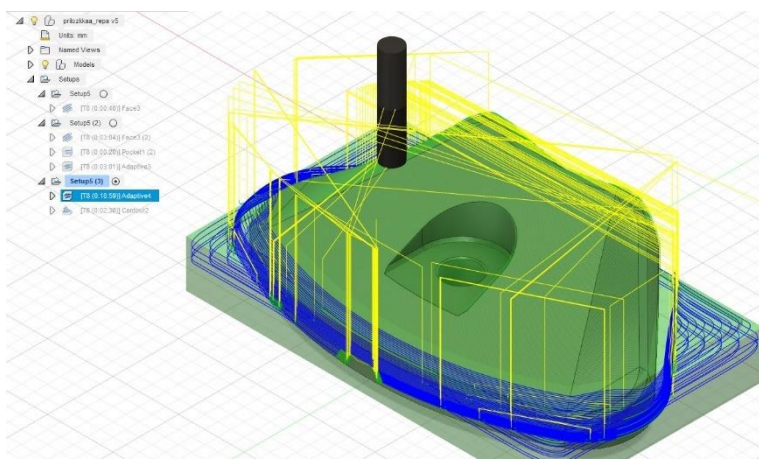


Obrázek 58 – Výroba forem na kolo z hliníkových bloků, obrobené formy

Každá forma má technologické otvory pro upnutí formy do frézky, takže je možné formy v případě potřeby dále upravovat nebo opravovat. Formy byly nejprve uvedeny do technického lesku. Technický lesk je vybroušený stav obrobku, kdy na povrchu nejsou vidět stopy po obráběcím nástroji. Po spasování forem dohromady, broušení a leštění do vysokého lesku ve

vlastní režii následovalo měření přesnosti geometrie povrchu těchto pěti forem pomocí přesného 3D optického skenování.

Pro výrobu přílozek na vytvoření prodloužených ploch pro lepený spoj diskové a vnitřní ráfkové části byla plánovaná výroba na vysokootáčkové tříosé CNC frézce M9, kterou našemu studentskému týmu poskytuje společnost DATRON-TECHNOLOGY s.r.o. Pro vytvoření obráběcího programu na frézku jsem použil program Autodesk Fusion 360. Díl byl vyráběn na 2 upnutí ve stroji. Pro přesné nastavení polohy obrobku ve stroji byla nejprve do polotovaru vyvrtaná díra skrz. Nulový bod byl ve stroji stanoven pomocí dotykové sondy. Pro každou operaci bylo nutné vybrat správnou frézu a změřit její délku pomocí dotykového senzoru. Nejprve byl díl z jedné strany plošně srovnán, poté byla obrobena vnější kontura dílu. Po přeupnutí byla složitá geometrie nejprve obrobena hrubovací operací, následně se díl finišoval. Po obrobení bylo nutné díl dokonale spasovat s formou vnitřní části ráfku. Tolerance nebyla úplně přesná, takže geometrie dosedací plochy tvarového zámku byla ještě několika operacemi upravena. Následovalo obrobení dalších dvou identických dílů. Následovalo dobroušení a vyleštění tří identických vyrobených dílů. Rotační středová příložka byla obrobena a následně vyleštěná na manuálním soustruhu v prostorách centra studentských projektů na fakultě strojního inženýrství.



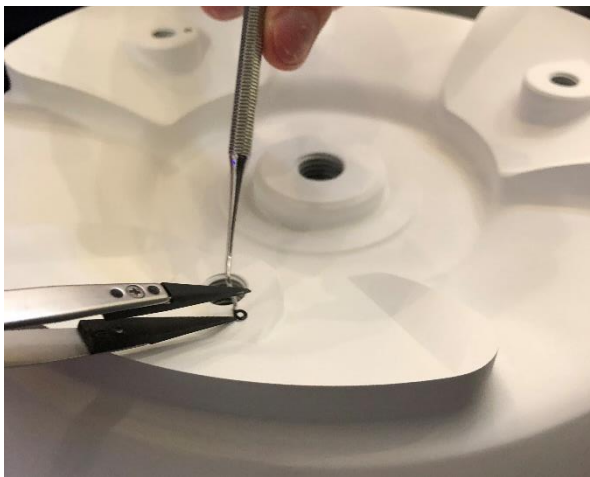
Obrázek 59 – Obráběcí program na výrobu příložky



Obrázek 60 – Obrábění příložky, vyrobené příložky

8.2 KONTROLA GEOMETRIE FORMY

Po vyleštění obrobků hlavních forem bylo žádoucí zjistit, jestli byly formy obrobny podle zadaných dat s požadovanou přesností. Kontrola přesnosti výroby formy byla kolegou z týmu změřena u partnera TU Brno Racing, společnosti MCAE Systems, s.r.o. pomocí přesného 3D optického skeneru ATOS Compact scan. Použitím skeneru je možné zachytit tvar a textury reálných objektů s vysokou přesností a uložit je jako detailní 3D modely. V rámci použité metody bylo vyleštěné formy nejprve nutné zmatnit křídovým sprejem k tomu určeným. Použitá metoda potřebuje povrch bez odrazu světla.



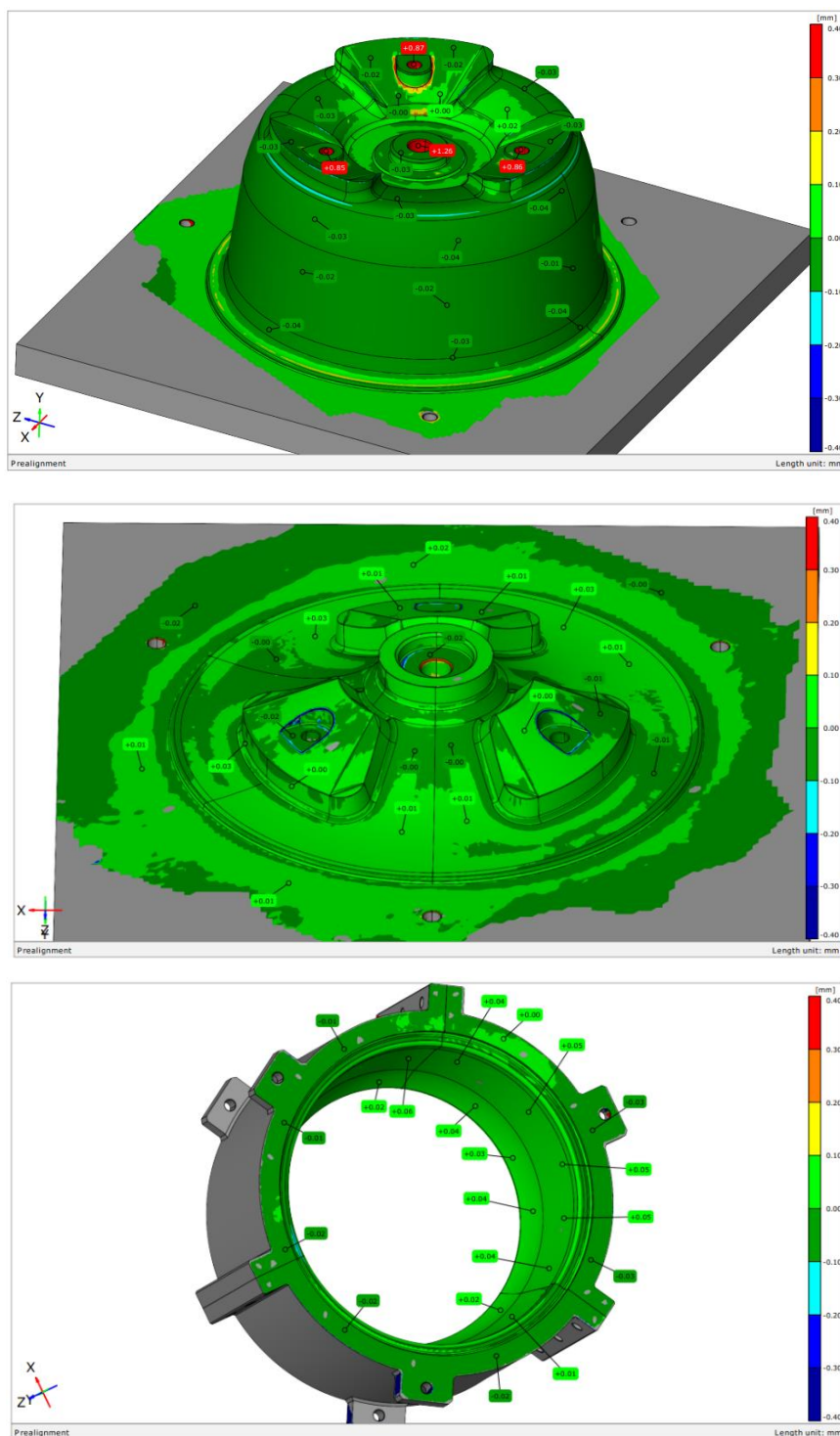
Obrázek 61 – Příprava formy na přesné optické 3D skenování

Po poskládání vhodné konfigurace skeneru pro toto použití byl skener zkalibrován pomocí k tomu určené podložky. Na formy bylo před začátkem skenování umístěno ještě několik referenčních bodů. Následovalo postupné skenování všech forem. Pro oskenování jedné formy je potřeba více snímků podle složitosti geometrie. Pro oskenování celého povrchu je nutné postupně v programu skládat jednotlivé snímky ze skeneru do jednoho modelu. Podle povrchů ve stínu hran je potřeba postupně díl otáčet a doplňovat model.



Obrázek 62 – Přesné optické 3D skenování formy na ráfek

Křídový sprej tvoří na povrchu formy po odborné rovnoměrné aplikaci vrstvu o tloušťce asi 0,003 mm. Podle rovnoměrnosti nástřiku se musí přihlížet k vypracovaným protokolům přesnosti. Stejně tak je nutné zmínit udávanou toleranci měření pomocí tohoto optického 3D skeneru, která je pět setin milimetru. Níže jsou vypracované protokoly o přesnosti obrábění. Obrobení bylo provedeno velice přesně. Červené hodnoty jsou pouze na nefunkčních plochách okolo dosedacích ploch zámečků, které vznikly při spasování forem.

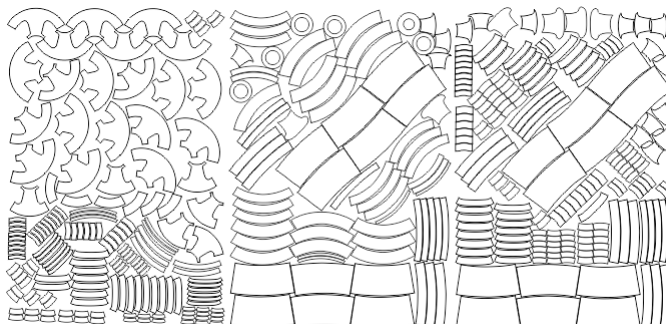


Obrázek 63 – Protokoly geometrických úchylek z výroby versus v návrhu

9 VÝROBA KOLA

9.1 NÁŘEZOVÝ PLÁN PREPREGU

Karbonové kolo má lokálně až 14 vrstev prepregu. Vrstvy kola se skládají z vyříznutých částí podle geometrie kola. Každé dvě na sobě položené vrstvy jsou vůči sobě o 45° úhlově posunuté pro vytvoření rovnoměrně anizotropního kompozitního potahu. Použitý prepreg má označení Fiberpreg T245 EP 1. Jde o keprovou tkaninu o gramáži 245 g/m² s 3000 vláknů v každé příze a hmotnostním podílem pryskyřice v prepregu o hodnotě 42 %, která je po vytvrzení teplotně odolná do 140 °C. Jednotlivé části prepregu se řezou z velké role prepregu. Výroba kol je sériovou výrobou. Proto byl k tomu vytvořený digitální nářezový plán pro řezání dílů z tkaniny na počítačově řízeném plotru.



Obrázek 64 – Nářezový plán karbonového kola

Nářezový plán byl vytvořen přímo na formě a následně zpracován do výkresové dokumentace. Tkaniny se vždy částečně do další vrstvy překrývají, aby na sebe díly navazovaly a vydržely po vytvrzení větší zatížení. Díly na jedno kolo (nejtužší vyrobená varianta) jsou vyřezané z plochy o obsahu 7,25 m². Skládá se z celkem 400 dílů. Strojově nožem řezané díly pro laminování jednoho kola se na plotru řezaly přibližně 2 hodiny. Ruční stříhání tkanin by trvalo násobně déle.

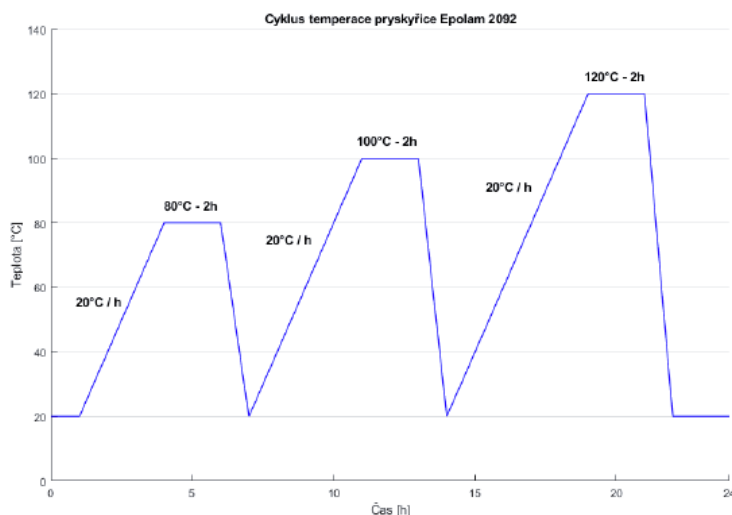


Obrázek 65 – Řezání prepregu na plotru

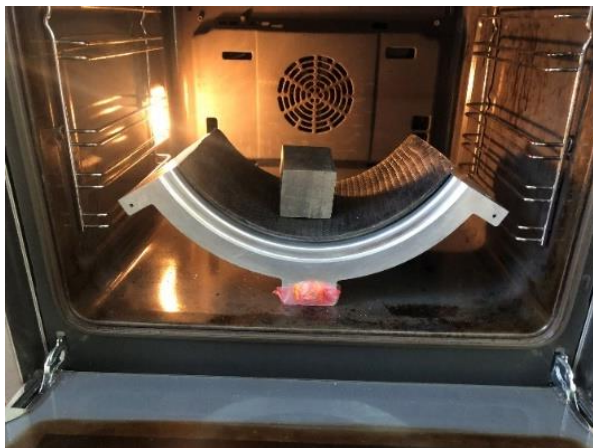
Po nařezání byly jednotlivé nářezy rozděleny podle forem, na které jsou určeny. V těchto balících se potom zatavily do pytle, aby byly při skladování v mrazničce chráněny před vlhkem a mohly se odebírat po částech.

9.2 PŘÍPRAVA JADER

V ráfkové oblasti kola je strukturální pěna Rohacell o gramáži X. Pěnu lze koupit po různých blocích nebo deskách. Výrobce ji na zakázku také odlévá rovnou do formy. Desky pěny se pro podobné účely také často obrábí do potřebného tvaru. Jediným možným řešením s ohledem na zdroje projektu byla výroba z desek. Výrobce označil pěnu za neforemnou. Bylo nutné experimentovat. Pěna je za běžné teploty křehká a při tvarování praská. Experimenty bylo zjištěno, že lokálním zahřátím nelze dosáhnout požadovaného rovnoměrného prohnutého tvaru. Při teplotách nad 200 °C začínala měnit barvu, tvrdnout a byla více křehká. Pokud je ale rovnoměrně prohřátá na teplotu 120 až 160 °C, vložena mezi dvě formy, a na několik minut v této teplotě zatížena, je možné ji částečně ohnout do požadovaného tvaru bez viditelných změn vlastností. Takto se pěnová část rozdělila do nářezů ploché pěny z desky o tloušťce 3 mm na 3 obvodové části. Jako negativní forma byla využita jedna část formy vnějšího ráfku. Do vnější formy byla vylaminovaná také dostatečně tuhá a teplotně odolná pozitivní forma. Pro odolnost vůči teplotám musela být pozitivní forma vytvrzená v peci podle materiálového listu použité pryskyřice Axson Epolam 2092 viz. obr 67. Pro nejlepší výsledky tvarování pěny Rohacell musí pěna do vychladnutí na pokojovou teplotu zůstat natvarovaná.



Obrázek 66 – Temperační cyklus pryskyřice Axson Epolam 2092 [50]

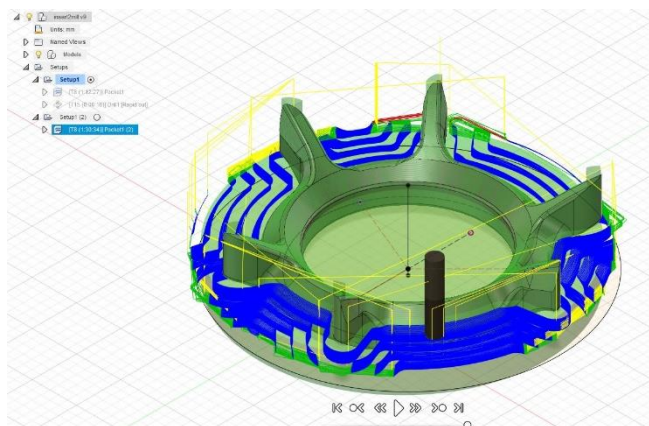


Obrázek 67 – Formování pěnového jádra Rohacell

9.2.1 OBRÁBĚNÍ STŘEDOVÉHO JÁDRA

Pro lepení byla obrobena pomocí klasického soustruhu v prostorách TU Brno Racing středová vložka z hliníkové slitiny EN AW 7075 t6 čistě kruhového tvaru na dvě upnutí z válcového polotovaru. Pro hvězdicovou variantu jádra bylo nutné tříosé obrábění na zapůjčené CNC frézce Datron M9. Ještě před obráběním byl tento díl vytisknutý z PLA filamentu na 3D tiskárně, aby byla ověřena jeho velikost. Dále jsem pro tuto výrobu vytvořil obráběcí program.

Pro obrobení jádra musely být nejprve nařezány válcové polotovary na pásové pile.



Obrázek 68 – Obráběcí program středové vložky do kola

Polotovarům byly zarovnány čelní plochy a vyvrtány středové otvory pro vystředění dílu ve frézce po přeupnutí obrobku. Pro upínání musel být z desky vyroben přípravek s upínacími dírami se závity. Při obrábění jádra ze strany dosedací na náboj kola musel být polotovar přišroubován do závitů v přípravku. Pro další upnutí musely být do obrobku obrobena závity, díky kterým se obrobek přitáhl k přípravku. Tyto díry se závity jsou malé a jsou úhlově rozmístěny v místech následně vrtaných děr pro unášecí kolíky na náboje a díl tak nebyl ovlivněn zbytečnými vruby.



Obrázek 69 – Vyrobené středové vložky do kola

9.3 VÝROBA KOLA

Pro ochranění forem před poškozením, snadného odformování laminátů z formy a vytvoření kvalitního povrchu kompozitu je nutné použití speciálních separátorů vhodných pro vytvrzování v autoklávu. Pro separaci forem před laminováním kol byl používán separátor ACMOScout 82-9062. Separátor byl nanášen na povrch formy potíráním. Důležité je separovat i plochy, které nejsou v přímém kontaktu s výrobkem (např. vzájemné dosedací plochy jednotlivých forem). Přestože na sebe formy opticky dobře dosedají, do mezery mezi nimi se může dostat matrice. Stejně platí se závity a šrouby. Pro kvalitní separaci výrobce předepisuje 3 vrstvy s intervaly dlouhými 20 minut pro uschnutí. Na plochách s malými úkosi je lepší separovat vícekrát.



Obrázek 70 – Separované formy připravené na laminování

Na nachystanou formu se může začít laminovat. Při pokládání vrstev prepregu do formy je nutností vyvarovat se napnutému prepregu přes dutou oblast formy. V takovém místě je nutné pokládaný díl vrstvy podle geometrie částečně nastříhnout a přitisknout na předchozí vrstvu. Většina prepregů se může krátce nahřát horkým vzduchem do teploty 50 °C. V materiálovém listu prepregu je uveden vytvrzovací cyklus matrice. V tuto chvíli není žádoucí nastartovat vytvrzovací cyklus matrice. Cyklus je nevratný. I při malém zahřátí prepreg změkne, je tvárnější a více lepí. Bez této preciznosti nebude laminát kopírovat geometrii formy, bude mít špatný povrch a v potazích dílu budou i po vytvrzení bubliny. Tyto vady snižují celkovou kvalitu dílu. Na obr. je riziková oblast pro nedotlačení potahu na stěnu formy. Špatně přístupná místa a negativní úkoly se musí kontrolovat.

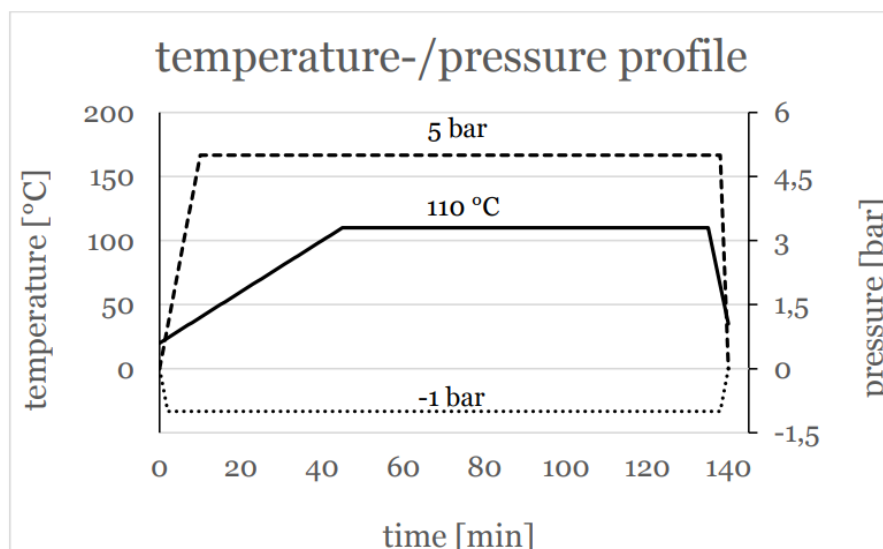


Obrázek 71 – Geometrie formy s příložkami ve středu



Obrázek 72 – Formy vyskládané prepregem

Po vyskládání celé skladby prepregových dílů se laminát překryje strhávací tkaninou, která na dílu vytvoří hrubý povrch vhodný pro lepení. Další vrstvou je separační fólie proti úniku matrice z výztuže, neboť v prepregu je přesně definované množství matrice od výrobce. V použitém prepregu tvoří matrice 42 % hmotnosti. Dále se pokládá odsávací rohož a nakonec vakuovací fólie přes těsnící pásku. Na díl je potřeba dostatečná velikost vakuovací fólie, aby nikde nevznikaly tzv. mosty, což jsou místa, kde fólie po vakuaci nedoléhá na povrch tkanin pod ní a zůstává napnutá nad formou. Vakuovací pytel s mosty na fólii nevydrží vakuování nebo cyklus v autoklávu, prepregové potahy tím pádem nejsou dotlačené na formu a díl nedosahuje žádoucí kvality. Vyskládání prepregu jednoho kola se zavakuováním trvá přibližně 18 hodin. Kvalitně zavakuované díly je dobré nechat v podtlaku 12 hodin a poté je nechat projít předepsaným cyklem v autoklávu. Na obr.74 jsou zavakuované tři formy pro výrobu jednoho kola nachystané na cyklus v autoklávu ve firmě JetSurf – MSR Engines s.r.o. Na obr. 73 je vytvrzovací cyklus doporučený výrobcem. Doporučuje se podtlak na dílu o hodnotě $-0,9$ bar, přetlak 5 bar v autoklávu, pro nahřívání teplotní gradient $2\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ na teplotu $115 \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$, udržet tuto maximální teplotu po $90 \pm 5\text{ min}$ a následně ochlazovat s teplotním gradientem $15 \pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ do $40\text{ }^{\circ}\text{C}$, nakonec povolit vakuum a přetlak.



Obrázek 73 – Vytvrzovací cyklus doporučený výrobcem prepregu [51]

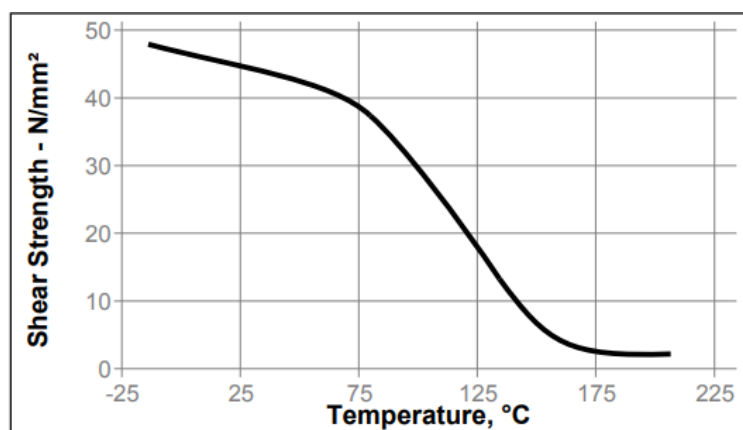


Obrázek 74 – Zavakuované formy připravené na vytvrzovací cyklus v autoklávu

Materiál s velkou měrnou tepelnou kapacitou cyklus ovlivňuje. Zásadní pro vytvrzování je dosáhnout teploty předepsané v doporučeném cyklu z obr. 74 na prepregu. Proto se na prepregu a také na formách měří teploty přímo a automatický autokláv se těmito teplotami řídí.

Vytvrzené díly se poté rozbálí, odstraní se všechny spotřební materiál po strhací fólii, včetně. Dále se ořezou a zabrousí přesahy kompozitu a díly se spasují dohromady. V této chvíli se vyfrézuje do skořepin otvor pro uložení vzduchového ventilku ve vnější skořepině ráfku a přístupový otvor k němu z diskové strany. Po spasování se ještě přebrousí plochy pro lepený spoj, všechny díly se očistí a odmastí.

Za nejlepší lepidlo pro slepení všech dílů kola k sobě byl zvolen produkt Loctite Hysol 9514. Jedná se o jednosložkové epoxidové lepidlo s výbornými mechanickými vlastnostmi i za zvýšené teploty. Pevnost ve smyku vybraného lepidla (obr. 75) v pracovních podmínkách kola překonává všechny další zvážené varianty dvakrát až čtyřikrát a má dlouhou životnost.



Obrázek 75 – Pevnost ve smyku lepidla Hysol 9514 za tepla [49]

Lepidlo bylo aplikováno na všechny lepené plochy viz obr. 76. Bylo vloženo připravené pěnové jádro Rohacell, středová kruhová vložka a uhlíkové skořepiny se skládaly dohromady. Pozornost musela být věnována přesnému úhlovému natočení vzduchového ventilku a přístupové díře k němu ve skořepině disku.



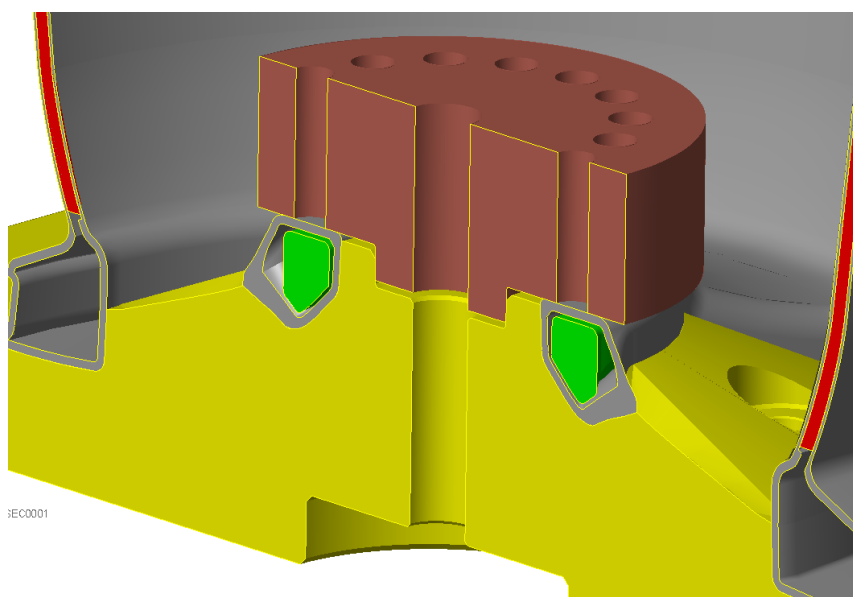
Obrázek 76 – Lepení karbonových skořepin dohromady

Po složení skořepin bylo kolo pomocí přípravku staženo na formu disku kola a zezhora bylo kolo v peci zatíženo závažím o hmotnosti 80 kg (obr. 77) kvůli rozpínání lepidla při vytvrzování. Lepidlo bylo dle materiálového listu vytvrzeno ve 120 °C po dobu 60 minut v peci na leteckém ústavu FSI VUT. V materiálovém listu jde vidět, že při vytvrzení lepidla na 150 až 175 °C lze dosáhnout ještě vyšší pevnosti ve smyku. Použitá pryskyřice v prepregu má ale maximální teplotní odolnost 130 °C.



Obrázek 77 – Dotažení kola do formy pomocí přípravku, vytvrzování lepidla Hysol

Detail návrhu ocelového přípravku pro stahování kola na vytvrzování a vyvrtání děr pro unášecí kolíky je na obr. 78. Spodní osazení přípravku je obrobena pro přesné dosednutí na formu disku. Přípravek je vysoký z důvodu, aby zajistil vrtání děr pro unášecí kolíky v ose kola.



Obrázek 78 – Sestava kola na formě s přípravkem na vrtání děr pro unášecí kolíky

Po slepení bylo kolo upnuto na soustruh a pomocí úchylkoměru změřeno házení v radiálním i axiálním směru. Část házení byla tvořena pouze nerovnostmi v povrchu. Házení ale musela být věnována další pozornost. Házením kol na dosedacích plochách pneumatiky na ráfek se věnuje další kapitola. Problémem bylo i házení na dosedací ploše centrální utahovací matice kola na náboj. Matice byla před úpravou dosedací plochy opřena pouze o část plochy. Tímto způsobem by nemohla fungovat správně. Proto bylo kolo přesně upnuto do soustruhu a byla obrobena vrstva o tloušťce 0,12 mm pro srovnání povrchu dosedací plochy. Tento úběr materiálu se týkal především povrchové vrstvy pryskyřice. Vlákná byla obrobena pouze minimálně na jedné straně. Následně byla plocha znovu změřena a házení bylo minimální. Příčinou házení byly zjevně povrchové nerovnosti.



Obrázek 79 – Soustružení dosedací plochy pro centrální utahovací matici kola

Touto metodou byla prozatím vyrobena čtyři kola o třech různých skladbách tkanin pro testování výroby a tvoření kol s různými vlastnostmi pro testování.

10 TESTOVÁNÍ KOL

10.1 MONTÁŽ PNEUMATIK

Kompozitní kolo může být špatnou manipulací poměrně snadno poškozeno. Poškození kola může být nebezpečné i pro montážního pracovníka. Z toho důvodu byl navržen přípravek. Jedná se o dvojici svařenců propojených závitovou tyčí pro jejich propojení a stažení kola v jeho ose. Každý svařenec se skládá ze dvou výpalků pomocí laserového paprsku z ocelových plechů. Jeden plech svojí geometrií dosedá na vnější plochu okraje ráfku těsně pod lem tvaru L. Tímto způsobem je řešené vystředění dosednutí přípravku na kolo. Druhý plech je položený na první a svou hranou kopíruje vnější okraj ráfku včetně lemu tvaru L. Přípravek je spojen malými svary na hranicích děr pro to určených. Oba vnější svařené kotouče mají výřez pro snadné uchopení a otvor pro manipulaci se vzduchovým ventilkem. Kolo je chráněno před silným čtyřbodovým upnutím spodního okraje ráfku do přístroje na montáž pneumatik. Je chráněno před poškozením okrajů ráfku špatnou metodikou montáže pneumatiky a chrání před havárií kola přehuštěním jeho vnějším vyztužením. Přípravek byl testován na montážní zařízení pneumatik Hunter TCX 525 v prostorách Ústavu automobilního a dopravního inženýrství na FSI VUT.



Obrázek 80 – Vyrobený přípravek na montáž pneumatik na kolo

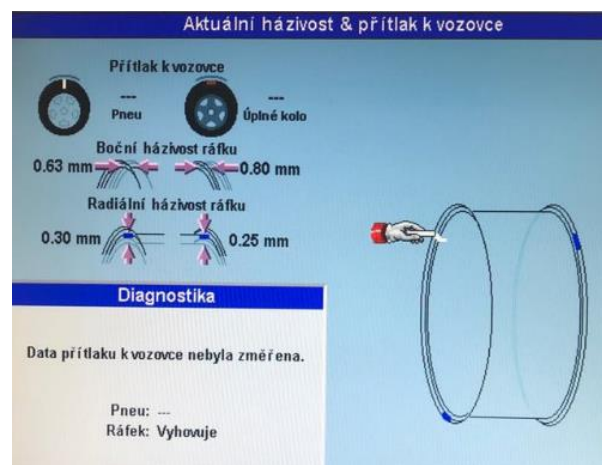
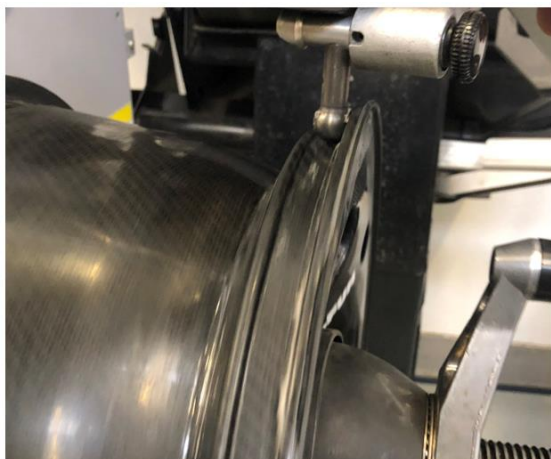
10.2 MĚŘENÍ NA SYSTÉMU PRO KONTROLU VIBRACÍ

Pro ověření geometrické přesnosti dosedacích ploch ráfku a vyvážení vyrobených kol proběhlo na Ústavu automobilního a dopravního inženýrství na FSI VUT měření na systému pro kontrolu vibrací Hunter VAS 6230, jinak známého pod označení vyvažovačka. Kolo má v oblasti hlavy kola neobvyklý rozměr. Proto bylo nutné pro měření vyrobit adaptér pro vystředění a přitlačení kola na náboj vyvažovačky (obr. 81).



Obrázek 81 – Vyrobený adaptér pro vystředění a přitlačení kola na náboj vyvažovačky

Nejprve bylo změřeno házení dosedacích ploch ráfku. Pro tento účel má zařízení rameno s kulovou hlavou. Měření a diagnostika probíhá přitlačením koule na dosedací plochu za současného otáčení viz obr. 82.



Obrázek 82 – Měření házení dosedací plochy ráfku, diagnostika házení ráfku

Výsledky měření házení dosedacích ploch ráfku všech kompozitních kol jsou v tabulce. Pro porovnání bylo změřeno i házení kola OZ Racing.

Tabulka 7 – Přehled házení vyrobených karbonových kol a kola OZ Racing

Označení kola	1	2	3	4	OZ Racing
Vnitřní boční házivost ráfku	0,63 mm	0,12 mm	0,47 mm	0,45 mm	0,10 mm
Vnější boční házivost ráfku	0,80 mm	0,21 mm	0,59 mm	0,66 mm	0,18 mm
Vnitřní radiální házivost ráfku	0,30 mm	0,44 mm	0,42 mm	0,11 mm	0,05 mm
Vnější radiální házivost ráfku	0,25 mm	0,89 mm	0,93 mm	0,23 mm	0,10 mm

Házení vychází z kompletace jednotlivých částí skořepin do celku broušením. Kola se silnými kompozitními potahy mají velkou radiální nepřesnost na straně disku. Příčinou může být mírné natočení ráfkových částí během lepení. Pokud to bude při dalším testování problém, je možné po obvodu přidat materiál a plochy dodatečně obrobit.

Diagnostika vyvážení samotných kol bez pneumatik ukázala nevývahy viz tabulka 8

Tabulka 8 – Přehled diagnostiky nevývahy kol

Označení kola	1	2	3	4
Požadavek na vyvážení v bodě vnitřní straně kola	0 g	0 g	0 g	0 g
Požadavek na vyvážení v bodě vnější straně kola	0 g	15 g	25 g	0 g

Vyvažování kol samotných pomocí závaží nedává smysl. Jde pouze o orientační měření přesnosti výroby za účelem jejího zdokonalení. Vyvážení dává smysl v sestavě kola s pneumatikou. Toto měření doposud nebylo uskutečněno. Bude nutné dále upravit přípravek na upnutí kola, aby zařízení spustilo analýzu nevývahy s odvalováním kola na válci. Pro orientaci ve vyvažování byla zvážena sada zcela nových pneumatik Continental C18. V jedné sadě byly pneumatiky o hmotnostech 3929 g, 3947 g, 3947 g a 4024 g. Jejich největší hmotnostní rozdíl činí 95 gramů.

11 ZHODNOCENÍ

11.1 FUNKČNOST

U hodnocení navržené konstrukce po funkční stránce je na prvním místě splněný soulad s pravidly soutěže, pro kterou je kolo určeno. Navržené kolo je kompatibilní se zástavbou vozidla. Dobře dosedá na náboj a unášecí kolíky náboje, přičemž při montáži s ničím nekoliduje. Po úpravě dosedacích ploch centrální matice jde o geometricky správný spoj. Montáž pneumatiky na kolo je naprosto bezproblémová. Kola i po několika týdnech po úvodním huštění neztratila významně tlak. Vzduchové ventilký na kolech jsou dobře přístupné.

Hmotnost kol víceméně odpovídá návrhu kol. Oproti hořčíkovým kolům OZ Racing o hmotnosti 2,47 kg jsou všechna vyrobená kola lehčí. Kolo č. 4 je vůči kolu OZ Racing lehčí o 32,5 %. To byla vize a cíl této práce. Tabulka 9 ukazuje detailní úspory hmotnosti oproti používanému hořčíkovému kolu.

Tabulka 9 – Přehled hmotnostních úspor na vyrobených kolech oproti OZ Racing

Označení kola	1	2	3	4
Hmotnost kola	1797 g	1949 g	2018 g	1668 g
Hmotnostní úspora	673 g	521 g	452 g	802 g
Procentuální úspora	27,2 %	21,1 %	18,3 %	32,5 %

Tři varianty skladby (kolo číslo 2 a 3 mají stejnou skladbu tkanin) kola kompozitu byly vyrobeny pro zatěžovací testy. Jejich výsledky budou základem pro další kroky.

V rámci posouzení funkčnosti je nutné zmínit házení dosedacích ploch ráfku. Nejvíce hází plochy na straně disku, a to radiálně. Změřené hodnoty nelze zanedbat. Jedním z dalších kroků bude tyto nepřesnosti odstranit.

Zhodnocení tuhosti a pevnosti kol doposud není možné. Tyto experimenty mají nyní nejvyšší prioritu.

11.2 TECHNOLOGIE VÝROBY

Všechny technologické procesy výroby na sebe dobře navazovaly. Byly vyrobeny 4 prototypy. Hodnocení technologie musí začít u výběru metody výroby. Pro výrobu kompozitních kol v malé sérii se výroba z prepregových tkanin a vytvrzováním v autoklávu osvědčila. Nářezový plán je v pořádku, jednotlivé části se dobře překrývají. Díly prepregu jsou přesně vyřezané a dobře se s nimi pracuje. Pokládání prepregu je časově přijatelně náročné. Celé laminování je čistý proces. Další nutnou oblastí ke zhodnocení návrhu je geometrie kola. Kolo je vyrobitelné. Tvar je v pořádku. Pro zjednodušení výroby ale existuje několik míst, kde by se například mohl upravit tvar s cílem zvětšit úkosity především na vnitřní ráfkové formě. Hliníková forma produkuje díly se skvělým povrchem. Kvůli vizi výroby kola v jednom kuse je forma stále poměrně mohutná, aby byla dostatečně tuhá pro stahování jednotlivých forem do sebe a

přítlačování prepregu do sebe. Manipulace forem není jednoduchá kvůli jejím hmotnostem. Forma by mohla být méně objemná. Pomohlo by to urychlení procesu dochlazování cyklu autoklávu. Všechny formy v jednom cyklu prodloužily při výrobě standardní cyklus o 30 %.

Experimentem zjištěný proces pro tvarování jádra je rychlý a přináší dobré výsledky. Příprava hliníkových jader je také bezproblémová.

Výroba kola ze třech samostatných skořepin je bezpečná pro formy, ale poměrně nepřesná. Rozdíl hmotnosti u kol č. 2 a 3 se stejnou skladbou tkanin vznikl broušením a patrně především rozdílným množstvím lepidla pro slepení dílců. Hmotnostní rozdíl 69 gramů je velký a v případě výroby dalších kusů kol metodou lepení ze 3 kusů skořepin bude na množství lepidla kladen větší důraz. Kontrola geometrie při spasování ručním řezáním a broušením má své limity přesnosti. Ruční lepení kol dohromady je nepřesné z hlediska dávkování lepidla. Je to nákladný a dlouhý proces ve výrobě navíc.

11.3 NÁVRHY PRO ZLEPŠENÍ

Házení kola na dosedacích plochách ráfku je problém metody výroby ze třech skořepin, který je špatně odstranitelný. Výroba ze dvou kusů vylaminovaných skořepin by měla řešit házení na dosedacích plochách ráfku. Jeden díl by se skládal z vnější a vnitřní ráfkové části vylaminované dohromady včetně pěnového jádra. Druhý díl by byla disková část, která by se stále lepila po obvodu okraje ráfku a na plochy pro lepený spoj na hranách skořepin v oblasti paprsků kola. Výroba kvalitního kompozitu mezi dvěma formami komplexního tvaru je zatím problém. Konkrétně je řešeno vytvoření skladby o přesné tloušťce potahu pro dostatečné nasycení povrchu pryskyřicí a současné dovření formy. V případě nedostatečného dovření formy se riskuje poškození formy. Poslední experimenty této problematiky měly dobré výsledky. Výroba kola touto metodou proběhne v krátkém horizontu.

Výroba kola v jednom kuse má největší potenciál ze všech možností. Může být geometricky nejpresnější, dynamicky vyvážené, být nejlehčí, nejtužší a nejpevnější. V tvarech tvaru T, například na vnějším spoji ráfku s diskem, může být položený prepreg s rozložením zatížení na tah/tlak, dříve než smykem nebo odlupem pomocí lepeného spoje. Je zde problém přesné skladby mezi komplexní geometrií forem stejně jako v případě laminování ráfkové části v předchozí kapitole.

Hlavním problémem výroby kola v jednom kuse je udělat ho duté. Pro výrobu takovýchto dutých dílů existuje mnoho metod. Do formy na disk může být udělán otvor, který by korespondoval s otvorem pro vzduchový ventil a pro přitlačení prepregu na stěny formy uvnitř dutého disku by se použila jedna z variant nafukovacích pytlů nebo balonků pro toto určených. U této metody je velice pravděpodobné, že pytel po vytvrzení z kola nedostaneme. To nemusí být problém, pokud je lehký. Může se jednat o latexový balonek vyráběný postupným nanášením latexu do formy. Použití latexového pytle je omezeno jeho odolností do maximálně 80 °C. Alternativou je plastický tunel, který by se dovnitř navrstvil, forma by se uzavřela a pytel by se tlakoval. Tato metoda nebyla odborníky z praxe doporučována. Argumenty bylo, že pytel zaručeně praskne, uvnitř by navíc zůstalo velké množství plastického pytle. Existují výrobci speciálních balonků přesně pro tyto účely. Zakázková výroba těchto balonků je ale příliš drahá. Výrobci jsou zaměřeni na výrobu dílů větších sérií. Další možností je vytisknout plastové jádro na 3D tiskárně z filamentu, který je možné rozpustit kyselinou. Materiál se ale používá především jako pozitivní forma. Prakticky nemá teplotní roztažnost. Pro jeho použití by musela být dokonale známá tloušťka prepregového potahu na celém povrchu formy. V případě, že ne, bylo by jádro moc malé, takže by se potah nedotlačil,

anebo naopak moc velké a forma by se nedovřela. V takovém případě je nejpravděpodobnějším výsledkem zdeformovaný díl a možnost poškození formy. Rozpouštění kyselinami se s tímto materiálem realizuje pomocí většího průtoku jádrem. Nově objevenou metodou je 3D tisk vodou vyplavitelného jádra s označením. I tyto metody mají vysoké nároky na přesnost. Jejich tepelná roztažnost v autoklávu při teplotě 120 °C je v jednotkách desetin milimetru. Na trhu je nově materiál pro výrobu vodou vyplavitelného jádra s dostatečnou teplotní odolností a velkou tepelnou roztažností až 30 %. Materiál se vytvrzuje ve zvláštní formě nebo obrábí. V současné chvíli je nákup materiálu v řešení. Upravený nářezový plán je pro tuto metodu výroby připravený, pěnové jádro je vyrobené, středová hliníková vložka také.

ZÁVĚR

Nejprve byla provedena rešerše provedení sportovní kol a jejich dílčích částí pro orientaci v problematice kol. Následně byla provedena důkladná rešerše oblasti kompozitních materiálů na bázi polymerů. Byly shrnuty požadavky na návrh kola a analyzovány silové účinky působící na kolo. V rámci konstrukce kola byla vytvořena sbírka CAD modelů a sestav obsahující geometrii kola a jeho dílčích částí. Byly provedeny tahové testy materiálu pro další budoucí analýzy návrhu. Na základě zatížení působícího na kolo bylo navrženo testování. Byl vytvořen návrh konstrukce formy pro výrobu kompozitních kol a přípravky k tomu potřebné. Na základě vytvořených modelů a výrobních výkresů byly tříosým obráběním obrobena hliníkové formy a přesnost jejich výroby byla ověřena pomocí technologie přesného optického 3D skenování. Jednalo se o přesné obrobení. Pro menší obráběné díly formy a středové vložky byl vytvořen obráběcí program na tříosou CNC frézku, vyroben přípravek pro upínání ve stroji a části byly obráběné ve vlastní režii. Pro výrobu kola bylo dále nutné vyrobit přípravek na formování strukturální pěny a s jeho pomocí vyrobit jádra do ráfku kola. Na základě geometrie formy byl navržen nářezový plán prepregových dílů. Díly byly poté ve vlastní režii vyřezány na numericky řízeném řezacím plotru. Na všech formách byl vyleštěn povrch pro laminování. Následovala výroba jednotlivých laminátových dílů kola. Díly byly vytvořené vyskládáním nářezů do formy, připravené na vytvrzování a vytvrzené v autoklávu. Následně bylo kolo dokončené spasováním a slepením. Pro vytvoření děr pro unášecí kolíky bylo nutné vyrobit přípravek. Analýzou geometrické přesnosti kola bylo zjištěné házení v oblasti dosedací plochy pro centrální utahovací matici. Tento nedostatek byl odstraněn dodatečným obrobením dílu. Pomocí navrženého a vyrobeného přípravku pro bezpečnou montáž pneumatik na kolo byly pneumatiky namontovány na celkem 4 vyrobené prototypy kompozitní kola. Bylo dosaženo až 32,5% snížení hmotnosti kola oproti původní používané variantě kol z hořčíkových slitin. Konkrétně to je hmotnost 1688 gramů oproti 2470 gramům hořčíkových kol. Tužší varianty kola váží okolo 1800 a 2000 gramů.



Obrázek 83 – Detail vyrobeného karbonového kola na monopostu Dragon 9

Prototypy byly dále proměřeny na vyvažovacím zařízení. Některá kola jsou perfektně vyvážená a dosedací plochy mají minimální boční i radiální házení. Jiná kola mají značné radiální házení na vnější dosedací ploše pro pneumatiku na ráfku. Tyto vady vychází z nepřesností výroby kola hlavně kvůli broušení a lepení jednotlivých dílů výroby, přestože se kolo lepí stažené v přípravku. Tyto vady jsou opravitelné.

Vyrobená kola jsou kompatibilní se zástavbou vozidla. Dosedají na náboj a unášecí kolíky náboje a s ničím nekolidují. Po úpravě dosedacích ploch centrální matice jde o geometricky správný spoj. Přestože u karbonových kol bývá problém s netěsností, v tomto případě s těsností kol není žádný problém. Vzduchové ventilký na kolech jsou dobře přístupné.

Zhodnocení tuhosti a pevnosti kol doposud není možné. Tyto experimenty mají nyní nejvyšší prioritu. Pro další postup musí být kola otestována. Zhodnocení kol po funkční stránce je důkladněji popsáno v kapitole 10.

Přesnost výroby a kvalita kol může být zvýšena výrobou ze dvou kusů nebo ideálně v jednom. Na obou těchto variantách pracuji. Metodika pro výrobu těmito způsoby je popsána v desáté kapitole práce.

Tato práce nekončí, bude pokračovat v nadcházejících měsících během testování monopostu Dragon 9. Projekt je stále velkou výzvou. Dosavadní práce na kolech byla pro mě nesmírně přínosná. Vyrobená kola jsou lehčí než původní varianta, a to byla hlavní vize a cíl této práce. Rozhodně mají kompozitní kola velký potenciál uplatnění.



Obrázek 84 – Monopost Dragon 9 s karbonovými koly z profilu

POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] CLARKE, Pat. Back to basics. In: <https://www.formulastudent.de> [online]. 2016 [cit. 2016-05-16]. Dostupné z: /news-details/article/pats-corner-back-to-basics/
- [2] MILLIKEN, William F. a Douglas L. MILLIKEN. *Race car vehicle dynamics*. Warrendale, PA, U.S.A.: SAE International, c1995. ISBN 978-1-56091-526-3.
- [3] STANIFORTH, Allan. *Competition car suspension: a practical handbook*. 4th ed. Newbury Park, Calif.: Haynes, 2006. ISBN 978-1844253289.
- [4] VLK, DRSC., Prof. Ing. František. *Podvozky motorových vozidel*. 3. aktualizované vydání. Brno: fvlk, 2006. ISBN 80-239-6464-X.
- [5] JAN, Zdeněk, ŽDÁNSKÝ, Bronislav a ČUPERA Jiří. *Automobily (1): Podvozky*. Brno: Avid, spol. s r.o., 2009. 245 s. ISBN 978-80-87143-11-7.
- [6] Kola a pneumatiky [online], 2009. [cit. 2017-05-25]. Dostupné z WWW: http://mechmes.websnadno.cz/dokumenty/pri-teo-09.0_kolaapneumatikyuvod.pdf
- [7] ALU kolo ALUTEC spyke [online]. In: . [cit. 2017-05-25]. Dostupné z: https://www.az-pneu.cz/wp-content/uploads/2016/07/alu_kolo_alutec_spyke-1.jpg
- [8] VLK, František. *Zkoušení a diagnostika motorových vozidel*: 2. vydání Brno: Nakladatelství a vydavatelství VLK, 2005. 576 s. ISBN 80-239-3717-0.
- [9] VLK, František. *Diagnostika motorových vozidel*: 1. vydání Brno: Nakladatelství a vydavatelství VLK, 2006. 442 s. ISBN 80-239-7064-X
- [10] *Sparco wheels Asseto Gara* [online]. In: [cit. 2017-05-25]. Dostupné z: <http://www.ozracing.com/wheels/sparco/assetto-gara>
- [11] *OZ Racing forged superforgiata* [online]. In: [cit. 2017-05-25]. Dostupné z: <http://www.ozracing.com/wheels/oz-atelier-forged/superforgiata-central-lock>
- [12] *Koenigsegg Agera wheel* [online]. In: [cit. 2017-05-25]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=PGGiuaQwcd8>
- [13] *Koenigsegg Regera wheel* [online]. In: [cit. 2017-05-25]. Dostupné z: <http://www.autoguide.com/auto-news/2016/10/top-5-coolest-factory-wheels-on-production-cars.html>
- [14] *Carbon revolution webpage* [online]. [cit. 2019-05-24]. Dostupné z: <http://www.carbonrev.com>
- [15] *HRE Semi Carbon wheel* [online]. In: [cit. 2017-05-25]. Dostupné z: <http://www.hrewheels.com/news/hre-previews-cf2-carbon-fiber-wheels-at-sema-2012#.WSGUy2iGNhE>
- [16] *HighOctaneMotorsports* [online]. In: . [cit. 2017-05-25]. Dostupné z: https://www.facebook.com/pg/octanes/photos/?ref=page_internal

- [17] *DHBW Engineering Stuttgart* [online]. In: [cit. 2017-05-25]. Dostupné z: https://www.facebook.com/pg/DHBW-Engineering-Stuttgart-eV-179577805402771/photos/?ref=page_internal
- [18] *Formula Student TU Delft* [online]. In: [cit. 2017-05-25]. Dostupné z: https://www.facebook.com/pg/FSteamDelft/photos/?ref=page_internal
- [19] *FSG Rules* [online]. In: [cit. 2017-05-25]. Dostupné z: <https://www.formulastudent.de/fsg/rules/>
- [20] *FSG Media* [online]. In: [cit. 2017-05-25]. Dostupné z: <http://media.formulastudent.de>
- [21] KRISHAN KUMAR CHAWLA. *Composite materials science and engineering*. 3rd ed. New York: Springer, 2012. ISBN 978-038-7743-653.
- [22] CHAWLA, Krishan Kumar. *Composite Materials*. New York: Springer New York, 2012. 542 s. ISBN 978-0-387-74365-3.
- [23] ŽÍDEK, Tomáš. *Aplikace sendvičové konstrukce na formulový vůz* [online]. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2016 [cit. 2017-05-25]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/60674>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Letecký ústav. Vedoucí práce František Löffelmann.
- [24] JURAČKA, PH.D., Doc. Ing. Jaroslav. *Kompozitní konstrukce v letectví* [online]. Letecký Ústav, FSI VUT, 2011 [cit. 2017-05-25].
- [25] URBAN, Jakub. *Vývoj kompozitního 10" disku pro účely Formule Student* [online]. Praha [cit. 2017-05-25]. Dostupné z: <http://stc.fs.cvut.cz/pdf15/5505.pdf>. Vedoucí práce Ing. Michal Vašíček.
- [26] GILLESPIE, T. D. *Fundamentals of vehicle dynamics*. Warrendale, PA: Society of Automotive Engineers, c1992. ISBN 15-609-1199-9.
- [27] SAHDEV, Rohan. *Weight, Mass Load and Load transfer in a vehicle*. *LinkedIn - Slideshare* [online]. 2013, 31 [cit. 2017-05-25]. Dostupné z: https://www.slideshare.net/billharbin/vehicle-lateral-load-transfer-parts-iiiiimar13?next_slideshow=1
- [28] KATZ, Joseph. *Race car aerodynamics: designing for speed*. Cambridge, MA, USA: R. Bentley, c1995. ISBN 978-083-7601-427.
- [29] *Kammova elipsa* [online]. In: [cit. 2017-05-25]. Dostupné z: http://jenikovo.wz.cz/Foto/Full/Kammova_kruznice.jpg
- [30] SHIGLEY, Joseph Edward, Charles R. MISCHKE a Richard G. BUDYNAS, VLK, Miloš, ed. *Konstruování strojních součástí*. V Brně: VUTUM, 2010. Překlady vysokoškolských učebnic. ISBN 978-80-214-2629-0.
- [31] SMITH, Carroll. *Tune to win*. 1978. Fallbrook, CA: Aero Publishers, c1978. ISBN 0-87938-071-3.

- [32] KLEIN, Bernd. FEM Grundlagen und Anwendungen der Finite-Element-Methode im Maschinen- und Fahrzeugbau. Wiesbaden: Vieweg + Teubner Verlag, 2012. 428 s. ISBN 978-3-8348-1603-0.
- [33] OZ Drawing Formula Student Magnesium CL [online]. In.: [cit. 2017-05-26]. Dostupné z:
http://www.ozracing.com/images/content/OZ_Drawing_Formula_Student_Magnesium_CL.pdf
- [34] BURŠA, PH.D., prof. Ing. Jiří. Metoda konečných prvků. In: Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky: Home page of prof. Burša [online]. Brno, 2007 [cit. 2016-05-18]. Dostupné z: http://www.umt.fme.vutbr.cz/~jbursa/Stud_opory/MKP4.pdf
- [35] JANÍČEK, DRSC., Prof. Ing. Přemysl, Prof. Ing. Emanuel ONDRÁČEK, CSC., Prof. RnDr. Ing. Jan VRBKA, DRSC. a Ing. Jiří BURŠA, PH.D. MECHANIKA TĚLES PRUŽNOST A PEVNOST I. 3. přepracované vydání. Vysoké učení technické v Brně: CERM, 2004. ISBN 80-214-2592-X.
- [36] LAUDA, Niki. *The art and science of Grand Prix driving*. Osceola, Wis.: Motorbooks International, 1977. ISBN 978-0879380496.
- [37] SMITH, Carrol. *Drive to win: Essential Guide to Race Driving*. 2012. Carroll Smith Consulting. ISBN 978-0615592572.
- [38] *Formula 1 FIA Technical regulations 2019* [online]. [cit. 2019-05-24]. Dostupné z: <https://www.fia.com/file/78014/download/26183>
- [39] *Koenigsegg Carbon Wheels weight* [online]. [cit. 2019-05-24]. Dostupné z: www.roadandtrack.com
- [40] *Porsche Carbon Wheels* [online]. [cit. 2019-05-24]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=6RbJbh2Pral>
- [41] *Koenigsegg Carbon Fiber Wheels Production* [online]. [cit. 2019-05-24]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/user/TopGear>
- [42] *Carbon Rims Blackwave* [online]. [cit. 2019-05-24]. Dostupné z: blackwave.de
- [43] *Aero Consultants AG Rapid Core Mandrel* [online]. [cit. 2019-05-24]. Dostupné z: <http://www.aero-consultants.ch/>
- [44] *Hair vs carbon fiber* [online]. [cit. 2019-05-24]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/Carbon-fiber-compared-with-human-hair-photo-credit-Anton_fig3_283308870
- [45] EHRENSTEIN, G. W.: Polymerní kompozitní materiály. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009, 351 s. ISBN 978-80-86960-29-6. [online]. [cit. 2019-05-24].
- [46] *Schéma laminonání infuzí* [online]. [cit. 2019-05-24]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/Schematic-diagram-of-vacuum-resin-infusion-process_fig3_309593729

- [47] *Laminování RTM* [online]. [cit. 2019-05-24]. Dostupné z: <https://www.rtmcomposites.com/>
- [48] JELÍNEK, J. Návrh kola vozidla Formule Student s využitím kompozitních materiálů. Brno, 2017. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství. 64 s. Vedoucí diplomové práce Pavel Ramík.
- [49] *Data Sheet Loctite Hysol 9514* [online]. [cit. 2019-05-24]. Dostupné z: <https://www.loziska.com/store/9514-en.pdf>
- [50] *Temperační cyklus Epolam* [online]. [cit. 2019-05-24]. Dostupné z: <https://www.tooling.cz/>
- [51] *Fiberpreg T245 EP1 Datasheet* [online]. [cit. 2019-05-24]. Dostupné z: <http://www.fiberpreg.de/>
- [52] *Přehled vlastností hliníkových slitin* [online]. [cit. 2019-05-24]. Dostupné z: <http://www.alfun.cz/hlinik>

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

CAD		Computer aided design
3D		Trojrozměrný
FSI VUT		Fakulta strojního inženýrství Vysokého učení technického
FRP		Fiber Reinforced Plastic
FFT		Fast Fourier Transformation
GF		Glass Fiber
AF		Aramid Fiber
CF		Carbon Fiber
RTM		Resin Transfer Moulding
HP RTM		High Pressure Resin Transfer Moulding
CG		Těžiště vozidla
p		Roll, tj. klopení
q		Pitch, tj. klonění
R		Yaw, tj. stáčení
GPS		Global Position System
SAE		Society of Automotive Engineers
TU		Technical University
UD		Uni Directional
x		Osa podélného směru
y		Osa bočního směru
z		Osa vertikálního směru
K	[-]	Součinitel utahovacího momentu
k	[-]	Konstanta pružiny
ω	[Hz]	Frekvence
M, m	[kg]	Hmotnost
h	[m]	Výška
l_r	[m]	Rozvor vozu – podélná vzdálenost mezi osami náprav
o	[m]	Obvod
r	[m]	Poloměr
a	[m·s ⁻²]	Zrychlení
g	[m·s ⁻²]	Gravitační zrychlení
B_k	[N]	Brzdná síla

F	[N]	Síla
R_k	[N]	Výsledná síla pneumatiky
S_k	[N]	Boční síla
Z_k	[N]	Radiální reakce kola
ε	[rad·s ⁻²]	Úhlové zrychlení

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 – Soutěž Formula Student Germany [20]	11
Obrázek 2 – CAD návrh monopostu Dragon 9	13
Obrázek 3 – Hlavní rozměry diskového kola [4]	16
Obrázek 4 – Typy zálisu kola [4]	17
Obrázek 5 – Části ráfku [4]	17
Obrázek 6 – Tvary bezpečnostních ráfkových profilů [5]	18
Obrázek 7 – Přehled označení ráfků [5]	18
Obrázek 8 – Bezpečnostní šrouby v kolech [36]	19
Obrázek 9 – Pozice vzduchového ventilku v kole [37]	19
Obrázek 10 – Diskové kolo z lehkých slitin [6]	20
Obrázek 11 – Paprskové kolo [7]	20
Obrázek 12 – Paprskové kolo OZ Racing Superforgiata [11]	21
Obrázek 13 – Paprskové kolo Sparco Assetto Gara [10]	21
Obrázek 14 – Karbonová kola Koenigsegg; Agera [12], Regera [13]	22
Obrázek 15 – Karbonové kolo Carbon Revolution [14]	22
Obrázek 16 – Karbonové kolo Porsche [40]	23
Obrázek 17 – Semikarbonová kola HRE [15]	23
Obrázek 18 – Hliníkové kolo značky Keizer; Hořčíkové kolo značky OZ Racing	24
Obrázek 19 – Kolo vlastní výroby týmu High Octane Motorsports [16]	24
Obrázek 20 – Semikarbonová kola týmu Rennteam Stuttgart e.v. a UNI Erlangen	25
Obrázek 21 – Semikarbonová kola týmu DHBW Engineering Stuttgart e.v. [17]	25
Obrázek 22 – Blackwave semikarbonové kolo Formula Student [42]	26
Obrázek 23 – Kolo týmu Formula Student Team Delft [18]	26
Obrázek 24 – Celokarbonová kola týmů TU Graz a Joanneum Fachhochschule Graz	27
Obrázek 25 – Duté zadní kolo týmu TU Fast München [43]	27
Obrázek 26 – Vady pneumatik [37]	28
Obrázek 27 – Porovnání uhlíkového vlákna s lidským vlasem [44]	30
Obrázek 28 – Druhy vazeb výztuží [23]	31
Obrázek 29 – Přizpůsobení plátnové a keprové vazby povrchu [24]	31
Obrázek 30 – Příklad skladby tkanin	32
Obrázek 31 – Schéma infuzního laminování [46]	36
Obrázek 32 – Navíjecí zařízení pro výrobu ráfků Porsche kol [40]	37
Obrázek 33 – Výroba karbonových kol Porsche [40]	38
Obrázek 34 – Výroba karbonových kol Koenigsegg [41]	39
Obrázek 35 – Prvky v kontaktu s kolem	40
Obrázek 36 – Model hořčíkového kola OZ Racing	43
Obrázek 37 – Příčný průřez kolem OZ Racing magnesium	43
Obrázek 38 – Příčný průřez navrhnutým karbonovým kolem	44
Obrázek 39 – Koncepty paprsků disku kola	45
Obrázek 40 – Středové hliníkové vložky do kola	46
Obrázek 41 – Model a render karbonového kola	46
Obrázek 42 – Finální návrh středové části kola	47
Obrázek 43 – Příčný průřez finální sestavou kola	47
Obrázek 44 – CAD sestava monopostu Dragon 9 z profilu – uložení navržených kol	48
Obrázek 45 – CAD začlenění kola do sestavy vozu Dragon 9	48
Obrázek 46 – SAE souřadnicový systém vozidla [26]	49
Obrázek 47 – Kammova elipsa přilnavosti [29]	50

Obrázek 48 – 1. a 3. hlavní napětí ve vrstvách laminátu [48]	54
Obrázek 49 – Vzorky určené pro tahovou zkoušku, tahová zkouška.....	55
Obrázek 50 – Výsledky tahové zkoušky	55
Obrázek 51 – Zkouška kola odvalováním [25]	56
Obrázek 52 – Zkouška ohybem za rotace [25]	56
Obrázek 53 – GPS mapa tratě	57
Obrázek 54 – Sestava pěti hlavních výrobních forem a kola	60
Obrázek 55 – Dosedací plochy na dělicí rovině ráfkové a diskové formy.....	61
Obrázek 56 – Příločky na formu.....	61
Obrázek 57 – Hliníkové polotovary na formy.....	62
Obrázek 58 – Výroba forem na kolo z hliníkových bloků, obrobené formy.....	62
Obrázek 59 – Obráběcí program na výrobu příložky	63
Obrázek 60 – Obrábění příložky, vyrobené příložky	63
Obrázek 61 – Příprava formy na přesné optické 3D skenování	64
Obrázek 62 – Přesné optické 3D skenování formy na ráfek	64
Obrázek 63 – Protokoly geometrických úchylek z výroby versus v návrhu	65
Obrázek 64 – Nářezový plán karbonového kola	66
Obrázek 65 – Řezání prepregu na plotru	66
Obrázek 66 – Temperační cyklus pryskyřice Axson Epolam 2092 [50].....	67
Obrázek 67 – Formování pěnového jádra Rohacell	67
Obrázek 68 – Obráběcí program středové vložky do kola	68
Obrázek 69 – Vyrobené středové vložky do kola.....	68
Obrázek 70 – Separované formy připravené na laminování	69
Obrázek 71 – Geometrie formy s příložkami ve středu.....	69
Obrázek 72 – Formy vyskládané prepregem	70
Obrázek 73 – Vytvrzovací cyklus doporučený výrobcem prepregu [51].....	71
Obrázek 74 – Zavakuované formy připravené na vytvrzovací cyklus v autoklávu	71
Obrázek 75 – Pevnost ve smyku lepidla Hysol 9514 za tepla [49]	72
Obrázek 76 – Lepení karbonových skořepin dohromady.....	72
Obrázek 77 – Dotažení kola do formy pomocí přípravku, vytvrzování lepidla Hysol	73
Obrázek 78 – Sestava kola na formě s přípravkem na vrtání děr pro unášecí kolíky	73
Obrázek 79 – Soustružení dosedací plochy pro centrální utahovací matici kola	74
Obrázek 80 – Vyrobený přípravek na montáž pneumatik na kolo	75
Obrázek 81 – Vyrobený adaptér pro vystředění a přitlačení kola na náboj vyvažovačky	75
Obrázek 82 – Měření házení dosedací plochy ráfku, diagnostika házení ráfku	76
Obrázek 83 – Detail vyrobeného karbonového kola na monopostu Dragon 9.....	81
Obrázek 84 – Monopost Dragon 9 s karbonovými koly z profilu	82

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 – Rozdělení bodů v závodě [19]	12
Tabulka 2 – Hmotnost vozidla.....	51
Tabulka 3 – Statické rozvážení vozidla.....	51
Tabulka 4 – Celkový přítlak při ustálených rychlostech zátěžných stavů.....	51
Tabulka 5 – Přehled přítlaku generovaného aero paketem při ustálené maximální rychlosti ..	52
Tabulka 6 – Celkové rozvážení na jednotlivá kola při ustáleném zatačení.....	53
Tabulka 7 – Přehled házení vyrobených karbonových kol a kola OZ Racing	76
Tabulka 8 – Přehled diagnostiky nevývahy kol.....	77
Tabulka 9 – Přehled hmotnostních úspor na vyrobených kolech oproti OZ Racing.....	78