

České vysoké učení technické v Praze

**Fakulta strojní**

12 120 - Ústav automobilů, spalovacích motorů a  
kolejových vozidel



**Bakalářská práce**

Možnosti realizace kompozitního zavěšení  
kola vozu kategorie FSAE

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Juráš** Jméno: **Radovan** Osobní číslo: **456161**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávající katedra/ústav: **Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel**  
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**  
Studijní obor: **bez oboru**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Možnosti realizace kompozitového zavěšení kola vozu kategorie FSE**

Název bakalářské práce anglicky:

**Possibilities in Manufacturing of Composite Suspension Arms for FSE Vehicle**

Pokyny pro vypracování:

- 1) Vypracujte řešení tématu
- 2) Navrhněte variantní konstrukční řešení ramen zavěšení pro zvolený vůz s ohledem na provozní zatížení a technologické možnosti.
- 3) Varianty zhodnoťte a pro vzbranou vypracujte návrh výrobního postupu.

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

**Ing. Michal Vašíček, Ph.D., ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel FS**

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

Datum zadání bakalářské práce: **29.04.2019**

Termín odevzdání bakalářské práce: **10.07.2019**

Platnost zadání bakalářské práce: \_\_\_\_\_

Ing. Michal Vašíček, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) práce

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

prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.  
podpis děkana/ky

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

**2.5. 2019**

Datum převzetí zadání

**Juráš**  
Podpis studenta

## **Prohlášení o autorství**

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

V Praze dne .....

.....

Podpis

## **Poděkování**

Rád bych poděkoval vedoucímu Ing. Michalu Vašíčkovi Ph.D. za vedení při vypracování této bakalářské práce a trpělivost, při řešení řady problémů, které jsem během práce musel vyřešit. Také bych chtěl poděkovat firmám CompoTech PLUS s.r.o. a RaceX s.r.o. za cenné rady a konzultace. Nakonec bych rád poděkoval kolegům z týmu eForce FEE Prague Formula za pomoc s návrhem a připomínkami k tématu.

## Anotační záznam

Jméno autora:	Radovan
Příjmení autora:	Juráš
Název práce česky:	Možnosti realizace kompozitního zavěšení kola vozu kategorie FSAE
Název práce anglicky:	Possibilities in Manufacturing of Composite Suspension Arms for FSE Vehicle
Rozsah práce:	stránky: 43 obrázky: 36 tabulky: 2 přílohy: 3
Akademický rok:	2018/2019
Jazyk práce:	CZ
Ústav:	12 120 - Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel
Studijní program:	Bakalářský – Teoretický základ strojního inženýrství
Vedoucí bakalářské práce:	Ing. Michal Vašíček Ph.D.
Anotace:	Cílem této bakalářské práce je navrhnout několik variant konstrukce kompozitního ramene pro závodní vůz typu Formula Student, z těchto návrhů si jeden typ vybrat a zpracovat k němu postup výroby.
Klíčová slova:	rameno, kompozit, Formula Student, insert
Key words:	wish arm, composite, Formula Student, insert

## **Abstrakt**

Tato bakalářská práce se zabývá návrhem a porovnáním různých způsobů výroby víceprvkového zavěšení kola pro vůz stavěný dle pravidel soutěže Formula Student.

Nejprve je čtenáři představeno, co je to kompozitní materiál a jak se vyrábí. Poté je objasněn význam zavěšení a představeny možnosti konstrukce. Pro návrh kompozitního ramene složeného z uhlíkových trubek, hliníkových insertů a lepeného spoje je zpracován postup výroby.

## **Abstract**

This bachelor thesis is about different designs and comparing of composite wishbones and its manufacturing.

At the beginning the reader can find out, what composite material is and how to manufacture it. Then it is said what is suspension, what is its main function and possibilities in manufacturing of composite wishbones are introduced. Wishbone made from carbon fibre tubes, aluminium inserts and glue is introduced closer and manufacturing process is suggested.

# 1. Obsah

2.	Úvod .....	10
2.1.	Obsah a cíl práce .....	10
2.2.	Formula Student .....	10
2.3.	eForce FEE Prague Formula .....	11
3.	Kompozity .....	12
3.1.	Historie kompozitů .....	12
3.2.	Výroba kompozitních dílů .....	12
3.2.1.	Kontaktní metoda .....	12
3.2.2.	Infuze .....	13
3.2.3.	Pultruze .....	14
3.2.4.	Navíjení .....	15
3.2.5.	Prepreg .....	16
3.2.6.	Metoda RFI .....	17
3.3.	Použití uhlíkových vláken .....	18
3.3.1.	Motorsport .....	18
3.3.2.	Letectví a kosmonautika .....	18
3.3.3.	Použití v soutěži Formula Student .....	18
4.	Zavěšení kola .....	19
4.1.	Funkce zavěšení .....	19
4.2.	Druhy zavěšení .....	19
4.2.1.	Lichoběžníkové nápravy .....	20
4.2.2.	McPherson .....	21
4.2.3.	Multilink .....	22
4.3.	Zavěšení kol ve Formuli 1 .....	22
4.4.	Zavěšení ve Formuli Student .....	24
4.5.	Zavěšení vozu eForce FSE.08 .....	24
5.	Návrh kompozitního ramene .....	26
5.1.	Rameno s využitím lepených spojů .....	26
5.1.1.	Lepené spoje .....	26
5.1.2.	Konstrukce lepeného ramene .....	27
5.2.	Rameno složeno do formy .....	27
5.2.1.	Typy forem .....	27
5.2.2.	Návrh konstrukce ramene .....	28
5.3.	Rameno s navinutým insertem .....	29
5.3.1.	Sintrování .....	30



5.3.2.	Konstrukce ramene .....	30
5.3.3.	Přípravek .....	30
5.4.	Rameno ze 2 samostatných trubek .....	31
5.4.1.	Konstrukce ramene .....	31
5.4.2.	Přípravek .....	32
6.	Porovnání variant .....	33
6.1.1.	Finanční náročnost .....	33
6.1.2.	Počet kusů sestavy .....	33
6.1.3.	Hmotnost sestavy .....	33
6.1.4.	Riziko poškození .....	34
6.1.5.	Časová náročnost .....	34
7.	Výrobní postup .....	34
7.1.	Výpočet rozměrů .....	34
7.1.1.	Výpočet délky závitů insertu .....	35
7.1.2.	Výpočet délky lepeného spoje insertu .....	35
7.1.3.	V insert .....	37
7.2.	Realizace lepeného spoje .....	38
7.3.	Ověření výpočtů .....	39
8.	Závěr .....	40
9.	Zdroje .....	41
9.1.	Seznam použité literatury .....	41
9.2.	Zdroje obrázků .....	41
9.3.	Seznam obrázků .....	42
9.4.	Seznam tabulek .....	43
9.5.	Seznam příloh .....	43

## 2. Úvod

### 2.1. Obsah a cíl práce

Cílem práce je navrhnout kompozitní rameno pro vůz Formula Student. Soutěž je především inženýrská, proto je kladen důraz na styl provedení a jeho funkčnost. Technická řešení, která jsou léty osvědčená a funkční se tedy studenti snaží nahradit novým řešením za použití moderních metod výroby a nových materiálů. Kompozitní materiály umožňují zkonstruovat díl o stejné únosnosti jako ocelový, ale při mnohem nižší hmotnosti. Použitím kompozitních by se dala snížit hmotnost celého monopostu, protože jich je na voze celkem 8. Odlehčením každého z nich bychom mohli dosáhnout celkově lepších výsledků v soutěži.

V práci se jsou tedy představena různá konstrukční řešení, porovnána mezi sebou a na závěr pro jednu z variant zpracován návrh výroby, konkrétně pro rameno s vlepenými inserty.

Z informací v této práci bude možno vycházet při konstruování ramen pro další generace vozů Formula Student.

### 2.2. Formula Student

Formula Student je celosvětová inženýrská soutěž týmů vysokých škol. Soutěž existuje od 80. let minulého století a vznikla za účelem zaučení nových konstruktérů a vývojářů pro motorsport a Formuli 1. Soutěž začala s jedinou kategorií – vůz formulového typu se spalovacím motorem (CV – Combustion Vehicles). Od roku 2010 se soutěž rozšířila o novou kategorii, a sice o vozy s elektrickým pohonem (EV – Electric Vehicles). Mnoho týmů ihned přešlo právě do této kategorie, protože se po několika sezónách se spalovacím motorem již nemělo kam posunout. Nejnovější kategorií jsou vozy bezpilotní (Driverless). Každý tým má za úkol postavit každý rok jeden prototyp vozu formulového typu s pohonem dle kategorie a následně s ním závodit na soutěžních tratích po světě. V dnešní době existuje okolo 700 týmů celosvětově, v české republice je týmů 7. Je nutno dodat, že studenti zapojeni do této soutěže jsou následně velice žádaní v odborných firmách.



Obr 1. FSE.07 – monopost pro sezónu 2018

Na závodech se soutěží v mnoha disciplínách, nejde tedy jen o to, jak auto jezdí na trati. Dynamické disciplíny jsou přesto divácky nejzajímavější a mnohé týmy při nich zjistí, co pro příští monopost vylepšit. V této kategorii je celkem 5 disciplín – skidpad (50b), acceleration (75b), autocross (150b), endurance & efficiency (400b).

Mezi statické disciplíny patří Business Plan (100b), Cost & Manufacturing report (100b) a Engineering design report (150b).

Dohromady lze tedy získat 1000 bodů. Nejlepší týmy jsou pak odměněny trofejemi a hodnotnými cenami.

Každý tým se během jedné sezóny účastní 3-5 závodů. Závody jsou pořádány celosvětově, často s podporou velkých firem a bývalých členů týmů, kteří následně dělají porotce v soutěži.

### 2.3. eForce FEE Prague Formula

Tým eForce vznikl v roce 2010 spolu se založením kategorie elektrických formulí. První monopost se objevil však až o dva roky později v roce 2012. V té době byl tento tým součástí spalovacího týmu CTU Cartech, později se ale oddělil a nově vzniklý tým eForce FEE Prague Formula zaštila fakulta Elektrotechnická. Od té doby náš tým dosáhl mnohých úspěchů, například celkové vítězství na závodech FS Czech 2018 v Mostě. Dnes stavíme již osmý monopost, který je od těch minulých zcela přepracován. Napříč monoposty je vidět obrovský posun, ať už v použitých materiálech, tak už v samotném návrhu komponent.

Tým je rozdělen na 3 skupiny, mechanickou, elektrickou a projektovou skupinu. Sestává se převážně ze studentů strojní a elektrotechnické fakulty ČVUT. Členů je dohromady okolo 40 a každý se zabývá nějakou částí vozu.



Obr 2. Tým eForce oslavující vítězství na FS Czech 2019 v Mostě

## 3. Kompozity

Kompozitní materiály jsou dnes velmi rozšířené. Používají se vlastně úplně všude, ať už jde o stavebnictví (železo-beton), motorsport (uhlíkové a skelné vlákno), letecký průmysl nebo předměty denního použití. Zaujímají tedy své místo ve všech průmyslových odvětvích.

Spojením dvou a více materiálů vznikne kompozit. Tyto vstupní materiály mají rozdílné mechanické, chemické i fyzikální vlastnosti a nově vzniknutý kompozit tak nabízí vlastnosti nové, odlišující se od vlastností vstupních materiálů. Díly vyrobeny z kompozitů mohou být dokonce lehčí, a přitom si zachovat stejnou, ne-li větší, tuhost. Složení kompozitů se dá navíc stanovit přesně dle použití dílu v praxi.

Kompozity mají ovšem i svá negativa, jako jsou třeba finanční nebo výrobní náročnost. Někdy se tedy vyplatí použít klasické materiály.

Kompozity se skládají ze dvou složek, matrice a výztuže. Výztuž má za úkol přenášet napětí působící na kompozit a matrice zas drží celý materiál pohromadě. Tyto složky si lze představit jako vlákno (výztuž) a pryskyřici (matrice).

### 3.1. Historie kompozitů

Kompozity se začaly objevovat nejdříve ve stavebnictví, kdy se začalo míchat seno a bláto za účelem získání lepšího materiálu pro stavbu obydlí, později to bylo dřevo a hlína. Dalším historickým použitím jsou mongolské luky, které byly vyrobeny z bambusových jader, hedvábí, dobytčích šlach a rohů a jako matrice byla použita borovicová pryskyřice.

Po 1. světové válce byl vymyšlen kompozit známý jako bakelit, což byla směs celulózy a syntetické pryskyřice. Velký rozmach ale nastal až v průběhu 2. světové války, kvůli armádním potřebám, a po ní. Skelné vlákno se využívalo v hojné míře, největší význam ale mělo pro lodní průmysl, převážně díky korozi vzdornosti. K největšímu rozmachu komerčního použití kompozitů došlo v 50. letech, především šlo o skelné vlákno. V 60. letech se začal pomalu objevovat kevlar a uhlíkový kompozit, primárně pro letectví a vesmírný program, automobilový a lodní průmysl. [4]

### 3.2. Výroba kompozitních dílů

Způsob výroby kompozitu se volí dle tvarové složitosti výsledného dílu a také finanční náročnosti na výrobu.

#### 3.2.1. Kontaktní metoda

Kontaktní metoda spočívá v tom, že se do formy skládá suchá tkanina (v závislosti na použití kombinace uhlíkových, skelných nebo aramidových vláken) a ta se následně prosycuje pryskyřicí (epoxidem a tvrdidlem). Proces probíhá tak, že se forma nejdříve natře separátorem, což umožní snadnější vyndání dílu z formy, následně se nechá forma uschnout a pak se natře první vrstvou epoxidu. Na tuto první vrstvu se položí první vrstva tkaniny, která se musí dotlačit do všech rohů a spár tak, aby materiál dolehl na všechna místa. Následně se tkanina opět prosytí a může se položit další vrstva. Na poslední vrstvu se položí speciální folie



a přes ní ještě vata. Celá forma se všemi vrstvami se následně zabalí do pytle, který se neprodyšně uzavře a v pytli je vyvoláno vakuum. Vata zařizuje dobrý odtah vzduchu z pytle a folie zajistí, že se vata nepřilepí na tkaninu. Takto vyrobené díly se můžou nechat vytvrdit při teplotě okolí, nebo se vkládají do tlakové komory (autokláv), kde se kompozit vytvrdí za vysokého tlaku a vysoké teploty. Dosáhne se tak lepších mechanických vlastností.



Obr 3. Laminace forem na monocoque FSE.08

Po vytvrzení se sundá folie s vatou a díl se vyndá z formy. Po ořezání okrajových ploch je díl připraven k použití.

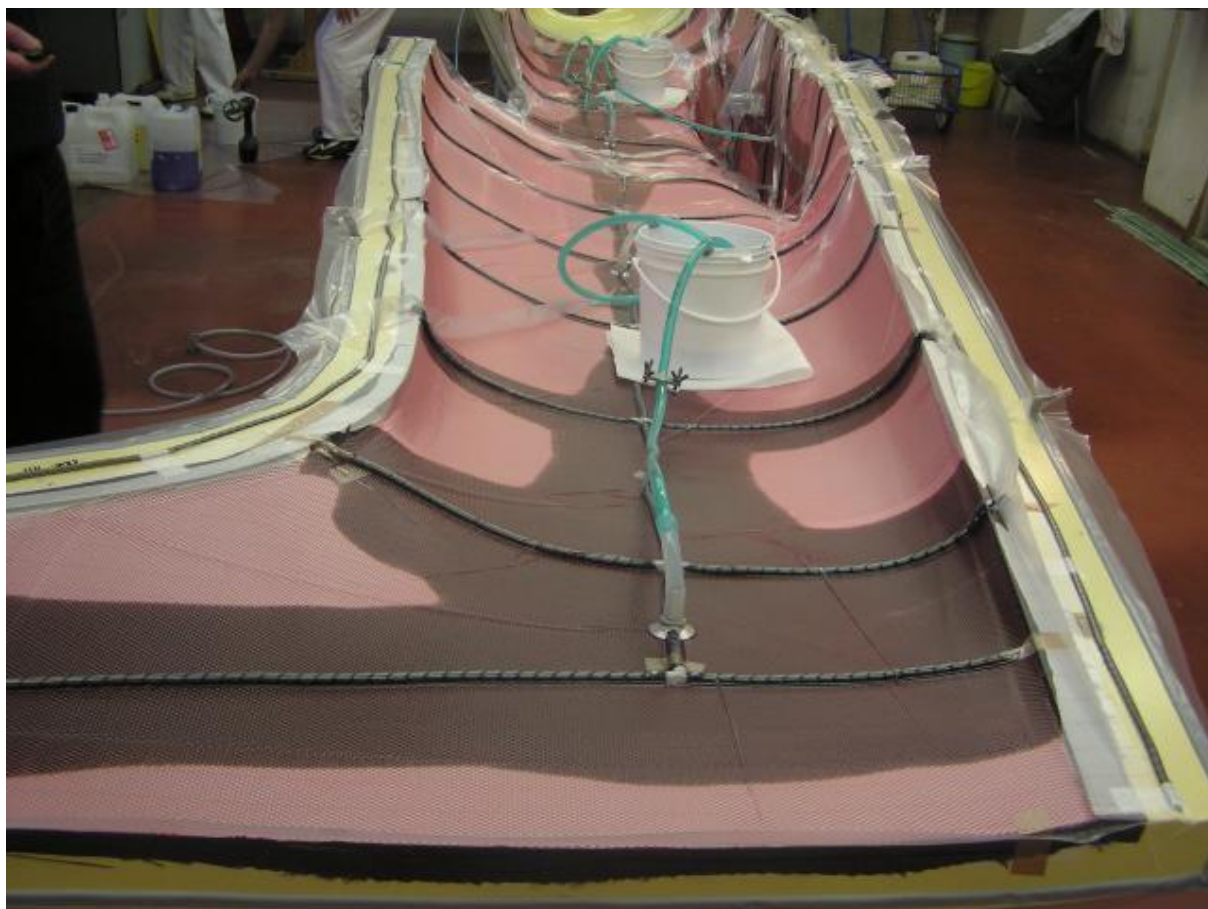
Tato metoda je dobrá při výrobě malého počtu dílů, právě pro svou nenáročnost na jakékoli speciální zařízení. Je však hodně pracná a díly mohou být zbytečně těžké, kvůli nadměrnému použití epoxidu.

### 3.2.2. Infuze

Infuze je velice podobná kontaktní metodě v tom, že se skládají suché tkaniny na formu. Rozdíl je však v tom, že při tomto procesu se vrstvy napustí epoxidem až ve formě. Epoxid je do vrstev tažen pod tlakem. Dá se tak lépe odhadnout použité množství epoxidu, proces je čistší, ale dražší kvůli většímu množství použitých technických materiálů.

Jednotlivé vrstvy se při skládání pojí k sobě speciálními lepidly. Na poslední vrstvu se nalepí perforovaná folie, rozvodová mřížka a na ní pak hadice a spirála, kterou se následně přivede epoxid. Forma se nejdříve zabalí do pytle tak, aby zůstaly koukat konce hadice a spirály ven. V takto zalepeném pytli se opět vyvolá vakuum. Je nutné, aby se tento pytel pevně dotlačil do všech zákoutí, spár a rohů, aby došlo k ideálnímu kontaktu pytle s povrchem formy. Na zadní stranu pytle se nalepí vata, přivede se ještě jedna odtahová hadice a celá sestava se zabalí do druhého pytle, který se opět odsaje. Druhý pytel funguje jako pojistka, kdyby se první pytel protrhl, nebo praskl.

Do takto připraveného dílu se vstupní spirálou přivede epoxid, který je podtlakem tažen uvnitř pytle do dílu. Epoxid prosytí všechny vrstvy a vše je tlakem mačkáno k sobě. Po prosycení celého dílu se zavřou ventily na podtlakových hadicích a díl se opět nechá vytvrdit.



Obr 4. Díl vyráběný infuzní metodou [10]

Náročnost vyndání dílu z formy odpovídá kvalitě domáčknutí prvního pytle, protože když někde zůstane kapsa, vyplní se epoxidem a díl pak jde hůř ven. Je to častý problém u dílů, kde jsou ostré rádiusy a kapsy.

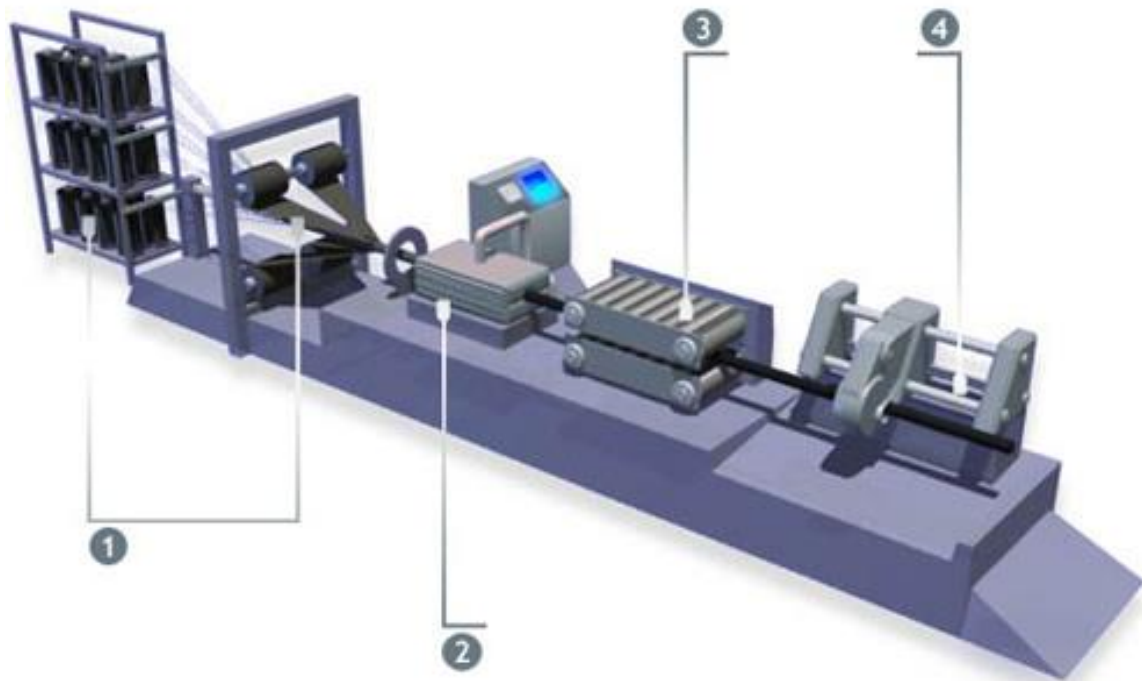
### 3.2.3. Pultruze

Pultruze je proces výroby, který vznikl v 50. letech v USA. Umožňuje výrobu jednodušších profilů, které se na konci procesu nařezou na požadovanou délku, např. trubky, jekly, hranoly. Tento proces umožňuje velice rychle zpracovávat vlákna a vyrobený kompozit je velmi kvalitní, obzvláště s porovnáním ručně skládaných kompozitů, především díky vytvrzení při vysokých teplotách.

Proces začíná natažením samotného vlákna, které je namotáno na roli. Vláknem se protáhne přes speciální mřížku, která udává tvar výsledného profilu. Potom se vlákna táhnou přes epoxidovou lázeň, kde se prosytí. Následně vlákna putují do ohřívací komory, kde se při vysokých teplotách nechají vytvrdit. Potom už jen stačí výsledný profil nařezat na požadované délky.

Tento proces může probíhat kontinuálně, dokud nedojde tkanina v zásobníku. Dnes se navíc vlákna již nenoří do lázně, ale epoxid je do nich tlakem

vstříkován, čímž dochází k lepšímu prosycení. Další výhodou tohoto stroje je jeho částečná univerzálnost. Není totiž určen čistě pro jeden druh kompozitu, ale můžou se na něm dělat kompozity ze všech druhů vláken za použití více druhů pryskyřic. Tvar profilu navíc závisí pouze na tvaru srovnávací mřížky. Dnes se profily dají také dělat zakřivené. [5]



Obr 5. Schéma pultruzeru [5]

#### Popis obrázku

1. Tažená vlákna namotaná na rolích
2. Epoxidová lázeň
3. Vytvrzovací komora
4. Řezací zařízení

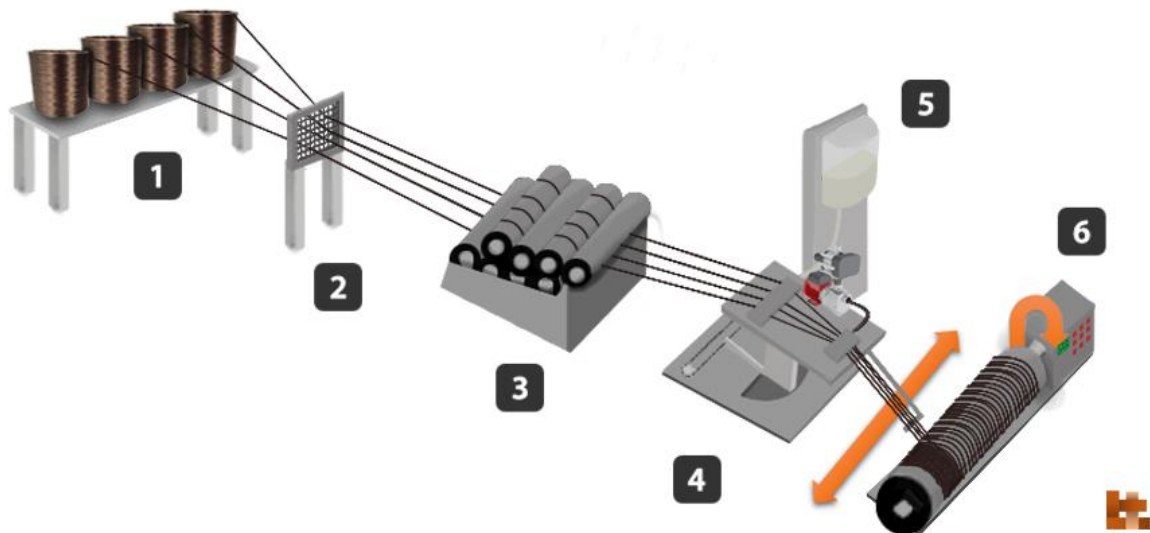
#### 3.2.4. Navíjení

Navíjení je další proces výroby profilů. Tímto stylem se vyrábějí např. hnací hřídele a stěžně do lodí. Proces je zase velmi podobný pultruzi, zpracovávají se totiž jednotlivá vlákna.

Vlákno je taženo ze zásobníku a skrz usměrňovač nataženo do sytící jednotky, která prosycuje vlákna epoxidem, takže když se navíjejí na přípravek, jsou už mokrá a vrstvy se pak lépe drží. Přípravek na rotoru se točí a vlákna jsou okolo něj namotána do několika vrstev. Když jsou vlákna namotána, nechá se kompozit opět vytvrdit a poté se profil musí tlakem stáhnout z přípravku a nařezat na požadované délky.

Dle tvaru přípravku se dají dělat všemožné tvary, od klasických kruhových tyčí, přes hranaté profily, až po zakázkové zprohýbané a zkroucené tvary.

Výhodou je opět možnost použití více druhů vláken, nejčastěji se takto vyrábějí díly ze skelných vláken. Další výhodou je kontinuální provoz, kdy stroj může navíjet na více tvarových přípravků najednou. Tyto přípravky se dají nezávisle na sobě měnit. [6]



Obr 6. Schéma navíjecího stroje [6]

#### Popis obrázku

1. Tažená vlákna namotaná na rolích
2. Usměrňovací mřížka
3. Napínací mechanismus
4. Vedení vláken
5. Sytící centrum se zásobníkem epoxidu
6. Rotující přípravek

#### 3.2.5. Prepreg

Prepreg (preimpregnated fibres) jsou předsycená vlákna. Jedná se tedy o polotovary tvořené tkaninou, která se nasytí pryskyřicemi a poté se v nízkých teplotách skladuje k dalšímu použití. Tkanina je z obou stran chráněna neprodyšnou fólií, nehrozí tedy slepení vrstev. Materiál je navinut na roli, z níž se dle potřeby odřezává. Výhodou práce s touto tkaninou je rychlá výroba dílu a čistá práce. Využití mají ve všech typech výroby. Pokud se prepreg skládá do formy, je předsycená celá tkanina a pouze se vystřihnou kousky nutné k výrobě dílu. Pokud se použije na výrobu pultruzeru či při navíjení, jsou předsycená samotná vlákna.

Před skládáním prepregu do formy se většinou z role vyřezou připravené tvary na plotteru. Pokud je potřeba během laminace prepreg více tvarovat, stačí ho ohřát např. horkovzdušnou pistolí. Ručně se z něj vyrábí hlavně složité tvary pro motorsport, kosmonautiku a letectví.





Obr 7. Skládání z prepregu [11]

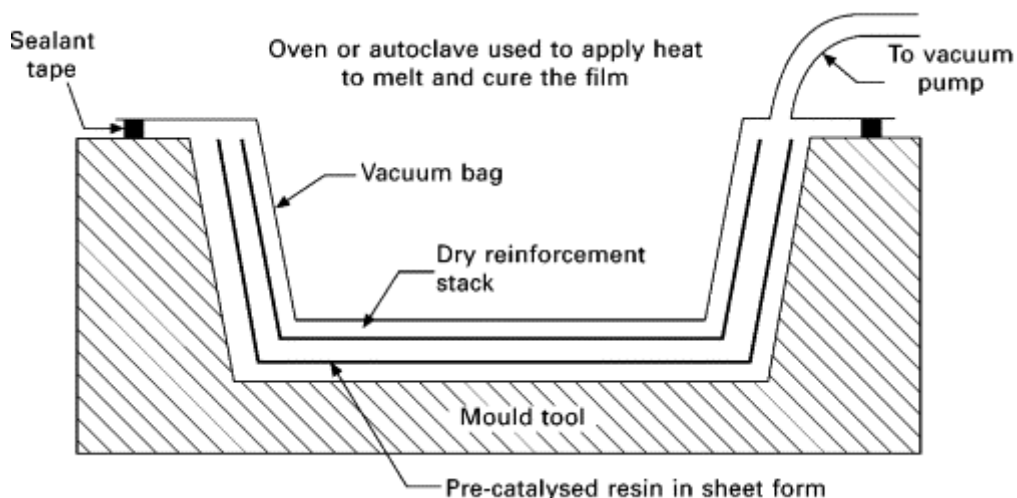
Prepreg však nevydrží věčně, takže se u něj udává doporučená doba zpracování a je důležité skladování v nízkých teplotách (mrazácích).

### 3.2.6. Metoda RFI

Při metodě RFI se skládají na přeskáčku suchá vlákna s epoxidovou fólií. Tato fólie je vlastně tuhý epoxid, který se při vysoké teplotě rozteče a proteče vrstvami tkaniny. Vrstvy jsou na sebe naskládány a forma se opět zabalí do pytle, v němž se vytvoří vakuum. Forma se následně vloží do autoklávu a teplota se rapidně zvýší, čímž se fólie rozteče a epoxid se vlije do jednotlivých vrstev. Díl je zároveň temperován a tvrzen.

Výhodou této metody je vysoce kvalitní výsledný kompozit, čisté a zdravé podmínky skládání vrstev, nižší možná cena ve srovnání s prepregem.

Nevýhodami ale je, že všechny součásti kompozitu musí být odolné vůči vysokým teplotám, kterým je celá soustava vystavena při vytvrzení. [7]



Obr 8. Schéma metody RFI [7]

### **3.3. Použití uhlíkových vláken**

Kompozity z uhlíkových vláken se nejčastěji používají v leteckém, kosmickém a automobilovém průmyslu, právě pro své mechanické vlastnosti a nízkou hmotnost. Kvůli mnoha způsobům namáhání se však přidávají vrstvy kevlaru, který přenáší jiné druhy namáhání. Celkový kompozit složený z uhlíku, kevlaru a epoxidové pryskyřice tak snese velká zatížení, je lehký a dobře vypadá.

#### **3.3.1. Motorsport**

Použití v motorsportu je snad ve všech vrcholových kategoriích. Ve Formuli 1 jsou z uhlíku skoro všechny díly, které pravidla nezakazují. Mají kompozitní monocoque, ramena, prvky aerodynamiky a mnoho ostatního.

V rallye je toho podstatně méně, základní karoserie je stále ocelová, ale všechny blatníky, kapoty, nárazníky, palubní desky a menší díly se už z kompozitů vyrábějí. Stejně tak je na tom rallycross.

#### **3.3.2. Letectví a kosmonautika**

Při stavbě letadel je důležitá nízká hmotnost, proto tento průmysl rychle mění hliník za uhlíkový kompozit. Není to ale tak jednoduché, protože tento materiál trpí tzv. delaminací, kdy se jednotlivé vrstvy kompozitu oddělí od sebe a kompozit tak není plně funkční. Při otřesech, které v leteckých dílech vznikají, se může tento jev projevit velice snadno.

#### **3.3.3. Použití v soutěži Formula Student**

V soutěži Formula Student se tyto kompozity užívají v hojně míře. Lze říci, že kvalitní tým se pozná podle toho, jestli má kompozitní monocoque. Mnoho menších nebo začínajících týmů totiž jezdí s trubkovým svařeným rámem.

Z uhlíkových vláken se ale vyrábí téměř celá aero soustava, monocoque, sedačka a v lepších týmech i nápravy nebo vlastní ráfky. Lze tedy říci, že využití pro tento typ materiálu je naprosto všude. Nejčastěji se používá ještě v kombinaci s kevlarovými vlákny.

Existují však stále prvky, které musí být z oceli. Udávají tak totiž pravidla soutěže. Těmito prvky jsou například Mainhoop (hlavní ochranný oblouk formule), fronthoop (menší ochranný oblouk, který se nachází zhruba kolem kolen pilota) a tělo brzdového pedálu.



Obr 9. FSE.07

## 4. Zavěšení kola

### 4.1. Funkce zavěšení

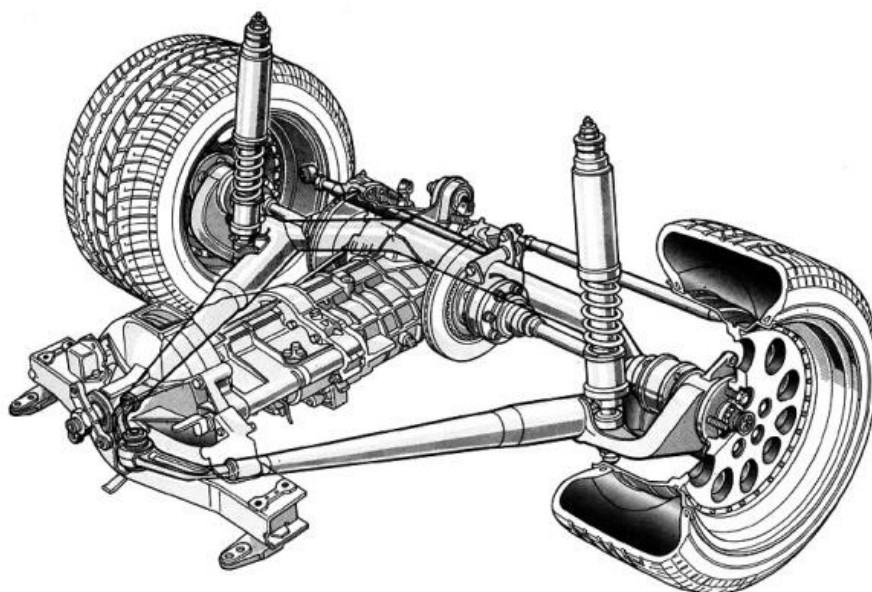
Zavěšení kola je pojem označující způsob uchycení kola ke karoserii nebo k rámu vozidla. Mnohdy se označuje také jako náprava, což ale není přesné, neboť zavěšení je pouze jeden člen sestavy nápravy.

Zavěšení kola musí zajišťovat permanentní styk kola s vozovkou, relativní pohyb kola vzhledem k rámu nebo karoserii ve svislé ose, přenášení sil mezi kolem a karoserií. Zástavba samozřejmě musí umožnit řízení kol, jejich brždění a případně i pohon kol.

### 4.2. Druhy zavěšení

Základní rozdělení zavěšení je na závislé a nezávislé zavěšení. Do kategorie závislých zavěšení patří tuhé nápravy. Tyto nápravy jsou dnes využívány především jako zadní nápravy nákladních vozidel a užitkových automobilů, v historii ale byly základním typem zavěšení. Obě kola nápravy jsou zde uchycena na společném nosníku, nápravnicí, a nemění svoji vzájemnou polohu. Konstrukce je tedy poměrně jednoduchá a levná, ale její jízdní vlastnosti jsou horší, zvyšuje poměr neodpružených hmot a ve srovnání s nezávislým zavěšením není tak bezpečná.

V minulosti jezdila většina tuhých náprav osazena listovými péry, dnes se již standardně montují tlumiče a pružiny. Asi nejčastějším a nejpoužívanějším typem je náprava De-Dion, která je sice ve srovnání s ostatními dražší, ale značně snižuje hmotnost neodpružených hmot.



Obr 10. Náprava typu De-Dion [8]

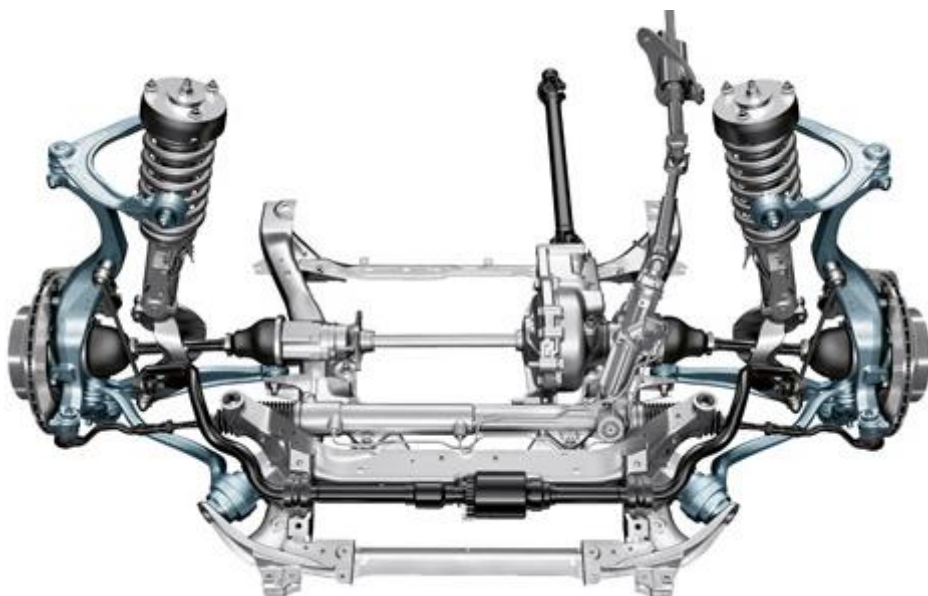
Nezávislé zavěšení na rozdíl od tuhé nápravy má každé kolo uchyceno zvlášť. Pohyb každého kola je jiný v závislosti na povrchu vozovky, tj. se kola při propružení navzájem neovlivňují. Výhodou tedy je vyšší bezpečnost, nižší neodpružené hmoty (díky uchycení diferenciálu a dalších komponent přímo ke karoserii) a vzniká více místa pro další části vozidla, případně úložný prostor.

Nezávislé zavěšení se dále dělí dle použití a konstrukce na mnoho dalších typů. Nejčastější jsou lichoběžníkové nápravy a typ McPherson. U zadních náprav se objevují klikové a kyvadlové nápravy. Zajímavým uspořádáním pak vyniká typ Multilink, který se dá použít jak pro zadní, tak přední nápravu.

#### **4.2.1. Lichoběžníkové nápravy**

Lichoběžníková proto, že při pohledu ve směru jízdy mají ramena lichoběžníkový tvar. Při propružení, bočnímu posunu a naklopení karoserie dochází ke změně odklonu. Změny v geometrii se zvětšují nebo zmenšují v závislosti na vzdálenosti pólu pohybu od kola a změna odklonu na okamžitém natočení kola kolem pólu. Obě ramena mívají trojúhelníkový tvar, přičemž spodní rameno bývá masivnější, protože na něj působí větší síly.

Výhoda tohoto typu nápravy je, že celková zástavba zabírá málo prostoru. Je vhodná pro SUV, malá nákladní vozidla, případně autobusy.



Obr 11. Přední lichoběžníková náprava BMW X6 [12]

#### 4.2.2. McPherson

Tento typ nápravy vychází z lichoběžníkového typu, ale horní rameno je nahrazeno posuvným vedením. Tlumič je navrchu uložen v posuvném vedení, na přední nápravě se navíc otáčí v pružně uloženém ložisku. Při natáčení kol pak dochází ke změnám odklonu. Na zadní nápravě horní ložisko chybí a změny odklonu jsou minimální, spodní ramena bývají ale delší.

Tento typ náprav bývá často používán u osobních automobilů, právě pro jednoduchou konstrukci. S upravenými rameny, posuvným vedením a speciálními tlumiči má tento typ náprav velké zastoupení v motorsportu. Použité díly na nápravě se potom od sebe dost odlišují v závislosti na typu závodního odvětví.

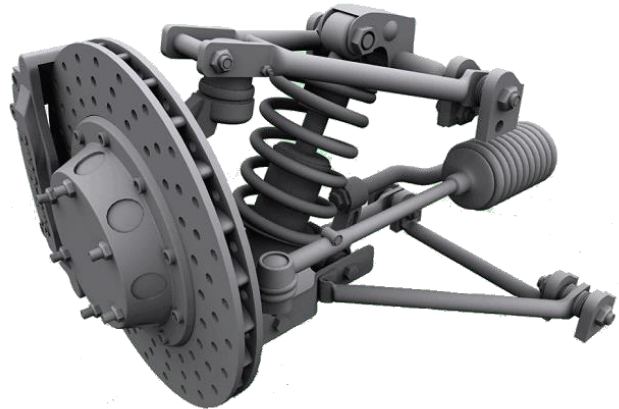


Obr 12. McPherson [13]



### 4.2.3. Multilink

O vedení kola se stará několik ramen. Dochází k minimálním změnám v geometrii a náprava se dá nastavit přesně dle požadavků na dynamiku, komfort a možností zástavby. Hmotnost sestavy bývá nižší než u ostatních. [8]



Obr 13. Náprava Multilink [8]

Nezávislé zavěšení je tedy ideální pro závodní podmínky, což je dáno hlavně tím, že se dá snadno změnit odklon, příklon a další parametry geometrie. Volba konstrukce zavěšení tedy ovlivňuje jak chování vozidla a bezpečnost, tak komfort posádky ve vozidle.



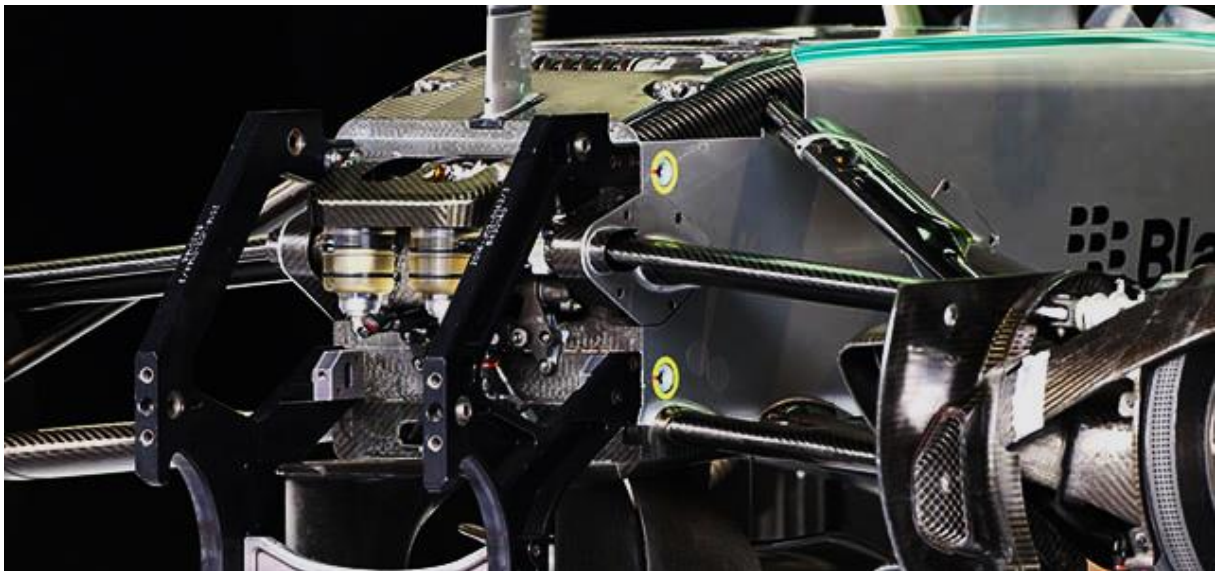
Obr 14. Zavěšení vozu Škoda Fabia R5 [14]

### 4.3. Zavěšení kol ve Formuli 1

V soutěži Formule 1 má zavěšení kola obrovský význam nejen z hlediska geometrie. Svou konstrukcí totiž ovlivňuje i aerodynamiku vozidla. Převážně proto, že soutěžní vozy Formule 1 jezdí obrovskými rychlostmi, ve kterých jsou aero prvky schopny generovat obrovský přítlak. Aerodynamický ramen tedy pomáhá ostatním aero prvkům tlačit vůz k zemi, aby byl při jízdě stabilnější. Svou důležitost má také s ohledem na světlou výšku, která výrazně ovlivňuje přítlak vozu.

Přední náprava byla v počátcích tvořena dvojitým uchycením a příčně uloženými listovými péry s tlumiči. Vše bylo smontováno s trubkovým rámem uvnitř karoserie. Postupem času se vyvinulo nezávislé zavěšení s vinutými pružinami a tlumiči, které bylo následně přesunuto dovnitř karoserie. Pružení kola se přenášelo pomocí vzpěr. Vrcholovým designem pak byl aktivní podvozek, který udržoval stále stejnou světlou výšku podvozku a zajišťoval tak stále stejné proudění kolem aero prvků.

Zadní náprava byla tuhá typu De Dion s výztuhami a listovými péry, jejichž poloha se na vozech neustále měnila. Od 60. let se začala ramena montovat přímo na skříň převodovky nebo motoru a přešlo se na dvojici ramen s tlumičem a vinutou pružinou. V další dekádě se začaly tlumiče montovat horizontálně na diferenciál. Dnešní zavěšení se sestává ze dvou trojúhelníků umístěných nad sebou, tlumičů, pružin a stabilizátorů. K tomu všemu se v této oblasti samozřejmě objevuje mnoho prvků určených ke chlazení brzd a usměrnění vzduchu.



Obr 15. Přední zavěšení vozu F1 [15]

Během jízdy nedochází k moc velkým změnám v rozvoru, postavení kola vůči vozovce a žádné změně v rozvoru náprav. U závodních aut je navíc velmi důležitým aspektem odpružená hmotnost. Čím vyšší je neodpružená hmotnost, tím hůř dokáže kolo kopírovat povrch vozovky, čímž se zhoršují jízdní vlastnosti a ovladatelnost vozu. Na této hmotnosti se prvky náprav podílejí, proto je nutné jejich hmotnost co nejvíce redukovat, zachovat však tuhost a správnou funkčnost. Další možností je přesunutí tlumičů a pružin do šasi, což sníží neodpružené hmoty a také se odrazí na aerodynamice.

Právě z důvodu úspory hmotnosti a zachování pevnosti a funkčnosti se v minulosti přešlo z ocelových ramen na kompozitní. Nejen že kompozitní materiál nabízí menší hmotnost, ale nabízí také mnoho nových řešení. Nevýhodou však je cenová i časová náročnost na výrobu. U některých dílů jsou navíc nutné technologické kroky, které celý proces výroby značně prodlužují. Dnešní vozy Formule 1 mají kompozitní snad vše, co pravidla nezakazují. Co se zavěšení týče, jsou to všechna ramena, tyče řízení a táhla.

#### 4.4. Zavěšení ve Formuli Student

Podvozek je poměrně složitá součást každého monopostu, proto velice záleží na stáří a zkušenostech každého týmu. Vždy se ale začíná od vcelku jednoduchých ocelových ramen.

Pokud se ale týmy dostanou dál, sahají právě po konceptu uhlíkových ramen. Provedené návrhy většinou spočívají v lepených spojích. Jedná se o jednoduché konstrukce, kdy se do uhlíkové trubky zalepí válečkový insert s vnitřním závitem. Do závitu se dá našroubovat kloubové ložisko a rameno se tak uchytí do žabky.



Obr 16. Zavěšení kola týmu FS Team Tallin [16]

Tým TUW Racing dělá svá ramena ze dvou půlek odlaminovaných do hliníkových forem. Formy se přiloží k sobě, díl se nechá zatvrdnout a následně se vyndá, potom je nutné ještě ořezat přesahy uhlíkové tkaniny na dělicích rovinách. V kompozitu jsou inserty, do kterých se lisují sférická ložiska. Přes tato ložiska jsou následně ramena uchycena na chassis a těhlice.



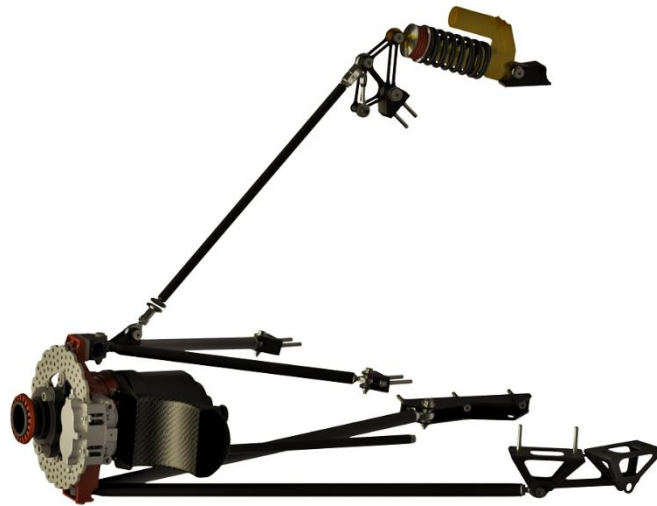
Obr 17. Rameno týmu TU Wien Racing [17]

#### 4.5. Zavěšení vozu eForce FSE.08

Na voze FSE.08 jsou nápravy tvořeny dvěma rameny ve tvaru trojúhelníku z chrom-molybdenové oceli, přičemž z horního ramene jde pushrod k vahadlu a následně k tlumiči. Trojúhelníky jsou tvořeny dvěma trubkami přivařenými k ocelovému očku. Do tohoto očka je následně vlisováno kloubové ložisko. Na koncích trubek jsou navařeny ocelové inserty s vnitřním závitem, do kterých se zašroubují kloubová ložiska se závitem. Ramena jsou po svaření práškově lakována.

Výhodou tohoto způsobu výroby je, že celkový proces není úplně časově náročný, cenová bilance je přijatelná (záleží na volbě kloubových ložisek), návrh není nijak náročný, co se nutných přístrojů týče, a použitá ocel plně postačuje k provozu vozu. Montáž a demontáž je snadno proveditelná.





Obr 18. *Zavěšení předního kola FSE.08*

Nevýhodou je množství svarů provedených na každém kusu. Pokud se nedodrží pracovní postup, hrozí odchylka v předepsaných rozměrech, špatné vlastnosti svarů nebo zamezení smontovatelnosti spojené právě s odchylkou v daných rozměrech. Další nevýhodou je částečně vysoká hmotnost ramen a při volbě špatných kloubových ložisek i nutnost časté výměny vymačkaných kusů.



Obr 19. *Chrom-molybdenové rameno FSE.08*

Jako úchytné body pro tato ramena jsou použity tzv. žabky, které mají dvě čelisti s tolerovanými dírami. Do těchto děr se vloží ocelový insert, který přesně vymeze prostor pro ložiskový kloubek. Rameno se žabkou je spojeno lícovaným šroubem.



Obr 20. Detail ramene a žabky

## 5. Návrh kompozitního ramene

Protože v rámci soutěže jsou hodnocena technická řešení jednotlivých komponent, uhlíková ramena by nejen snížila celkovou hmotnost vozu, čímž bychom mohli získat lepší časy při dynamických disciplínách, ale také bychom získali vyšší počet bodů při Design Reportu.

V následujících kapitolách budou tedy nastíněny možnosti konstrukce kompozitního ramene. Protože jsou navíc všechna ramena stejného typu, jen s jinými rozměry, uvedené příklady se budou zaměřovat na spodní rameno přední nápravy.

### 5.1. Rameno s využitím lepených spojů

Tento návrh vyplývá z již zavedeného systému slepení uhlíkových trubek a hliníkových insertů. Výroba je vcelku jednoduchá, ale protože kvalitu lepeného spoje není jak zkontrolovat, je důležitý správný postup při výrobě a ideálně udělat trhací zkoušky, kdy by se mělo zjistit, jakou maximální sílu lepený spoj vydrží.

#### 5.1.1. Lepené spoje

Hlavní výhodou lepení je možnost spojit 2 úplně rozdílné materiály k sobě. Ve srovnání s klasickými metodami spojování materiálů (svařování, nýtování, šroubování) však lepení není plnohodnotnou náhradou. Nese s sebou totiž i mnoho nedostatků, jako například nízkou odolnost vůči vysokým teplotám, malou odolnost na dlouhodobé namáhání, spoje jsou nerozebíratelné a lepený povrch je velmi náchylný na kvalitu a čistotu. Navíc je lepený spoj nevhodný při namáhání na odlupování. Je tedy dobré lepený spoj vždy ještě dodatečně pojistit, aby při případné kolizi nedošlo k rozpadnutí sestavy.

Kvalita lepeného spoje závisí především na kohezi a adhezi, tedy na soudržnosti a přilnavosti lepidla. Přilnavost lze ve velké míře ovlivnit kvalitně připraveným povrchem lepených ploch.

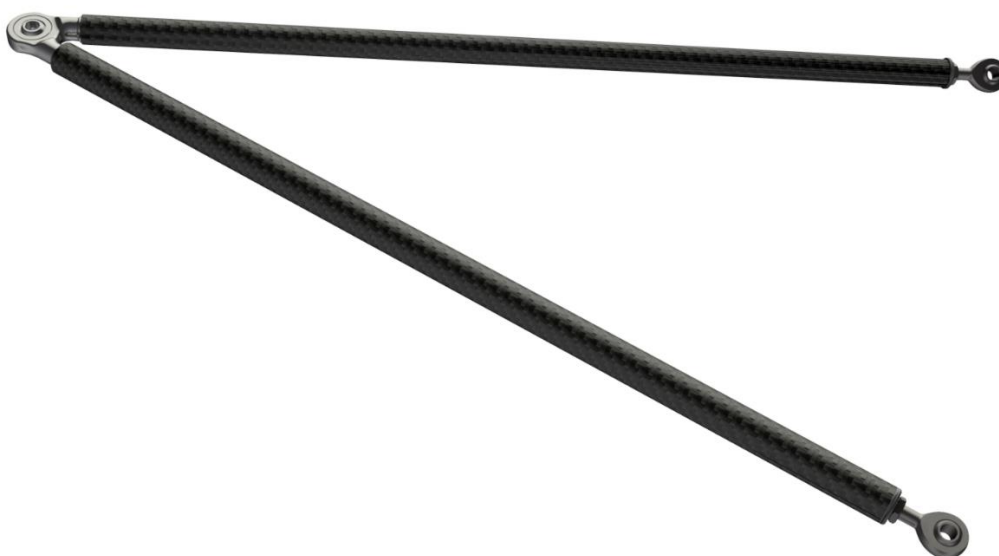
Ideální namáhání lepeného spoje by mělo probíhat rovnoměrně po celé ploše spoje, nejhorší je pak namáhání na odlupování, kdy je největší zatížení na okraji spoje a do okolí se téměř neroznese. Nejčastěji se spoje konstruují na namáhání ve smyku či tahu. [2]

### 5.1.2. Konstrukce lepeného ramene

Rameno se skládá dohromady z 10 dílů

- 2x kloubové ložisko se závitem
- 1x kloubové ložisko lisovací
- 2x šestihranná matice
- 2x hliníkový insert se závitem
- 2x uhlíková trubka
- 1x hliníkový V insert

Do uhlíkových trubek se vlepí inserty se závitem, následně se se do druhé strany vlepí V insert a do díry v tomto prvku se nalisuje kloubové ložisko. Do insertů na koncích trubek se pak našroubují kloubové hlavy s maticemi. Matice slouží k vymezení délky, čímž se dá případně seřídit výrobní odchylka.



Obr 21. Rameno s použitím lepených spojů

## 5.2. Rameno složeno do formy

Díly, které mají jakkoliv komplikovanější tvar nebo je potřebné jen malé množství, se skládají do forem. Forma má tvar negativu výsledného dílu a může být i z několika kusů. Formy svým povrchem mohou určit kvalitu povrchu výsledného dílu, pokud jsou tedy nároky na vzhled vyšší, bude vyšší i cena formy.

### 5.2.1. Typy forem

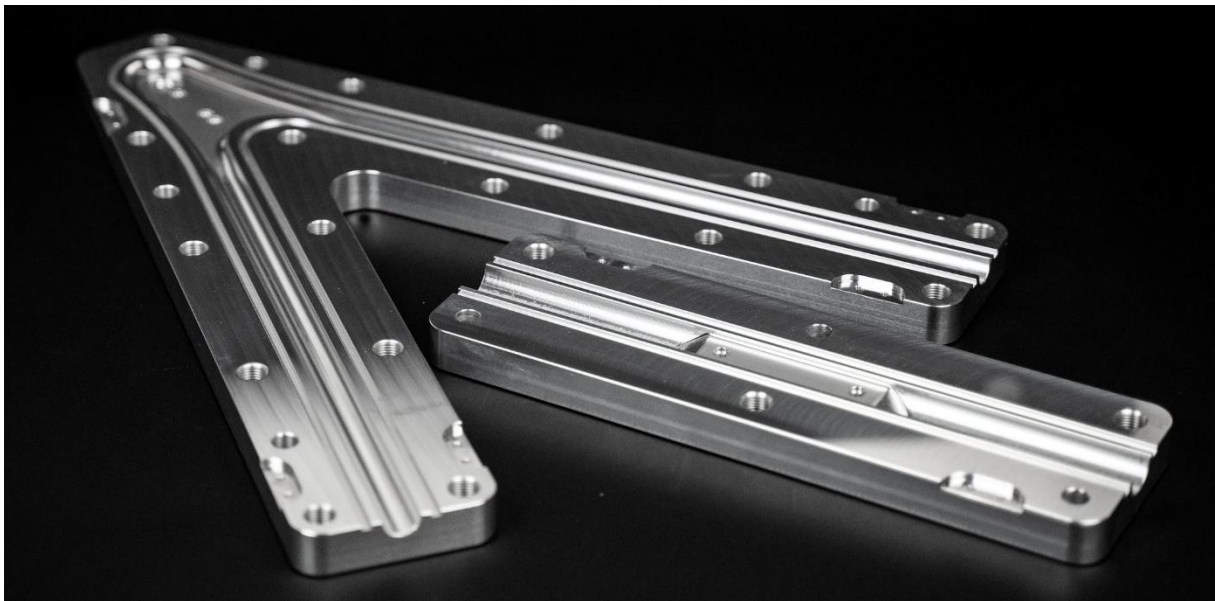
Formy se dají vyrobit z mnoha materiálů, nejčastěji se však používá hliník, umělé dřevo, extrudovaný polystyren nebo formy z kompozitních vláken.

Formy z hliníku jsou velmi drahé, protože jejich obrábění bývá dost složité. Formy se po obrobení musí ještě vyleštit do hladka, protože např. po frézování zůstává povrch jemně zvrásněný. Do vyleštěné formy se následně může laminovat, výsledný povrch kompozitu po vyndání zůstává lesklý, hladký a celkově velmi pěkný na pohled. Hlavní nevýhodou ale je vysoká cena výroby forem a její vyšší hmotnost.

Formy z umělého dřeva jsou podstatně levnější než z hliníku, přesto nejsou nejlevnější. Povrch těchto forem se musí ošetřit lakem, aby forma nesála pryskyřice. Po obrobení formy se povrch formy zabrousí a nalakuje. Lak se potom ještě zbrousí, nedokonalosti se opraví speciálním tmelem a opět se nalakuje. Výsledný povrch musí být velmi hladký. Jakákoli nedokonalost povrchu se může obtisknout na povrch výsledného dílu.

Formy z polystyrenu bývají velmi pracné a slouží pouze pro výrobu méně složitých tvarů. Jednotlivé desky polystyrenu se slepí k sobě a následně se rozžhaveným drátem do desek vyřízne požadovaný tvar formy. Povrch se musí opět ošetřit ochrannou vrstvou, protože samotný polystyren saje, při laminaci by se tak spotřebovalo zbytečně mnoho epoxidu navíc.

Speciálními formami jsou formy z kompozitních vláken. Tyto formy slouží k výrobě dílů, které se vytvrzují při vysokých teplotách. Pokud na díl i formu působí teplo, je důležité přemýšlet o teplotní roztažnosti obou materiálů. Pokud jsou díly nějak rozměrově tolerovány, mohla by při vytvrzení vzniknout chyba právě proto, že by se forma roztáhla jinak než tkanina. Tím mohou vzniknout suchá místa na dílech, takže by díl nebyl stoprocentně funkční. Dalším důvodem je nižší hmotnost forem.



Obr 22. Forma na ramena týmu TU Wien Racing [17]

### 5.2.2. Návrh konstrukce ramene

Výhoda ramene z formy oproti lepenému je právě v absenci lepidla. Je tedy větší jistota, že tuhost ramene bude odpovídat návrhu, výpočtu a simulaci. I tak je nutnost minimálně jeden kus podrobit destruktivní zkoušce a zjistit tak maximální přenositelné síly.

Pro laminaci bychom použili prepreg, ušetří tak mnoho práce se sycením vláken a práce bude rychlejší, příjemnější a výsledek jistější. Navíc musí rameno obsahovat 3 hliníkové inserty, aby se mohly nalisovat kloubová ložiska. Z konstrukce ramene vyplývá nemožnost měnit jeho délku, tedy kompenzovat

nepřesnost výroby, což se u předchozího návrhu dalo změnit vytočením závitového kloubku.



Obr 23. Návrh ramene z formy

Na tento typ by byla ideální hliníková forma. Je to z důvodu nutnosti laminovat díl na dvakrát, tzn. mít dvě formy, kdy jedna bude spodní polovina ramene a druhá bude vrch, obě poloviny se následně sešroubují k sobě.

Prepreg se musí vkládat do formy tak, aby přesahoval přes ořezovou hranu na formě. Díky tomu se obě poloviny ramene po složení forem spojí. Po složení tkaniny a hliníkových insertů se formy sešroubují, což k sobě pevně přitiskne obě poloviny ramene, a díl se nechá vytvrdit. Po vyndání dílu z formy se musejí ořezat okrajové hrany tkaniny a nalisovat kloubová ložiska.

Placatý tvar nebo přesněji aerodynamicky tvarovaný profil ramene pro využití v soutěži nemá moc valné využití, oproti Formuli 1. Monoposty Formula Student jezdí nejčastěji v rychlostním pásmu 50 – 80 km/h a to je pásmo, kdy by přítlak generovaný složitě tvarovaným ramenem byl zanedbatelný. Formule 1 jezdí přes 300 km/h, v takových rychlostech je efekt mnohonásobně vyšší. [3]

### **5.3. Rameno s navinutým insertem**

Tento typ konstrukce spočívá v přímém zavinutí insertu do vazby uhlíkových vláken, vyhnuli bychom se tedy riziku uvolnění insertu. Insert samotný bude vyroben sintrováním. Další důležitý rozdíl je ve stylu uchycení ramene k chassis monopostu. Zatímco u předchozích návrhů byla použita stávající žabka, tedy žabka se dvěma čelistmi, v tomto případě se bude muset žabka změnit. Tělo žabky bude robustnější a přímo do žabky se zalisuje kloubové ložisko a čelisti budou na konci ramene. Spoj ramene a žabky opět bude proveden pomocí lícovaného šroubu.

Velká část ramene bude namotána na přípravek. Tento přípravek nebude součástí insertu, vlákna ale volně přejdou z insertu na přípravek. Přípravek je tyč s přesně obrobeným povrchem, je natřen separátorem, aby šel z výsledného kompozitu dobře vyndat.



Obr 24. *Návrh nové žabky pro tento typ ramene*

### **5.3.1. Sintrování**

Sintrování je proces spékání prášku laserem, kdy se nanese kovový prášek na podložku a laser speče zrníčka prášku dohromady přesně dle zadaného CAD modelu. Celý princip funguje dost podobně jako 3D tiskárny, vrství se na sebe tenké vrstvy materiálu. Tento proces se využívá pro výrobu tvarově složitých komponent, které by nešly vyrobít frézováním nebo jinak, případně na ozubení, lopatky turbín apod. Spéká se namletý prášek materiálu dle výběru, např. hliník nebo titan. Při výrobě se dosahuje vysoké čistoty materiálu, výsledný produkt však nemá stejnou pevnost, jako při klasickém obrábění. Tento proces výroby umožňuje díly tvarovat přesně dle jejich zatížení, proto se ve velké míře provádí tvarová optimalizace takových dílů. Jedny z nejzajímavějších takto vyráběných dílů v soutěži Formula Student jsou těhlice.

### **5.3.2. Konstrukce ramene**

Na začátku se vyrobí insert tvaru V s dírou na kloubové ložisko uprostřed. Na válcových plochách tohoto insertu budou nasintrovány drobné jehličky, za které se na navíjecím stroji budou zachytávat samotná uhlíková vlákna. Insert tak bude přímo zavínut v kompozitu. Vlákna se dále navinou na přípravek, který se po vytvrzení silou vytáhne z ramene. Otvor pro uchycení ramene na žabku se musí následně vyříznout do trubky.

Hlavní výhodou tohoto typu konstrukce je tedy pevná vazba mezi insertem a uhlíkovým kompozitem. Nevýhodami jsou ale vysoké nároky na výrobu. Na spékání hliníku i na navinutí samotných trubek jsou potřeba speciální stroje i polotovary. Výroba proto nebude nejlevnější.

### **5.3.3. Přípravek**

Přípravkem je tyč o přesně obrobeném vnitřním průměru trubky. Na jednom konci přípravku jsou 2 výstupky, které zapadnou do děr v insertu. Zajistí se tím dosednutí ploch k sobě a při roztočení přípravku se bude točit insert stejně rychle. Na druhém konci přípravku bude díra se závitem. Za tento závit se bude přípravek vytahovat z namotané trubky.





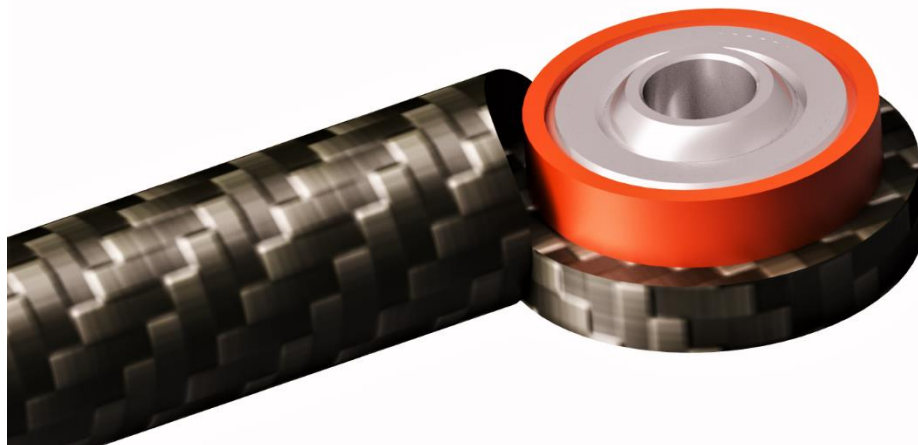
Obr 25. *Insert pro navíjení*

#### **5.4. Rameno ze 2 samostatných trubek**

Rameno složeno ze dvou samostatných trubek se vyrobí opět navinutím, tentokrát však ne na sintrovaný insert, ale na speciálně upravený přípravek. Navíjení totiž dokáže být extrémně přesné, pokud je tedy přípravek kvalitně zpracován, lze namotat přesný průměr, do kterého se dají nalisovat různé čepy. Tímto způsobem se nově vyrábějí kompozitní rámy jízdních kol.

##### **5.4.1. Konstrukce ramene**

Na speciálních přípravcích se tedy namotají 2 samostatné trubky a každá z nich bude mít na jednom konci očko, do kterého se následně nalisuje čep. Tímto čepem se obě trubky spojí a vytvoří tak rameno tvaru V. Do čepu se pak nalisuje ještě kloubové ložisko. Konce ramen budou opět tvořit dvě čelisti, aby šel z trubek vyndat přípravek. Je tedy nutné vyměnit žabky za masivnější s kloubkem stejně jako u předchozího návrhu. Konstrukčně to tedy není složitý návrh, je ale nutné provést trhací zkoušky a zjistit, jaké síly očko přenese.



Obr 26. *Konec trubky ramene s čepem*



Obr 27. Celé rameno složeno ze 2 samostatných trubek

#### 5.4.2. Přípravek

Přípravek pro tento případ konstrukce je složitější v tom, že nestačí namotat jen trubku, ale součástí trubky musí být také očko. Na jednom konci tedy bude opět závit pro vyndání tyče, druhá strana ale bude vyfrézovaná a přišroubuje se k ní menší váleček, který bude na výsledné trubce tvořit očko. Po vytvrzení se vyšroubuje šroub z válečku a dlouhá tyč se vytáhne z ramene, zůstane tak hotová uhlíková trubka s okem.



Obr 28. Přípravek pro namotávání

Rameno tedy slibuje nižší hmotnost, protože nejsou aplikovány žádné hliníkové inserty.



## 6. Porovnání variant

Všechny varianty jsou vyrobitelné a určitě by splnili svůj účel, i tak je ale vhodné vybrat si jednu variantu, které se věnovat více.

V porovnávací tabulce je zohledněna teoretická finanční náročnost na výrobu, počet kusů sestavy, orientační hmotnost sestavy, velikost rizika poškození a časová náročnost na výrobu. Tuhost ramene není porovnána, protože ta by byla závislá už na konkrétním výpočtu a simulaci.

	finanční náročnost	počet kusů sestavy	hmotnost sestavy	riziko poškození	časová náročnost
Rameno s využitím lepených spojů	1	4	3	4	1
Rameno složeno do formy	4	1-2-3	4	1	2
Rameno s navinutým insertem	2	1-2-3	1-2	2	3-4
Rameno ze 2 samostatných trubek	3	1-2-3	1-2	3	3-4

Tab 1. Porovnávací tabulka

Porovnání v tabulce je pomocí porovnávacích čísel 1,2,3 a 4. 1 znamená "nejnižší" a 4 "nejvyšší".

### 6.1.1. Finanční náročnost

Varianta s lepenými spoji vychází nejlevněji, protože není potřeba žádných speciálních strojů ani zařízení. Navíjené varianty vycházejí cenově podobně, ale jsou už podstatně dražší, kvůli nutnosti výroby přípravků a použití specifických strojů. Rameno skládané do formy vychází jednoznačně nejhůř, protože výroba masivních hliníkových forem je drahá, což dělá celý projekt méně atraktivním. Při stanovení teoretických cen jednotlivých úkonů jsem vycházel ze zkušenosti z projektu Formula Student.

### 6.1.2. Počet kusů sestavy

Varianta s lepenými spoji obsahuje jednoznačně nejvíc komponent. U namotávaných variant jsem uvažoval v potaz i nutnou výměnu žabek, proto je počet komponent stejný jako u formovaného ramene.

### 6.1.3. Hmotnost sestavy

Rameno z formy vychází hmotnostně nejhůř díky faktu, že jeho součástí jsou 3 ocelové ložiskové klouby. Tuto hmotnost navíjené varianty přesouvají přímo z ramene do chasis, protože 2 ze 3 kloubů jsou uloženy v žabkách. Lepené rameno je na tom jen o málo lépe než rameno z prepregu, hmotnosti jsou však velice orientační a pro jejich přesné stanovení by bylo opět nutné provést zátěžové simulace.

#### 6.1.4. Riziko poškození

Jako největším riskem je označeno rameno s lepenými spoji a to právě díky těmto spojům. Po provedení spoje totiž nemáme možnost podívat se, zda lepidlo zateklo všude tam, kam mělo a zda se dobře spojilo s povrchem.

#### 6.1.5. Časová náročnost

Navíjené díly jsou časově náročnější díky nutné výrobě přípravků a i delšímu technologickému procesu. Nejlépe vychází možnost s lepenými.

Právě pro relativní časovou a finanční nenáročnost bude dále rozveden pracovní postup pro výrobu ramene s využitím lepených spojů.

## 7. Výrobní postup

### 7.1. Výpočet rozměrů

U návrhu se vychází ze sil, které na rameno působí. Celý systém podvozku byl navržen v programu Lotus a v něm byly změřeny síly v jednotlivých bodech ramene. Pro dimenzování rozměrů tedy jsou použity největší změřené síly působící na rameno. Rameno je rozděleno na 3 hlavní body. Těmi jsou body uložení ramene, tedy středy kloubových ložisek.

	F <sub>x</sub> [N]	F <sub>y</sub> [N]	F <sub>z</sub> [N]
Přední kloub	1705	5704	-274
Zadní kloub	1688	-4908	329
Kloub uložen v těhlici	3393	796	52

Tab 2. Tabulka vstupních sil

Aby byla správně navrhnutá délka insertu, musí se určit nutný počet závitů a délka lepeného spoje. Z těchto sil se tedy spočítá maximální síla působící v koncových bodech. Maximální sílu též použijeme k výběru kloubového ložiska.

Pro statické namáhání vzorec vypadá takto:

$$F_r = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2} = \sqrt{1688^2 + (-4908)^2 + 329^2} = 5201 \text{ N}$$

$$F_f = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2} = \sqrt{1705^2 + 5704^2 + (-274)^2} = 5960 \text{ N}$$

Pro dynamické namáhání vycházím se zkušeností a jednotlivé síly se přenásobí dynamickými koeficienty. Pro sílu v ose z k=2 a pro síly v osách x, y k=1,5.

$$F_{dr} = \sqrt{(F_x \cdot k)^2 + (F_y \cdot k)^2 + (F_z \cdot k)^2} = \sqrt{(1688 \cdot 1,5)^2 + (-4908 \cdot 1,5)^2 + (329 \cdot 2)^2} = 7813 \text{ N}$$

$$F_{df} = \sqrt{(F_x \cdot k)^2 + (F_y \cdot k)^2 + (F_z \cdot k)^2} = \sqrt{(1705 \cdot 1,5)^2 + (5704 \cdot 1,5)^2 + (-274 \cdot 2)^2} = 8948 \text{ N}$$

Jako první je však nutné vybrat ložiskovou hlavici. V minulosti byly problémy s vymačkáváním sférického kluzného členu, vznikaly tedy nežádoucí vůle, které způsobovaly nepříjemné zvuky a nepřesnosti v řízení vozu. Pro konstrukci bylo

tedy vybráno kloubové ložisko Aurora AM M8, u kterého výrobce udává maximální zatížení 33 kN a slibuje velkou odolnost proti otlacení. Pro naše účely je tedy více než dostačující. [9]



Obr 29. Aurora AM M8 [18]

### 7.1.1. Výpočet délky závitu insertu

Ze zjištěných dynamických sil se pro větší z nich určí nutný počet závitu na insertu.

$$z = \frac{F}{\pi \cdot d_2 \cdot H_1 \cdot p_d}$$

$H_1$  označuje nosnou výšku závitu a spočte se:

$$H_1 = \frac{(d - D_1)}{2}$$

$p_d$  je dovolený tlak v závitu, který je pro hliník 8.8 stanoven na 60 Mpa.

Po dosazení do rovnice vypadá vzorec takto:

$$z = \frac{F_{df}}{\pi \cdot d_2 \cdot \left(\frac{d - D_1}{2}\right) \cdot p_d} = \frac{8948}{\pi \cdot 7,188 \cdot \left(\frac{8 - 6,647}{2}\right) \cdot 60} = 9,8$$

Rozměry závitu M8 byly získány ze strojařských tabulek.

Délka spočteného závitu je tedy  $L = z \cdot P = 9,8 \cdot 1,25 = 12,25 \text{ mm}$ . Kvůli zjednodušení výroby tedy zvolím délku závitu 12,5 mm. [9]

### 7.1.2. Výpočet délky lepeného spoje insertu

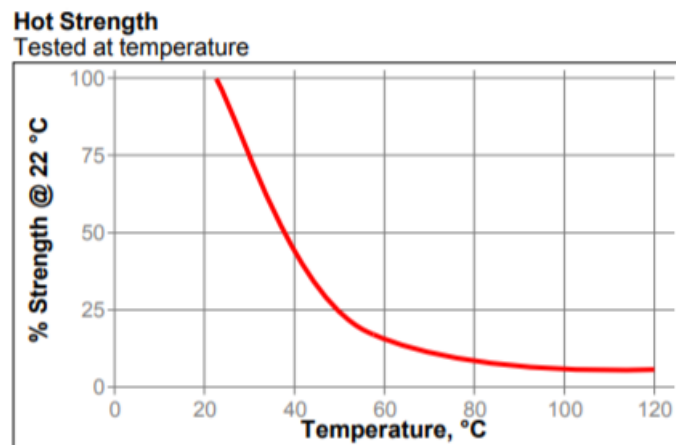
Trubka, pro kterou je insert navrhován, má vnitřní průměr 14 mm. Průměr insertu v místě lepeného spoje je navržen na 13,6 mm, tloušťka lepeného spoje by měla být 0,2 mm. Spoj je namáhán na tah, základním vzorcem tedy je:

$$\tau = \frac{F}{S}$$

Kde  $\tau$  je maximální napětí,  $F$  je působící síla a  $S$  je plocha lepeného spoje, která se v tomto případě spočte

$$S = \pi \cdot D \cdot L.$$

Pro lepení volím lepidlo Loctite 9466. Výrobce u tohoto lepidla udává maximální napětí v závislosti na teplotě. Pro hliník je maximální napětí 26 MPa při teplotě 22°C. Protože při závodech působí mnohem vyšší teploty, vycházíme při stanovení napětí z grafu uvedeným výrobcem.



Obr 30. Závislost teploty na napětí u lepidla Loctite 9466 [1]

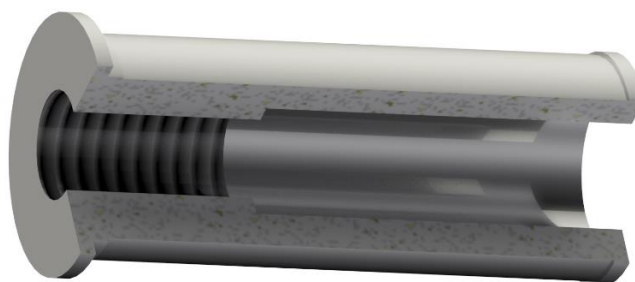
Jako výchozí teplotu volíme 50°C, pro kterou vychází maximální napětí čtvrtinové.

$$\tau_{max} = 26 \cdot 0,25 = 6,5 \text{ MPa}$$

Aby se dala spočítat nutná délka lepeného spoje, vyjádří se z rovnice  $L$ .

$$L = \frac{F}{\pi \cdot D \cdot \tau} = \frac{8948}{\pi \cdot 13,6 \cdot 6,5} = 32,2 \text{ mm}$$

Lepidlo je na čepu rozlito v drážce, která odpovídá délce lepeného spoje, pro zjednodušení výroby ji opět zaokrouhlím na 32,5 mm.



Obr 31. Insert (tříčtvrtový řez)

Celková hmotnost insertu je okolo 9 g, navržený materiál je hliník 7075. Pro zjednodušení výroby se vyrobí 2 stejné inserty na oba konce ramene, i když na méně zatížené straně bude lehce předimenzován. Minimalizuje se tím ale i riziko záměny insertu při lepení.

### 7.1.3. V insert

V insert je nejsložitějším dílem sestavy. Vyrábět by se měl na 5-osé frézce, která si umí poradit se složitým tvarem. Rozměry lepených ploch na insertu jsou shodné.

Použitý materiál je hliník 7075 a celková hmotnost insertu je 46 g. Kruhová díra v insertu je navržena tak, aby se do ní dalo nalisovat kloubové ložisko Aurora COM 8. Jedná se o sférické ložisko s únosností 59 kN a hmotností 30 g.



Obr 32. V insert

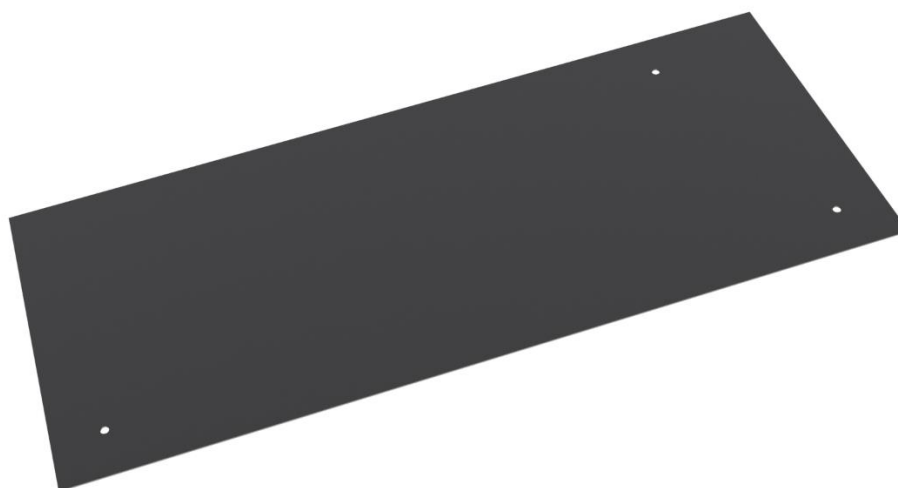


Obr 33. Aurora COM 8 [19]

## 7.2. Realizace lepeného spoje

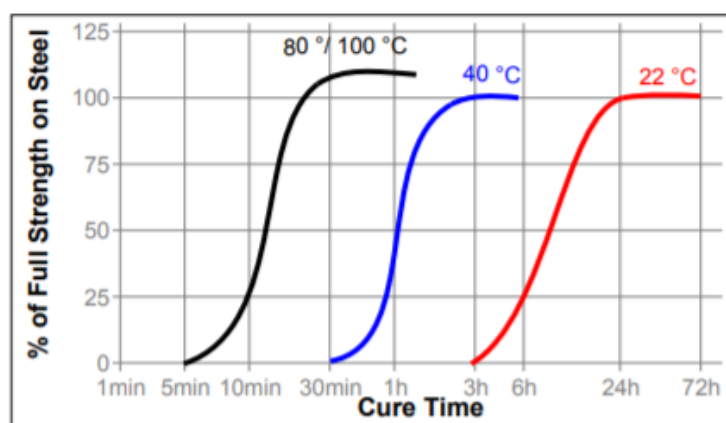
Aby byla zajištěna pozice insertu vůči trubce, je nutné připravit si pro lepení přípravek. Jedná se o plech, do kterého se vypálí 3 díry v přesné pozici. V našem případě jsou to 3 díry o průměru 8 mm. Každá z děr označuje jeden konec ramene. Do přípravku se dají vypálit díry na všechna ramena, jen je vhodné si ke každé díře nechat vygravírovat popis označující díru a rameno. Lze tedy použít 1 přípravek pro výrobu více typů ramen.

Před lepením se do V insertu nalisuje sférické ložisko, aby se následně dal přichytit k přípravku. K lisování postačí malý dílenský pákový lis.



Obr 34. Přípravek pro lepení ramen

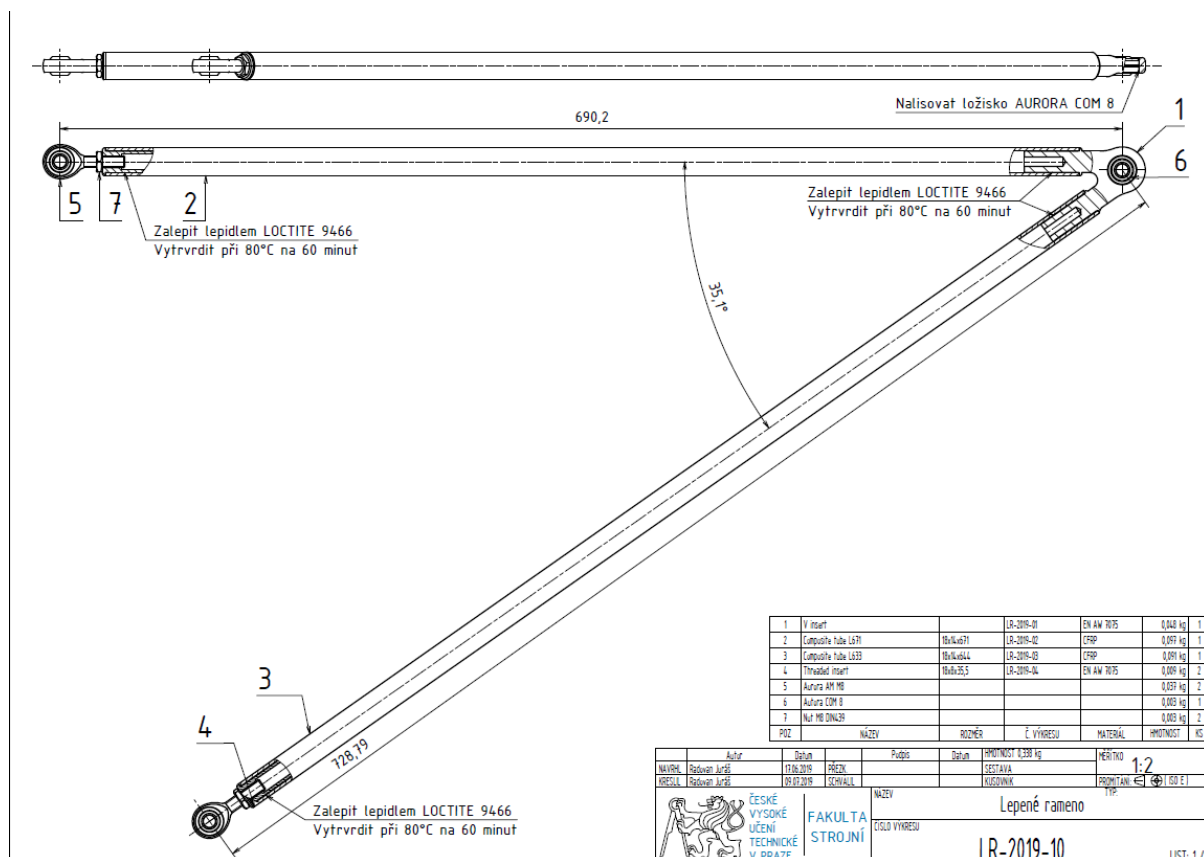
Pro lepení je nutné kvalitně očistit povrch, nejdříve se tedy povrch očistí mechanicky brusným papírem 120, čímž se odstraní mechanické nečistoty a zároveň se lehce zdrsní povrch lepených ploch. Potom se povrch odmastí acetonem C6000 a zbaví se tak zbylého prachu a drobných nečistot. Na takto připravený povrch se může nanést Loctite 9466. Jedná se o dvousložkové epoxidové lepidlo s prodlouženou dobou zpracovatelnosti. Lepidlo se nanese na určenou plochu na insertu a zatlačí se do uhlíkové trubky. Je dobré provést ještě dodatečnou injektáž lepidla. Je tedy vhodné si připravit malou díрку do uhlíkové trubky, kterou po vložení insertu vstříkneme dovnitř ještě další lepidlo.



Obr 35. Závislost teploty vytvrzování na kvalitě spoje [1]

Do uhlíkových trubek se z jedné strany vlepí válcové inserty a z druhé se vlepí V insert. Do válcových insertů se zašroubují ložiskové klouby a pomocí lícovaných šroubů se potom inserty přišroubují k přípravku. Celý přípravek se následně vloží na hodinu do pece a lepený spoj se nechá vytvrdit při 85°C. Lepený spoj tak dosáhne vyšší kvality. Vycházíme tak z údajů od výrobce.

Celé rameno váží 340 g, což je polovina hmotnosti aktuálního ocelového ramene. Kvůli pravidlům soutěže Formula Student se musí lepený spoj ještě mechanicky pojistit, proto se do místa lepeného spoje navrtá díra a spoje se pojistí trhacím nýtem.



### 7.3. Ověření výpočtů

Ještě než se bude realizovat plnohodnotná výroba komponenty, je nutné ověřit si správnost výpočtů zkouškami. Jako první by se udělala ohybová, trhací zkouška a zkouška na vzpěr samotné trubky. Zjistíme tak, jaké síly uhlíková trubka vydrží a zda bude vyhovovat pro další použití.

Další zkouškou by měla být trhací zkouška lepeného spoje, kdy se vlepí samostatný válcový insert do trubky, zašroubuje se do něj ložiskový kloub a následně se zatíží silou. Z výsledků zkoušky zjistíme slabé místo této sestavy, může se totiž stát, že první povolí lepený nebo i šroubový spoj. Hlavně ale zjistíme, zda rameno vydrží provozní namáhání.

Pokud všemi těmito zkouškami dílčí komponenty projdou, může se začít s výrobou samotného ramene. Pokud ne, je třeba přepočítat rozměry vadných částí.

## 8. Závěr

Cílem bakalářské práce bylo navrhnout možnosti konstrukce kompozitního ramene pro monopost Formula Student, tyto varianty zhodnotit, vybrat si jednu konkrétní variantu a pro ni zpracovat návrh výrobního postupu.

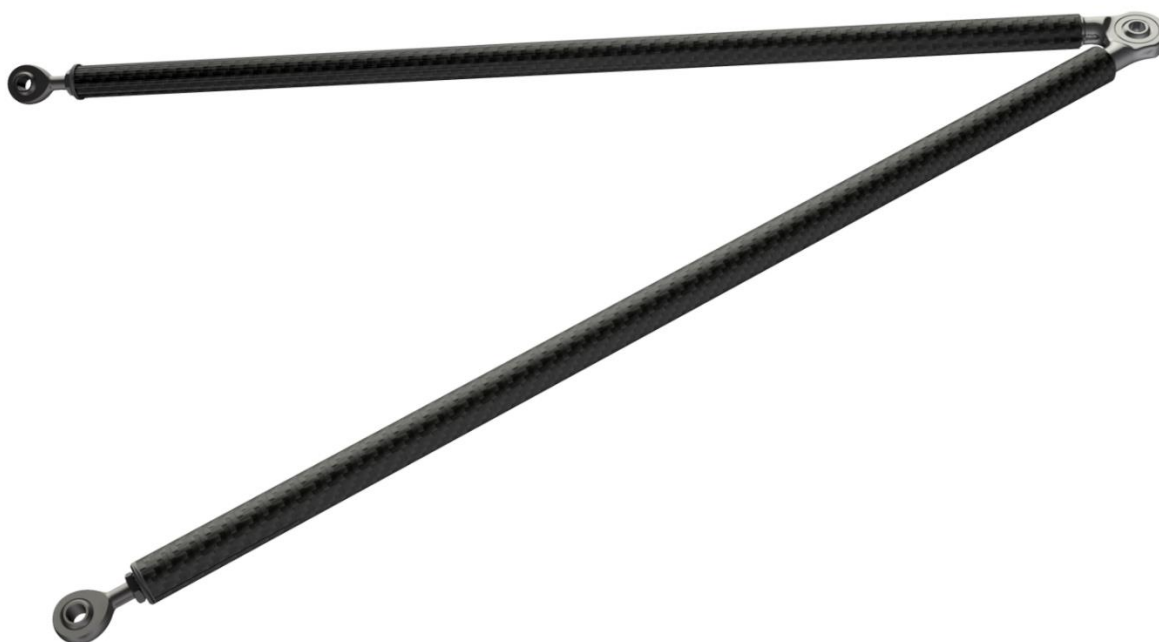
První konstrukce je s použitím lepených spojů, což je jednoduchý způsob spojení rozdílných materiálů, jako v tomto případě uhlíkového kompozitu a hliníku. Výhodou je nenáročnost na pracovní stroje, finance a čas, nevýhodou je nemožnost kontroly provedení kvality spoje.

Další variantou je odlaminovat rameno do formy. Hlavní nevýhodou této varianty je nutná výroba forem, což celý projekt prodražuje.

Navinout hliníkový sintrovaný insert do trubky je dalším návrhem. Jedná se o velmi moderní technologické postupy. Tento návrh ramene vyžaduje změnu úchytných bodů na chassis, obrobení nutných přípravků pro výrobu namotávaných trubek a speciální zařízení pro výrobu.

Konstrukce za použití 2 samostatných trubek je poslední variantou, kdy by se na konce namotala očka s přesným průměrem a pomocí čepu by se spojila v jedno rameno.

Pracovní postup byl zpravován pro rameno s vlepenými inserty. Správnou pozici insertu v trubce zajistí přípravek. Celková hmotnost odpovídá zhruba polovině hmotnosti ocelového ramene, přesné rozměry by však bylo nutné podpořit simulací a destruktivními zkouškami.



Obr 36. Rameno s vlepenými inserty



## 9. Zdroje

### 9.1. Seznam použité literatury

- [1] *Loctite EA 9466* [online]. [cit. 2019-01-07]. Dostupné z WWW: <http://polymerteknik.com/doc/LOCTITE-9466-EN-TDB.PDF>
- [2] ZBOJOVSKÝ, M.: Experimentální analýza tyče s ohledem na únosnost lepeného spoje. Bakalářská práce, ČVUT Praha, 2016
- [3] BALEJÍK, G.: Návrh části víceprvkového závěsu příďového kola vozu Formula student. Bakalářská práce, ČVUT Praha, 2014
- [4] *History of Composites* [online]. [cit. 2019-01-30]. Dostupné z WWW: <http://compositeslab.com/composites-101/history-of-composites/>
- [5] *Carbo systém* [online]. [cit. 2019-01-30]. Dostupné z WWW: <http://www.stado.cz/statika-carbo-systém>
- [6] *Filament winding* [online]. [cit. 2019-01-30]. Dostupné z WWW: <https://www.basaltft.com/app/fw.htm>
- [7] *Resin film infusion* [online]. [cit. 2019-01-30]. Dostupné z WWW: <https://www.sciencedirect.com/topics/materials-science/resin-film-infusion>
- [8] *Zavěšení kol* [online]. [cit. 2019-02-15]. Dostupné z WWW: [http://old.kvm.tul.cz/studenti/texty/Kdms1/5-Zaveseni\\_kol.pdf](http://old.kvm.tul.cz/studenti/texty/Kdms1/5-Zaveseni_kol.pdf)
- [9] *Šroubové spoje* [online]. [cit. 2019-25-06]. Dostupné z WWW: <https://pospolu.rvp.cz/detail-materialu?id=101>

### 9.2. Zdroje obrázků

- [10] *Obr.4* [online]. [cit. 2019-02-07]. Dostupné z WWW: [https://www.vzlu.cz/images/thumbs3/2\\_pa260912.jpg](https://www.vzlu.cz/images/thumbs3/2_pa260912.jpg)
- [11] *Obr.7* [online]. [cit. 2019-02-07]. Dostupné z WWW: [https://www.castrocompositesshop.com/2301-tm\\_large\\_default/psb-bulk-carbon-epoxy-prepreg-for-tooling.jpg](https://www.castrocompositesshop.com/2301-tm_large_default/psb-bulk-carbon-epoxy-prepreg-for-tooling.jpg)
- [12] *Obr.11* [online]. [cit. 2019-04-05]. Dostupné z WWW: [http://www.autolexicon.net/obr\\_clanky/cs\\_lichobeznikova\\_naprava\\_002.jpg](http://www.autolexicon.net/obr_clanky/cs_lichobeznikova_naprava_002.jpg)
- [13] *Obr.12* [online]. [cit. 2019-04-05]. Dostupné z WWW: <https://www.actualidadmotor.com/wp-content/uploads/2019/03/suspension-mcpherson-direccion-frenos-830x460.jpg>
- [14] *Obr.14* [online]. [cit. 2019-04-05]. Dostupné z WWW: <https://skoda-ms.s3.amazonaws.com/2017/06/2017-skoda-fabia-r5-drivetrain-01.jpg>

- [15] *Obr.15* [online]. [cit. 2019-04-05]. Dostupné z WWW: <https://www.racecar-engineering.com/wp-content/uploads/2014/07/upmerc1>.
- [16] *Obr.16* [online]. [cit. 2019-03-09]. Dostupné z WWW: <https://www.instagram.com/fsteamtallinn/>
- [17] *Obr.17 a Obr.22* [online]. [cit. 2019-04-05]. Dostupné z WWW: <https://www.facebook.com/tuwracing/>
- [18] *Obr.29* [online]. [cit. 2019-07-01]. Dostupné z WWW: <https://cad.aurorabearing.com/ImgMedium/a1135.jpg>
- [19] *Obr.17 a Obr.22* [online]. [cit. 2019-07-01]. Dostupné z WWW: <https://www.carid.com/images/aurora/items/com-8.jpg>

### 9.3. Seznam obrázků

Obr 1.	FSE.07 – monopost pro sezónu 2018.....	10
Obr 2.	Tým eForce oslavující vítězství na FS Czech 2019 v Mostě.....	11
Obr 3.	Laminace forem na monocoupe FSE.08 .....	13
Obr 4.	Díl vyráběný infuzní metodou [10] .....	14
Obr 5.	Schéma pultruzeru [5].....	15
Obr 6.	Schéma navíjecího stroje [6] .....	16
Obr 7.	Skládání z prepregu [11] .....	17
Obr 8.	Schéma metody RFI [7].....	17
Obr 9.	FSE.07.....	19
Obr 10.	Náprava typu De-Dion [8].....	20
Obr 11.	Přední lichoběžníková náprava BMW X6 [12] .....	21
Obr 12.	McPherson [13] .....	21
Obr 13.	Náprava Multilink [8].....	22
Obr 14.	Zavěšení vozu Škoda Fabia R5 [14].....	22
Obr 15.	Přední zavěšení vozu F1 [15].....	23
Obr 16.	Zavěšení kola týmu FS Team Tallin [16] .....	24
Obr 17.	Rameno týmu TU Wien Racing [17].....	24
Obr 18.	Zavěšení předního kola FSE.08 .....	25
Obr 19.	Chrom-molybdenové rameno FSE.08.....	25
Obr 20.	Detail ramene a žabky .....	26
Obr 21.	Rameno s použitím lepených spojů.....	27
Obr 22.	Forma na ramena týmu TU Wien Racing [17] .....	28
Obr 23.	Návrh ramene z formy .....	29

Obr 24.	Návrh nové žabky pro tento typ ramene .....	30
Obr 25.	Insert pro navíjení .....	31
Obr 26.	Konec trubky ramene s čepem.....	31
Obr 27.	Celé rameno složeno ze 2 samostatných trubek .....	32
Obr 28.	Přípravek pro namotávání .....	32
Obr 29.	Aurora AM M8.....	35
Obr 30.	Závislost teploty na napětí u lepidla Loctite 9466 [1].....	36
Obr 31.	Insert (tříčtvrtý řez).....	36
Obr 32.	V insert .....	37
Obr 33.	Aurora COM 8.....	37
Obr 34.	Přípravek pro lepení ramen .....	38
Obr 35.	Závislost teploty vytvrzování na kvalitě spoje [1].....	38
Obr 36.	Rameno s vlepenými inserty.....	40

#### **9.4. Seznam tabulek**

Tab 1.	Porovnávací tabulka .....	33
Tab 2.	Tabulka vstupních sil .....	34

#### **9.5. Seznam příloh**

- CAD model lepeného ramene a přípravku
- Výkres lepeného ramene
- Datasheet Loctite 9466