



## Diplomová práce

# Návrh zavěšení kol pro projekt studentské formule z vláknny vyztužených kompozitních materiálů

*Studijní program:*

N0723A270003 Průmyslové inženýrství

*Autor práce:*

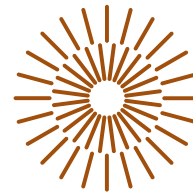
**Bc. Matěj Hadašček**

*Vedoucí práce:*

doc. Ing. Maroš Tunák, Ph.D.

Katedra hodnocení textilií

Liberec 2024



## Zadání diplomové práce

# Návrh zavěšení kol pro projekt studentské formule z vlákný vyztužených kompozitních materiálů

<i>Jméno a příjmení:</i>	<b>Bc. Matěj Hadašček</b>
<i>Osobní číslo:</i>	T22000012
<i>Studijní program:</i>	N0723A270003 Průmyslové inženýrství
<i>Zadávací katedra:</i>	Katedra hodnocení textilií
<i>Akademický rok:</i>	2023/2024

## Zásady pro vypracování:

1. Zpracujte rešerši výroby vlákný vyztužených kompozitních materiálů a jejich použití v průmyslových aplikacích.
2. Připravte plánovaný experiment pro výrobu trubic z vlákný vyztužených kompozitních materiálů s ohledem na následující faktory: úhel návinnu, počet vrstev, typ pryskyřice.
3. Vytvořte prototypy trubic z vlákný vyztužených kompozitních materiálů.
4. Otestujte mechanické vlastnosti navrženého prototypu kompozitní trubice.
5. Sestrojte zavěšení kol pro projekt studentské formule s využitím kompozitních trubic.

*Rozsah grafických prací:*

*Rozsah pracovní zprávy:*

*Forma zpracování práce:* tištěná/elektronická

*Jazyk práce:* čeština

### **Seznam odborné literatury:**

1. MONTGOMERY, Douglas C. *Design and analysis of experiments*. Eighth edition. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc, 2013. ISBN 978-1-118-14692-7.
2. HADAŠČOK, Matěj. *Trubice z vlákniny vyztužených kompozitních materiálů a možnosti jejich uplatnění*. 2022. Technická univerzita v Liberci.
3. EHRENSTEIN, Gottfried W. *Polymerní kompozitní materiály*. Praha 5: Scientia, 2009. ISBN 978-80-86960-29-6.
4. VLK, František. *Podvozky motorových vozidel*. Brno: Nakladatelství a vydavatelství VLK, 2000. ISBN 80-238-5274-4.

*Vedoucí práce:*

doc. Ing. Maroš Tunák, Ph.D.

Katedra hodnocení textilií

*Datum zadání práce:*

17. ledna 2024

*Předpokládaný termín odevzdání:* 20. května 2024

L.S.

doc. Ing. Vladimír Bajzík, Ph.D.  
děkan

doc. Ing. Maroš Tunák, Ph.D.  
garant studijního programu

V Liberci dne 29. dubna 2024

## Prohlášení

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

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

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

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

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

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

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

## **Poděkování**

Tímto bych rád upřímně poděkoval vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Marošovi Tunákovi, Ph.D. za ochotu odborné pomoci, času, cenných připomínek a rad během mé práce. Dále bych rád poděkoval Ing. Blance Tomkové, Ph.D. za ochotu, cenné rady a výpomoc s naměřením dat mechanických vlastností. A v neposlední řadě bych rád poděkoval celému studentskému týmu FS TUL Racing za skvělé zkušenosti, cenné rady a možnost realizace vzorků k této diplomové práci.

## **Anotace**

Tato diplomová práce se zabývá návrhem konstrukčního řešení zavěšení kol studentské formule s využitím kompozitních materiálů se snahou docílit hmotnostní redukce neodpružených hmot podvozkové sestavy. Výstupem této práce je zhotovená sestava prototypu lichoběžníkového zavěšení využívající vlákna vyztužený kompozitní materiál. Teoretická část je zaměřena na typy konstrukcí zavěšení podvozku používaných v automobilovém průmyslu. Dále se práce věnuje uhlíkem vyztuženým kompozitním materiálům a technologickým procesům s ohledem na zpracování kompozitních materiálů. Experimentální část se v úvodu věnuje návrhu plánovaného experimentu zkoumající vliv vstupních výrobních parametrů kompozitních trubíc na jejich výsledné mechanické vlastnosti. Dále je v práci podrobně vysvětlen technologický pracovní proces využitý pro výrobu vzorů kompozitních trubíc společně se stanovením okrajových podmínek požadovaných mechanických vlastností za pomoci dynamické simulace. Pro ověření mechanických vlastností byly zhotoveny sady vzorků jednotlivých variací vstupních výrobních parametrů, které byly následně vystaveny třiosému ohybovému namáhání a axiálnímu tlakovému namáhání. Na základě vyhodnocení výsledků plánovaného experimentu byla vybrána kompozitní trubice optimálního návinu, která byla následně uplatněna při výrobě prototypu sestavy zavěšení. V závěru práce je popsán návrh vlepaných insertů společně s kompletací výsledného prototypu lichoběžníkového zavěšení využívající uhlíkové kompozitní materiály.

## **Klíčová slova**

Zavěšení podvozku, kompozitní materiály, uhlíková vlákna, mechanické vlastnosti, Formula Student

## **Annotation**

### **Wheel suspension design for a student formula project using fibre-reinforced composite materials**

This master thesis focuses on the design of a structural solution for the suspension of a student formula car using composite materials to achieve a reduction in the mass of unsprung weights in the suspension assembly. The output of this work is the assembly of a prototype trapezoidal suspension using fiber-reinforced composite material. The theoretical part is focused on the types of suspension structures used in the automotive industry. The work further addresses carbon-reinforced composite materials and technological processes with respect to the processing of composite materials. The experimental part initially deals with the design of a planned experiment examining the influence of input manufacturing parameters of composite tubes on their final mechanical properties. The technological work process used for the production of composite tube samples is explained in detail, along with the determination of boundary conditions for required mechanical properties using dynamic simulation. To verify the mechanical properties, sets of samples of various input manufacturing parameters were made, which were then subjected to triaxial bending stress and axial compression stress. Based on the evaluation of the results of the planned experiment, a composite tube of optimal winding was selected, which was then applied in the production of the prototype suspension assembly. In conclusion, the thesis describes the design of bonded inserts together with the completion of the final prototype of the trapezoidal suspension using carbon-reinforced composite materials.

### **Key words**

Suspension, composite materials, carbon fibers, mechanical properties, Formula Student

## Obsah

Seznam použitých zkratk a symbolů .....	10
Úvod .....	11
1. Formula student .....	12
1.1. FS TUL Racing.....	15
2. Zavěšení kol.....	17
2.1. Závislé zavěšení.....	17
2.2. Nezávislé zavěšení.....	18
2.3. Zavěšení kol monopostu Formula Student .....	21
2.4. Zavěšení kol monopostů Formule 1 .....	22
2.5. Využívané materiály pro konstrukci zavěšení kol.....	23
3. Kompozitní materiály s uhlíkem vyztuženými vlákny .....	24
3.1. Výztuž z uhlíkových vláken .....	24
3.2. Polymerní matrice.....	25
3.3. Prepreg.....	25
4. Technologie výroby kompozitních materiálů.....	25
4.1. Ruční laminace .....	26
4.2. Vakuové lisování .....	27
4.3. Infuzní metoda.....	28
4.4. Výroba s využitím autoklávu.....	29
4.5. Kontinuální navíjení .....	30
4.6. Pultruze.....	31
5. Design of experiments (DOE) .....	32
5.1. Vícefaktoriální plánovaný experiment .....	32
6. Experimentální část .....	35
6.1. Návrh plánovaného experimentu designu 2 <sup>3</sup> .....	35



6.2.	Výroba kompozitních trubic .....	36
6.3.	Simulace v programu ADAMS .....	40
6.4.	Mechanické zkoušky .....	44
6.4.1.	Třiosé ohybové namáhání.....	44
6.4.2.	Axiální tlakové namáhání.....	54
6.5.	Numerické ověření kritické síly .....	64
6.6.	Zhodnocení výsledků experimentální části .....	66
6.7.	Návrh hliníkových insertů .....	67
6.8.	Návrh lepeného spoje .....	68
6.9.	Kompletace prototypu sestavy.....	70
6.10.	Návrh dalšího experimentu.....	73
7.	Závěr.....	74
	Seznam použité literatury .....	76
	Seznam obrázků.....	79
	Seznam tabulek.....	82
	Přílohy .....	84

## Seznam použitých zkratk a symbolů

<i>Zkratka/symbol</i>	<i>Jednotka</i>	<i>Význam</i>
ANOVA	[ - ]	Analysis of Variance
CAD	[ - ]	Computer-Aided Design
CFRP	[ - ]	Carbon fiber reinforced polymer
CV	[ - ]	Spalovací vozidlo
D	[mm]	Vnější průměr
d	[mm]	Vnitřní průměr
DOE	[ - ]	Design of Experiments
DV	[ - ]	Autonomní vozidlo
EDR	[ - ]	Engineering design report
$E_{mb}$	[GPa]	Modul pružnosti v ohybu
$E_{mc}$	[GPa]	Modul pružnosti v tlaku
EV	[ - ]	Elektrické vozidlo
$F_A$	[N]	Návrhová síla v zavěšení
$F_{kr}$	[N]	Kritická síla při prasknutí v tahu
$F_{max}$	[N]	Maximální síla při přetrhu
HV	[ - ]	Hybridní vozidlo
$k_{MSP}$	[ - ]	Bezpečnostní koeficient
$l_{max}$	[mm]	Maximální délka kompozitní trubky
$l_{LS}$	[mm]	Délka lepeného spoje
MBD	[ - ]	Dynamika víceprvkových těles
MKP	[ - ]	Metoda konečných prvků
$R_{mb}$	[MPa]	Mez pevnosti v ohybu
$R_{mc}$	[MPa]	Mez pevnosti v tlaku
SAE	[ - ]	Society of Automotive Engineers

## Úvod

Tato diplomová práce se zabývá návrhem konstrukčního řešení zavěšení kol využívající vlákny vyztužené kompozitní součásti v rámci projektu studentské formule týmu FS TUL Racing reprezentující Technickou univerzitu v Liberci. Vzhledem k neustálému vývoji jednotlivých komponent monopostu studentské formule, a to především s myšlenkou redukce celkové hmotnosti, je tato práce věnována návrhu řešení odlehčené varianty podvozkové sestavy především v oblasti lichoběžníkových ramen.

Hlavní motivací této práce je již zmíněná redukce hmotnosti v podvozkové části monopostu, přičemž dosavadní řešení využívající chrommolybdenovou ocel je na takové úrovni, že pomocí běžně dostupných technologií a materiálů již není prostor pro další vylepšení a redukci hmotnosti. Z tohoto důvodu bylo přistoupeno k řešení návrhu kompozitní varianty využívající jako vyztužující materiál uhlíková vlákna disponující vysokých mechanických vlastností. Díky možnostem a vybavení studentského týmu byla zvolena volba výroby vlastních kompozitních trubek u nichž byly sledovány tři hlavní vstupní výrobní parametry s cílem dosažení optimálních mechanických vlastností potřebných pro následnou aplikaci kompozitních komponent v podvozkové sestavě.

Řešení diplomové práce bylo provedeno v několika následujících krocích. Nejprve byl definován plánovaný experiment designu 2<sup>3</sup>, jehož cílem je sledování vlivu výrobních vstupních parametrů kompozitních prvků na jejich dosažené mechanické vlastnosti. Pro stanovení okrajových podmínek z hlediska dosažení maximálního napětí byla společně s týmem FS TUL Racing provedena dynamická simulace podvozkové části v programu MSC.ADAMS. V následujícím kroku bylo přistoupeno k výrobě kompozitních vzorků, které poté byly vystaveny tříosému ohybovému namáhání a axiálnímu tlakovému namáhání pro ověření mechanických vlastností. Společně s nimi byly testovány komerční vzorky, které jsou často používány konkurenčními týmy, pro dodatečnou možnost porovnání dosažených mechanických vlastností vůči vyráběným vzorkům v rámci této diplomové práce. Zároveň bylo provedeno numerické ověření kritických sil na základě dosažených mechanických vlastností získaných experimentálním měřením. V závěru práce byl vytvořen 3D model konstrukce zavěšení kol využívající zmíněné kompozitní trubky a sestaven její prototyp pro možnost ověření celkového hmotnostního úbytku v rámci podvozkové sestavy.

## 1. Formula student

Formula Student je konstruktérským projektem, kterého se mohou účastnit pouze studenti bakalářského a magisterského studia vysokých škol napříč celým světem. Cílem tohoto projektu je vyvinout a zkonstruovat závodní vozidlo okruhového typu, díky kterému si studenti mohou vyzkoušet své teoretické znalosti v praxi. Zároveň se studenti díky spolupráci s partnery mohou přiblížit k nejrůznějším společnostem nejen se zaměřením v automobilovém průmyslu a seznámit se tak s nejmodernějšími technologiemi dostupnými na aktuálním trhu. [1]

S každou sezónou, začínající společně se školním rokem, přichází také aktualizovaná pravidla, které je nutno dodržet. Pro evropské soutěže se nejčastěji vychází z pravidel Formula Student Germany, které tento rok čítají 131 stran, přičemž jsou zde zahrnuty všechny podkategorie, které jsou rozděleny podle typu pohonné jednotky:

- Spalovací a hybridní pohonné jednotky (CV, HV)
- Elektrický pohon (EV)
- Autonomní vozidla (DV) [2]

### Historie

Historie konstruktérského projektu Formula Student sahá do roku 1980, kdy se skupina studentů z texaské univerzity v Austinu rozhodla založit novou kategorii okruhových vozidel nesoucí název SAE. Původní myšlenkou byla konstrukce závodního vozidla s libovolným 4-taktním spalovacím motorem. Stejně jako u jiných kategorií závodních vozidel i tato kategorie musela splňovat určitá konstrukční pravidla. Jedním z příkladů pravidel je omezení výkonu pomocí restriktoru v ústí sacího potrubí. První oficiální soutěž těchto vozidel pod názvem Formula SAE proběhla v roce 1982, přičemž samotné předpisy čítaly pouze čtyři strany. V průběhu několika let se tato soutěž rozšířila mezi univerzitami po celém světě. K dnešnímu dni existuje více než 600 týmů zabírající se tímto projektem. [2, 3]



Obrázek 1: První studentská formule [4]

## Technické přejímky

Technické přejímky jsou nedílnou součástí každého ze závodů. Při těchto přejímkách se důkladně kontroluje celé vozidlo, především z hlediska, zda splňuje veškerá předepsaná pravidla. Aby byly technické přejímky složeny je důležité splnit několik jejich dílčích částí, kterými jsou:

- Technická inspekce – Jedná se o souhrnnou kontrolu celého vozidla z hlediska konstrukce a bezpečnosti. Součástí této inspekce je kontrola vybavení jezdců, které musí splňovat předepsané normy. V závěru této inspekce je tzv. egress test, kdy každý z pilotů vozidla musí být schopný opustit vozidlo do pěti sekund.
- Test náklonu (tilt test) – Tento test spočívá v naklonění vozidla ve dvou fázích. V první fázi je vozidlo nakloněno pod úhlem 45°, při kterém nesmí dojít k úniku jediné kapky provozní kapaliny. Ve druhé fázi je vozidlo nakloněno pod úhlem 60°, přičemž se vozidlo nesmí odlepit pneumatikami od naklápací plošiny. Celý test probíhá za stálého jištění, aby nedošlo k případnému převrácení vozidla.
- Test hlučnosti (noise test) – Vozidlo musí splňovat hlukové limity dle předepsaných hodnot z pravidel. Hlučnost je měřena s hlukovým filtrem typu C a měří se při specifikované pístové rychlosti, která se následně přepočítává na určité otáčky motoru odvíjející se typu použitého spalovacího motoru. Maximální povolená hlučnost pro tyto otáčky je 110dB, přičemž při volnoběžném chodu motoru nesmí překročit 103dB.
- Test brzd (brake test) – Posledním testem pro vozidla se spalovacími motory je testování brzd, přičemž jediným kritériem pro splnění testu je současné zablokování všech kol, při kterém nesmí dojít k otočení vozidla. [5]

## Statické disciplíny

Nedílnou součástí závodní soutěže jsou statické disciplíny, které spočívají především v prezentaci a obhajobě inženýrských a ekonomických řešení. Tyto disciplíny zahrnují tři části, kterými jsou:

- Engineering design report (EDR) – V této disciplíně musí tým prezentovat a obhájit kompletní návrh vozidla včetně simulací před komisí sestávající se z odborníků automobilového průmyslu. Za tuto kategorii lze získat maximálně 150b.
  - Business plan – Jedná se o disciplínu, při které je prezentován fiktivní podnikatelský záměr před porotou potenciálních investorů. Cílem tohoto podnikatelského záměru je vhodně nalézt řešení, jak efektivně prodat tento návrh a ekonomicky jej podložit. V této kategorii lze získat maximálně 75b.
  - Cost and manufacturing – V průběhu stavby nového monopostu musí tým uvést každou součástku do tzv. Cost reportu, který se v závodním víkendů také prezentuje před komisí. Do této nákladové studie musí být také zahrnuty položky jako výrobní procesy, pronájem prostor atp. V případě této kategorie lze získat maximálně 100b.
- [5]

### **Dynamické disciplíny**

Druhou kategorií soutěžních disciplín jsou dynamické disciplíny, jejichž podstatou je prověřit a zhodnotit jízdní vlastnosti vozidla a jízdní schopnosti jednotlivých pilotů, nutno však podotknout, že je zakázána účast profesionálních závodních jezdců. Cílem každého z týmů je dosáhnout co nejlepších časových výsledků z každé disciplíny, kterými jsou:

- Skidpad – Pravidly definovaná jízdní dráha ve tvaru horizontální osmičky disponuje šířkou 3 m a je ohraničena dopravními kužely. Cílem této disciplíny je především otestovat dynamiku podvozku závodního monopostu. Vozidlo nejprve dvakrát obkrouží levou část vyhrazené tratě a následně dvakrát pravou část. Výsledný čas je stanoven aritmetickým průměrem jednotlivých časů, přičemž za každý shozený kužel je udělena penalizace 2 s. V této disciplíně lze získat maximálně 50b.
- Akcelerace – Jedná se o disciplínu, která měří zrychlení závodního monopostu na dráze o délce 75 m. Pro dosažení co nejlepšího výsledku jsou stěžejními faktory především hmotnost a výkon vozidla, který musí být co nejvhodněji přenesen na vozovku. Bodové ohodnocení je v tomto případě totožné jako v disciplíně Skidpad.

- Autocross – Charakter jízdní dráhy v této disciplíně je na každých závodech rozdílný. Jedná se totiž o časově měřený závod na 1 km, přičemž z jeho výsledků také vychází kvalifikace do hlavní disciplíny (Endurance). Jízdní dráha se zpravidla skládá ze slalomu, či různých ostrých zatáček, tak aby se ověřila ovladatelnost a nastavení závodního vozidla. Stejně jako v případě skidpadu, je dráha ohraničena dopravními kužely a za každý shozený kužel je udělena penalizace 2 s k celkovému výslednému času. Maximální bodové ohodnocení této disciplíny je 100b.
- Endurance – Hlavní disciplína každých závodů, jejíž podstatou je závod na 22 km. Jízdní dráha je ve většině případů velmi podobná dráze Autocrossu, přičemž je upravena tak, aby tvořila uzavřený okruh. Úkolem tohoto závodu je ověřit především spolehlivost vozidla, přičemž za jakoukoliv poruchu na vozidle v průběhu závodu je udělena diskvalifikace. V polovině závodu probíhá také výměna pilotů. Bodově může být tento závod ohodnocen až 250b.
- Efficiency – Tato disciplína se koná v průběhu Endurance závodu, kdy je měřena spotřeba a efektivita spotřebovaného paliva. Z bodového hlediska je však velmi důležitá, jelikož lze získat až 75b. [5]

### 1.1. FS TUL Racing

FS TUL Racing je závodní tým Technické univerzity v Liberci účastníci se mezinárodního projektu Formula student. Tento projekt je v rámci Technické univerzity v Liberci zaštiťován fakultou strojní od roku 2015, kdy byl poprvé založen zakládajícími členy. Cílem tohoto týmu je každoročně navrhnout a zkonstruovat novou a generaci monopostu, aby se tým mohl účastnit sezónních závodů v letním období. K aktuálnímu kalendářnímu roku bylo doposud navrženo a sestrojeno pět generací funkčních monopostů účastnících se různých evropských závodů včetně těch domácích, které se každoročně konají na polygonu autodromu v Mostě. Návrh každého z monopostů vychází ze zkušeností získaných v rámci testování či samotných závodů z předešlých sezón. Možnost účasti v další závodní sezóně je podmíněna podstatnými konstrukčními změnami samotného šasi u každého nového monopostu, tudíž má tým pro kompletaci necelý kalendářní rok. [6]

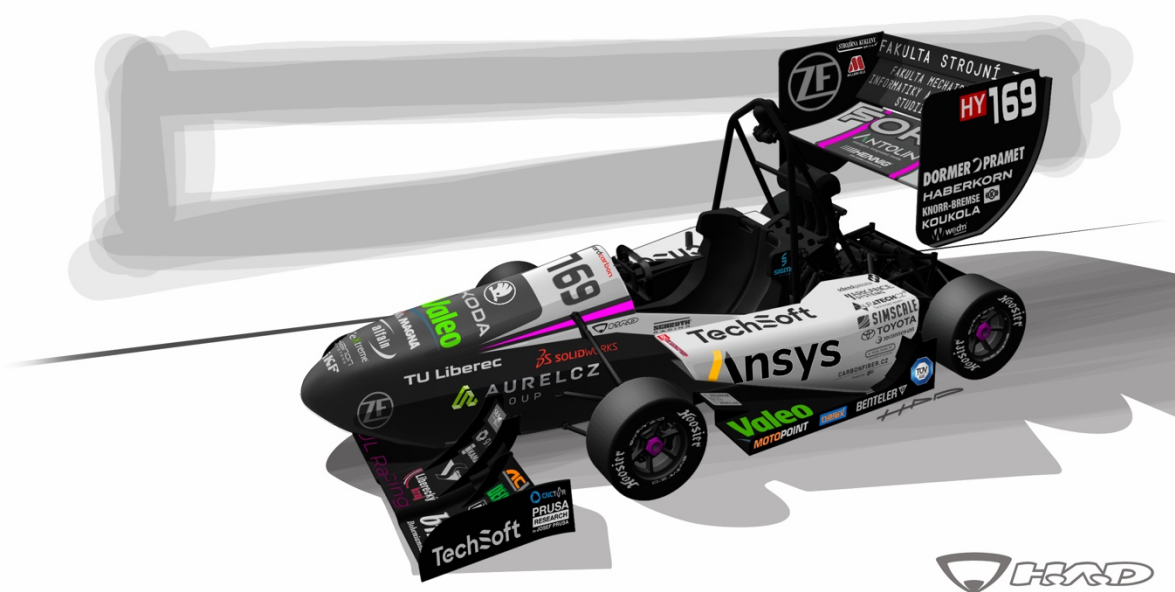
## Časový harmonogram projektu

Obecně časový rozsah projektu probíhá souběžně se školním rokem, přičemž závodní sezóna se odehrává v letním období, kdy mají studenti volný čas. Průběh zimního semestru je především věnován realizaci návrhu a samotné koncepcce nové generace monopostu, který je digitální předlohou pro zkonstruování nové generace závodního vozidla. V období letního semestru je realizována výroba veškerých součástí a dílů potřebných ke kompletaci nového vozidla. [6]

## Rozčlenění týmu

V současnosti se na tomto projektu aktivně podílí přibližně 35 studentů z téměř všech fakult Technické univerzity v Liberci. Struktura týmu je rozčleněna na šest jednotlivých podskupin, přičemž každá z nich má na starosti určitou problematiku, za kterou přebírá zodpovědnost. Jmenovitě mezi tyto podskupiny patří marketingová sekce, dále sekce zabývající se hnacím ústrojím, aerodynamikou, elektronikou, rámem a podvozkovou soustavou.

Autor této diplomové práce, aktivně účastnící se tohoto projektu, je součástí podvozkové sekce, kde má na starost především nastavení geometrie podvozkové soustavy a návrh kompozitních prvků s možností využití v této sekci týmu. V předcházejících letech se autor věnoval návrhu a výrobě kompozitních trubíc, které byly v rámci projektu implementovány jako tyče řízení, či podpurná konstrukce aerodynamických prvků monopostu. Aktuálně je snaha směřována k implementaci těchto trubíc jako nosných prvků (lichoběžníkových ramen) zavěšení nové generace vozu, která je také popsána v této diplomové práci. [6]



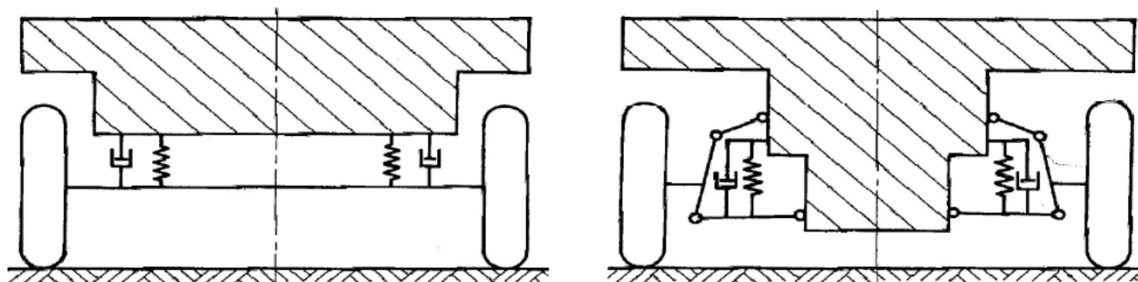
Obrázek 2: Monopost Viktorie týmu FS TUL Racing (sezóna 2023)



## 2. Zavěšení kol

Zavěšení kol je představeno jako způsob uchycení kol k rámu vozidla, přičemž tento prvek podvozku zajišťuje kinematický pohyb kol vzhledem ke karoserii (rámu) vozidla. Konstrukční řešení návrhu zavěšení umožňuje dosáhnout vozidlu požadované jízdní vlastnosti a chování během jízdy. Jeho úkolem je především vhodně přenášet statické síly od zatížení vozidla a dynamické síly, kterými jsou myšleny veškeré akcelerační, odstředivé a aerodynamické síly působící během jízdy vozidla.

Obecně lze zavěšení kol rozdělit na dva základní typy, a to závislé a nezávislé. Závislé zavěšení je chápáno jako jeden celek, který vzájemně propojuje protilehlá kola, díky čemuž jsou kola vzájemně ovlivňována v průběhu jízdy. V případě nezávislého zavěšení kol nedochází ke vzájemnému ovlivňování protilehlých kol (pokud nejsou propojena stabilizátory). [7]



Obrázek 3: Zavěšení kol podvozku (závislé a nezávislé) [8]

### 2.1. Závislé zavěšení

#### Tuhá náprava

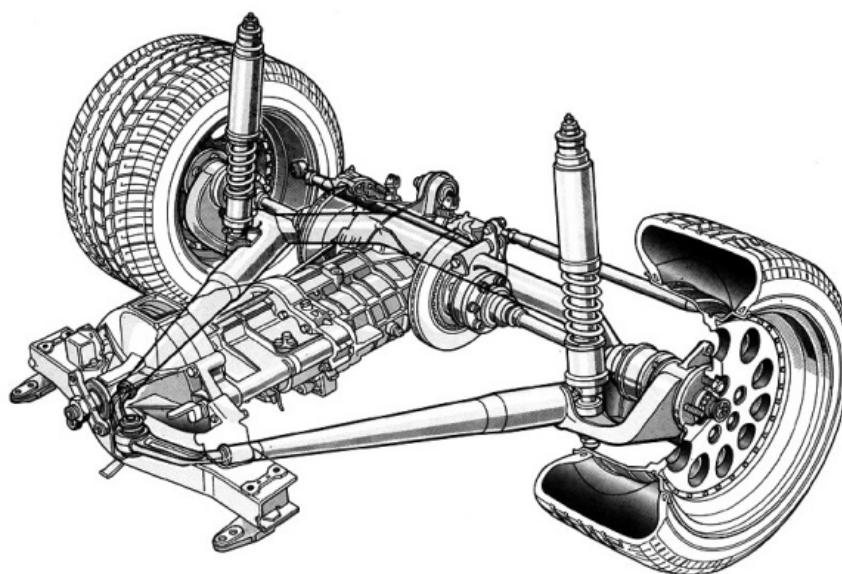
Tento typ nápravy je jedním z nejstarších způsobů konstrukce zavěšení kol, který je uplatňován dodnes zejména u užitkových vozů, autobusů, nákladních automobilů, či přívěsů. Jedná se o konstrukčně i finančně nenáročný typ závislého zavěšení, u které je konstrukce realizována pomocí tuhého profilového nosníku (nápravnicí), na jehož koncích jsou uložena kola vozu. Díky této konstrukci se nemění vzájemná poloha kol při propružení. Odpružení může být v tomto případě realizováno pomocí listových pružin nebo tlumičů s vinutými pružinami. Využití listových pružin je jednodušším řešením uložení, které umožňuje propružení nápravy jak v příčném, tak v podélném směru, nicméně pokud je tření listových pružin nedostatečné,

bývají nahrazeny hydraulickými tlumiči s vinutými pružinami, které mohou být umístěny před i za nápravou. [7, 8]

### Náprava De Dion

Náprava De Dion, pojmenovaná podle hraběte De Dion v roce 1896, byla ve skutečnosti vynalezena jeho spolupracovníkem C. Trépardoux. Tento typ zavěšení, odvozený od tuhé nápravy, spojuje kola pevně nosníkem, s rozdílem propojení rozvodovky, která je propojena s karoserií, či rámem vozidla. Tato konstrukce kombinuje výhody nezávislého zavěšení (především výrazné snížení neodpružených hmot) a tuhé nápravy s pevným uložením kol bez změny odklonu. [7, 8]

Náprava De Dion může být zkonstruována pomocí listových pružin nebo ramen, přičemž v případě použití ramen je nutné zajištění nápravy příčně, a to buď Panhardskou tyčí, Wattovým přímovodem nebo A-ramenem. Přenos hnacího momentu je zajištěn kloubovými hřídeli. Dnes se s tímto typem nápravy setkáme pouze zřídka. [7, 9]



Obrázek 4: Náprava De Dion vozu Alfa 75 [10]

## 2.2. Nezávislé zavěšení

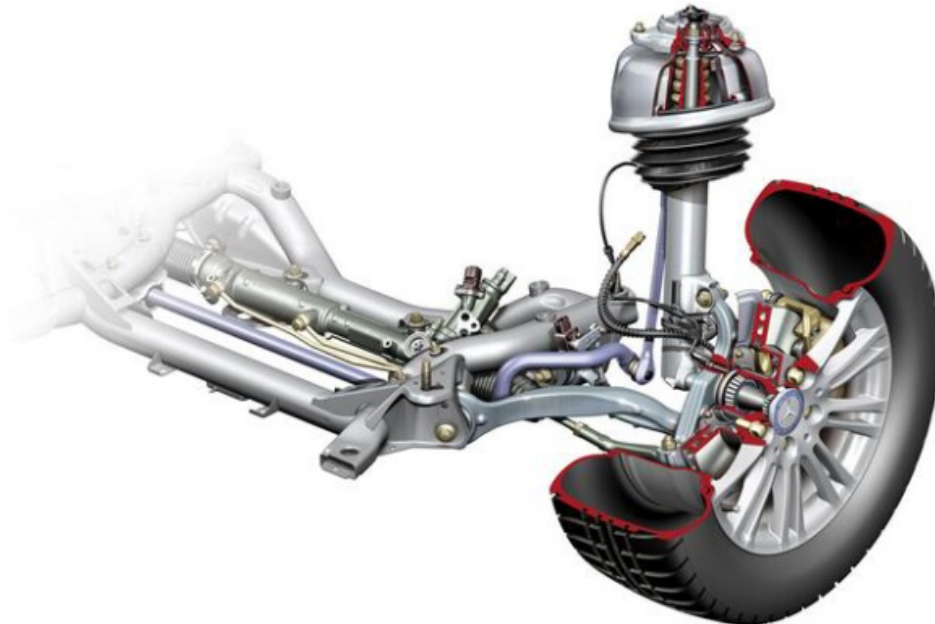
### Náprava McPherson

Náprava McPherson je jedním z nejrozšířenějších konstrukčních návrhů zavěšení kol. Byla vynalezena roku 1949 Earlem S. MacPhersonem. Charakterizuje ji horní část teleskopického

tlumiče pérování, sloužící jako otočný bod závěsu kola. Tato konstrukce poskytuje jedno A-rameno, které zajišťuje spodní uložení pro těhlici s nábojem kola. A-rameno je klíčové pro podélnou a příčnou stabilizaci kola, přenáší většinu sil do karoserie.

Teleskopická vzpěra, skládající se z hydraulického tlumiče a vinuté pružiny, je pevně spojena spodní částí těhlice a horní částí samonosné karoserie. Pokud je náprava říditelná, horní uložení musí být doplněno axiálním ložiskem. Osa řízení prochází středem horního uložení na karoserii a středem spodního uložení těhlice k A-rameni. Osa teleskopické vzpěry není vždy shodná s osou řízení kvůli omezenému prostoru. [7]

Náprava McPherson je často využívána u vozidel se samonosnou karoserií pro vertikální prostor a pevné horní uložení. Je jednoduchá na výrobu, cenově dostupná a nabízí možnost nastavení kinematiky, i když její omezení jsou patrná. Náprava se skládá z méně pohyblivých částí, což zvyšuje komfort, ale může přenášet hluk a vibrace. Dle konkrétního konstrukčního provedení lze přizpůsobit samotnou kinematiku včetně sbíhavosti kol. Náprava McPherson nachází uplatnění v nižších a středních třídách automobilů a v motorsportu, přičemž její jednoduchost je klíčovou výhodou s ohledem na náklady na výrobu a údržbu. [7–9]



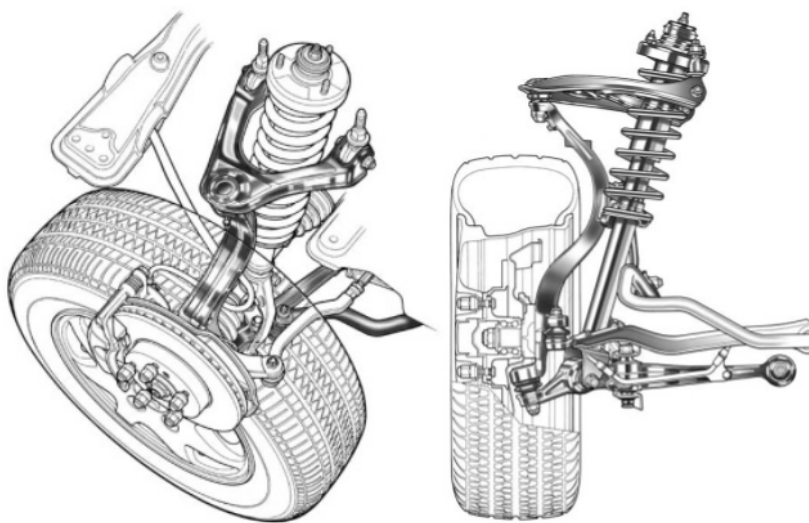
Obrázek 5: Náprava McPherson vozidla MB E-Class [11]

### **Lichoběžníková náprava**

Lichoběžníková náprava je sestavena ze dvou trojúhelníkových ramen, které mají rozdílné délky, přičemž horní rameno bývá zpravidla kratší než rameno spodní. Při pohledu ve směru

svislé roviny tvoří tato ramena lichoběžník. Každé z ramen je na straně karoserie uloženo ve dvou bodech uložení a na straně těhlice pouze v jednom bodě. V případě, že se uložení horního ramene u těhlice nachází uvnitř kola, nazýváme tento typ nápravy nízkou lichoběžníkovou nápravou. Nevýhodou tohoto řešení je složitá konstrukce, nicméně je často využíváno v závodních vozidlech s cílem dosáhnou co nejmenšího aerodynamického odporu. U běžných motorových vozidel se setkáváme s vysokou lichoběžníkovou nápravou, u které je uložení horního ramene u těhlice umístěno v pozici nad pneumatikou. [7, 8]

Na základě umístění ramen pod určitými úhly (z bočního pohledu) je možné ovlivnit charakteristiku anti-dive a anti-squad. Tlumič s vinutou pružinou bývá u běžných motorových vozidel umístěn na spodním rameni, přičemž pružina může být samostatně uložena mimo samotný tlumič, nebo může být integrována do tlumiče. U závodních monopostů se umístění tlumiče značně liší. Může být například propojen pomocí vahadel a táhel až do karoserie z důvodu lepší přístupnosti k jeho nastavení, či z hlediska vhodnějšího aerodynamického řešení. Obecně je ale lichoběžníková náprava z hlediska optimalizace kinematiky vhodnějším typem zavěšení v porovnání s ostatními druhy náprav. [7, 8, 12]



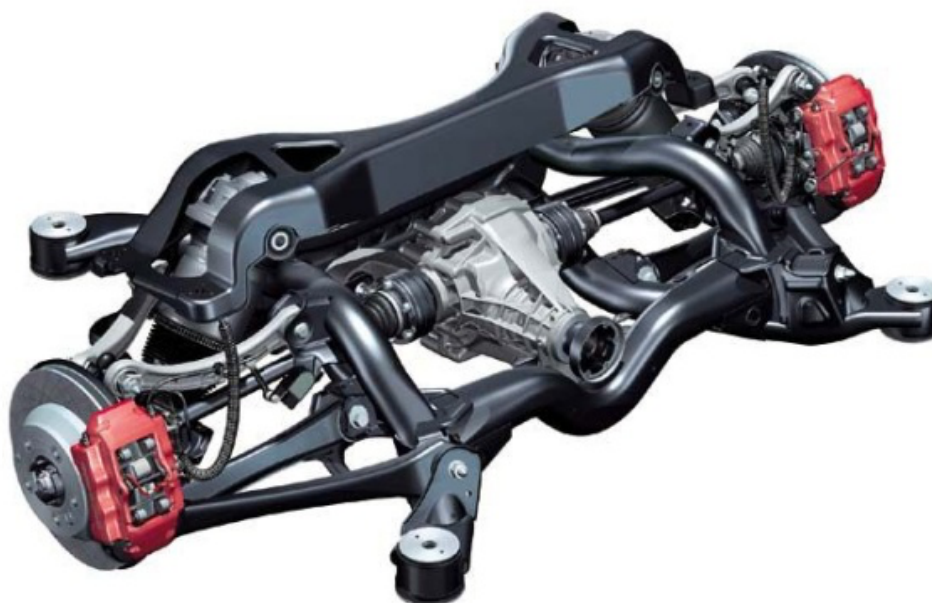
Obrázek 6: Vysoká lichoběžníková náprava [13]

### Víceprvková náprava

Víceprvková náprava využívá pět individuálních ramen, z nichž každé z nich je vybaveno kloubovým ložiskem nebo gumovým pouzdrem na obou koncích. Čep je obvykle umístěn na straně těhlice, zatímco gumové pouzdro slouží k uchycení ke karoserii. Některé varianty

víceprvkové nápravy zahrnují vlečná ramena nebo A-ramena, přičemž na přední nápravě se jedno rameno spojuje s hřebenem řízení.

Víceprvková náprava poskytuje pohodlnou jízdu a vynikající jízdní vlastnosti vozidla, což ji činí preferovanou volbou pro vozidla vyšších tříd. Díky tomu, že jsou ramena namáhána pouze v tahovém a tlakovém směru, mohou být konstrukčně méně robustní než A-ramena. Nicméně, výroba a konstrukce tohoto typu nápravy jsou náročnější a dražší. Optimalizace kinematiky je složitější než u lichoběžníkové nápravy. [7, 8]



Obrázek 7: Zadní víceprvková náprava [14]

### 2.3. Zavěšení kol monopostu Formula Student

Z hlediska pravidel je nutností, aby bylo vozidlo vybaveno plně funkčním zavěšením kol, které je odpružené pomocí tlumících prvků. Omezení definováno pravidly spočívá pouze v minimálním rozvoru, které činí 1525 mm. V praxi bývá zpravidla využito nezávislých lichoběžníkových náprav, které vzhledem k jejich konstrukci umožňují minimální změny geometrie při současném propružení kol. [5]

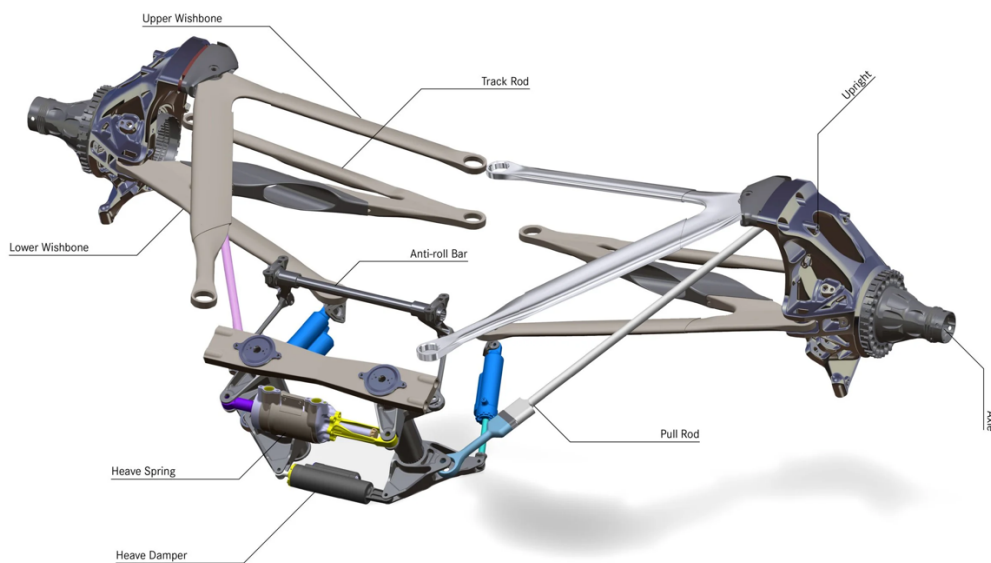
Konstrukce tohoto typu zavěšení spočívá v kombinaci dvojice příčných ramen různých délek a vzájemných úhlů v závislosti na konstrukci samotného rámu vozidla. Trojúhelníkový tvar sestavy je ve společném bodě uložen v těhlici kola, přičemž koncové body jsou pevně uchyceny

k rámu vozidla. Pro uchycení se využívá sférických kloubových ložisek, které umožňují výkyv ramene při propružení vozidla v průběhu jízdy. [15, 16]

## 2.4. Zavěšení kol monopostů Formule 1

Konstrukce ramen podvozku monopostu Formule 1 je elementární součástí, která přímo ovlivňuje jak aerodynamiku, tak celkovou výkonnost a ovladatelnost vozu na závodním okruhu. Ramena podvozku, vyráběné především z kompozitních materiálů využívající uhlíková vlákna a slitiny titanu, musí nabízet perfektní kombinaci nízké hmotnosti, pevnosti a flexibility, aby odolávaly extrémním silám působícím v průběhu jízdy dosahující vysokých rychlostí. V případě F1 se koncepce a poloha ramen mění v závislosti každého závodního okruhu pro zajištění co nejoptimálnějšího nastavení vozidla.

V návrhu je využívána náprava lichoběžníkového charakteru (viz obrázek 8) obdobně jako u návrhu ramen monopostů Formula Student. Jejich celkový tvar a konstrukce je však mnohem komplikovanější vzhledem k aspektu dosažení co nejmenšího aerodynamického odporu vzduchu s kombinací působení velmi vysokých sil, kterých je dosaženo při vysokých rychlostech. V případě push rodů a pull rodů jsou kompozitní elementy zkonstruovány tak, aby odolaly silám větších než 10 kN v tlakovém a tahovém namáhání. Konstrukční řešení ramen bývá zpravidla sestaveno z titanových insertů, přičemž aerodynamické tělo ramene je zhotoveno z kompozitních materiálů využívající uhlíková vlákna. [17]



Obrázek 8: Schéma zavěšení monopostu F1 Mercedes Benz W10 [17]

## 2.5. Využívané materiály pro konstrukci zavěšení kol

### Ocel

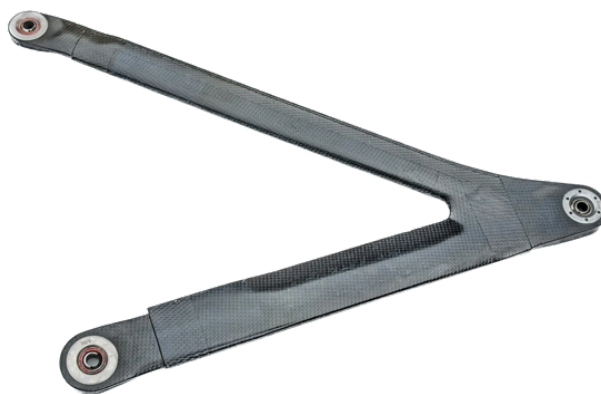
Nejrozšířenějším materiálem pro konstrukci zavěšení kol je ocel, jejíž předností je vysoká pevnost, odolnost, ale především její ekonomická náročnost. Nevýhodou ocelových součástí je vyšší hmotnost, nicméně se s nimi setkáváme běžně v osobních automobilech. V případě závodních vozů se nejčastěji využívá chrommolybdenové ocele pro svojí vysokou pevnost a nižší hmotnost v porovnání s jinými třídami oceli. [2]

### Hliník

V některých případech se u osobních automobilů lze také setkat s hliníkovým zpracováním zavěšení, jehož výhodou je značně nižší hmotnost v porovnání s ocelovou variantou a její korozivzdornost. Nevýhodou je však nižší pevnost a ohybová tuhost. [2]

### Kompozitní materiály

S využitím kompozitních materiálů v podvozkové soustavě se lze setkat povětšinou jen v kategorii vrcholných závodních a prototypových vozidel, kde je kladen důraz především na nízkou hmotnost a specifické pevnostní požadavky. Z hlediska kompozitních materiálů je využíváno vlákenných kompozitních materiálů s polymerní matricí, a to v různých variacích které se odvíjí od technologického postupu výroby a formy použité vlákenné výztuže. I přes nadměrně příznivé mechanické vlastnosti těchto materiálů se však většinou využívá kombinace kovových prvků v podobě insertů, či různých podpurných dílců. Na následujícím obrázku 9 je uveden příklad aerodynamického kompozitního zavěšení z uhlíkových vláken monopostu Formule 1 obsahující titanové vložky. [18, 19]

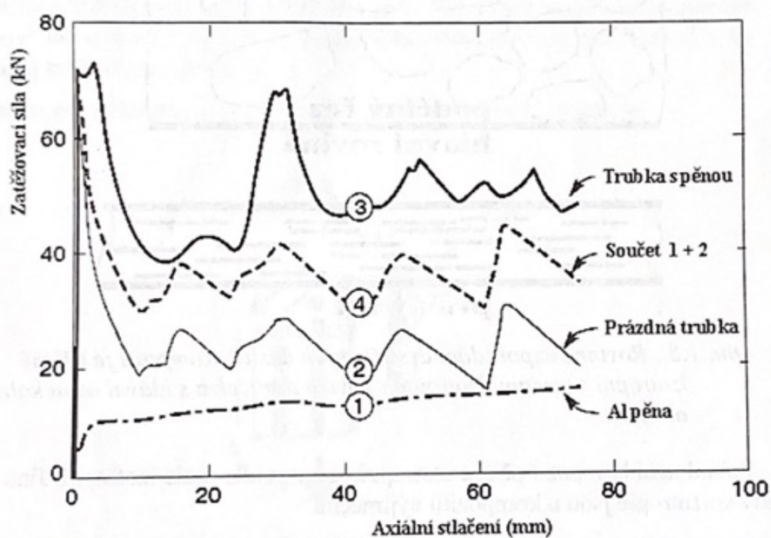


Obrázek 9: Kompozitní zavěšení Formule 1 [20]

### 3. Kompozitní materiály s uhlíkem vyztuženými vlákny

Kompozitní materiály jsou heterogenní materiály složené ze dvou, či více substancí (fází), díky jejichž kombinaci lze získat finální produkt unikátních vlastností, kterých samostatně nedosahuje ani jedna ze složek tohoto kompozitního materiálu. Princip využívající tyto charakteristické materiály se nazývá Synergický efekt, který definuje, že se jednotlivé substance (fáze) vzájemně neslučují ani nerozpouštějí, ale na okolí působí v součinnosti.

Do popředí se dostávají kompozitní materiály s vláknennou výztuží, využívající matrice v podobě polymerních pryskyřic. Kombinace těchto materiálů dosahuje velmi příznivých mechanických vlastností v porovnání s konvenčními materiály. [18, 19]



Obrázek 10: Příklad synergického efektu trubky[18]

#### 3.1. Výztuž z uhlíkových vláken

Hlavní funkcí vláknenné výztuže je zvýšení některých vlastností finálního kompozitního materiálu, zejména pak z hlediska pevnosti a tuhosti. Pro dosažení požadovaných vlastností je zapotřebí využít vhodné orientace a správného vrstvení vláknenné výztuže do připravených forem požadovaného tvaru finálního produktu. Tyto formy mohou být zhotoveny v různých variacích, například s negativní, či pozitivní charakteristikou, nebo také v podobě různých trnů, či lisovacích přípravků. [18]

Uhlíková vlákna jsou velmi často spojována s výrobou kompozitních materiálů a jsou charakteristická velmi vysokou pevností, tuhostí a nízkou tažností. Dalšími přednostmi těchto



vláken je velmi příznivá korozní odolnost, elektrická a tepelná vodivost. Podoba uhlíkových vláken je definována kruhovým průřezem o rozměrech 5-10  $\mu\text{m}$  ve formě kábílku, který je složen z tisíce monofilů. Hustota uhlíkových vláken se pohybuje v rozmezí 1600-2000  $\text{kg}/\text{m}^3$ . Ve výrobních procesech se především využívá vlákenné výztuže v podobě tkanin různých vazeb, nejčastěji pak vazeb plátnových a keprových. V některých případech se lze setkat také s využitím výztužných rovingů, které se používají při procesu kontinuálního navíjení, či při přeplátování úzkých míst nacházejících se ve formách. [18, 19]

### 3.2. Polymerní matrice

Používané polymerní matrice pro vlákny vyztužené kompozitní materiály lze rozdělit do dvou hlavních kategorií, kterými jsou reaktoplasty (dříve označovanými jako termosety) a termoplasty. Polymerní matrice tvoří spojitou fázi v kompozitních materiálech, což umožňuje vznik nové entity s unikátními vlastnostmi, které by nebyly dosažitelné při použití jednotlivých komponent samostatně. Úkolem matrice je zajištění přenosu sil mezi vlákny a udržení geometrické tvarové stálosti kompozitního materiálu. Zároveň také matrice chrání vlákennou výztuž před vnějšími vlivy. Pro zajištění optimálního smočení vláken bez tvorby bublin je nezbytné, aby matrice měla adekvátní viskozitu a povrchové napětí. [19, 21]

### 3.3. Prepreg

Hovoříme-li o prepregu, lze ho charakterizovat jako pryskyřicí předem předsycenou uhlíkovou tkaninu, či samotný roving. Jeho předností je především optimální prosycení polymerní pryskyřicí, která je stanovena jejím výrobcem a s tím spojený zjednodušený výrobní proces z hlediska pracovníka, který tuto tkaninu vrství do předložené formy. Pro aktivaci matrice je však zapotřebí využití autoklávu, který je společně s potřebnými formami velmi nákladným finančním aspektem. Výsledkem je však velmi kvalitní a reprodukovatelný výrobek dosahující vysokých mechanických vlastností a nízkou hmotností. Nevýhodou jsou specifické nároky na uskladnění a vysoká pořizovací cena tohoto materiálu. [22]

## 4. Technologie výroby kompozitních materiálů

Zpracovatelské technologické postupy pro výrobu vlákenných kompozitních materiálů jsou velmi různorodé. Existují plně manuální, částečně automatické, či plně automatizované výrobní techniky zpracování. Všechny tyto postupy zahrnují kroky přípravy a dokončení, které jsou

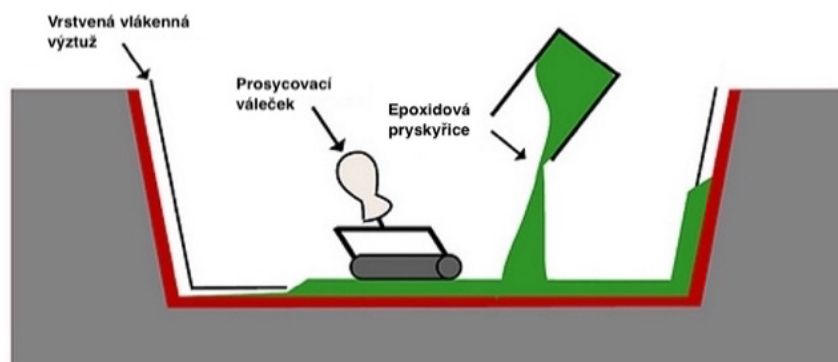
klíčové pro dosažení kvalitních výrobků a zjednodušení výrobního procesu. Příkladem může být důkladné připravení forem již od jejich samotného návrhu, příprava epoxidových pryskyřic a různé dokončovací práce, včetně zpracování výsledného produktu. [19]

#### 4.1. Ruční laminace

Technologický proces ruční laminace se zařazuje mezi historicky první metody využívané pro výrobu kompozitních součástí. Z hlediska nižší produktivity a požadavku zručnosti každého pracovníka je preferována zejména pro malosériovou produkci nebo pro vytváření prototypových konstrukcí díky možnosti výroby součástí komplexních tvarů [23].

Jedním z hlavních benefitů této technologie je nízká finanční náročnost oproti alternativním metodám, jelikož nevyžaduje použití speciálních nástrojů ani dalšího technologického vybavení. Kvalita finálního výrobku je značně závislá na zručnosti a zkušenosti pověřeného pracovníka. Klíčovým aspektem je provedení adekvátní separace formy před zahájením kladení materiálu na její povrch. Tvar formy může být u tohoto procesu jak negativního charakteru, tak charakteru pozitivního. [19]

Výrobní postup v rámci ruční laminace zahrnuje manuální aplikaci vlákně výztuže souběžně s průběžným prosycováním výztuže polymerní pryskyřicí, což je prováděno za použití speciálně modifikovaných válečků. Pro pověřeného pracovníka je důležité, aby během procesu vytlačil veškerý přebytečný vzduch, což je zásadní pro dosažení optimální povrchové struktury kompozitního dílce. Proces laminace je opakován až do dosažení požadované tloušťky stěny výsledného produktu. K vytvrzení materiálu dochází při běžných laboratorních podmínkách, případně může být podpořeno tzv. curing procesem, který je prováděn v temperační peci za předepsané teploty a napomáhá kompozitu dosáhnout vyšší finální teplotní odolnosti [19, 21, 23].



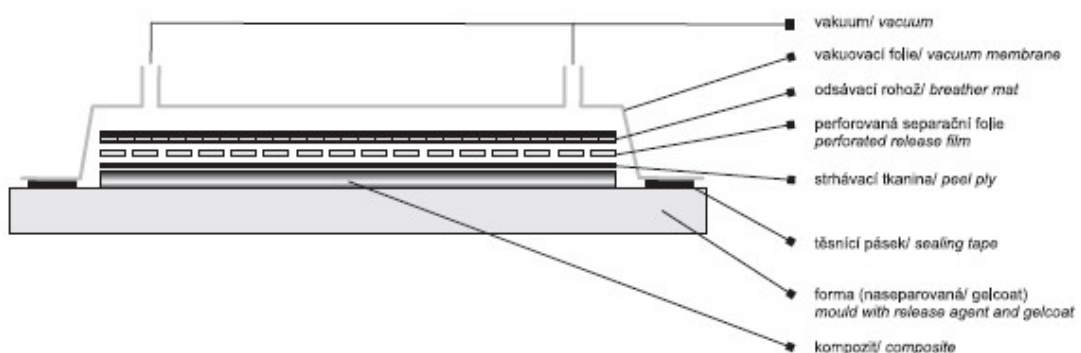
Obrázek 11: Schéma ruční laminace [19]

## 4.2. Vakuové lisování

Vakuové lisování představuje sofistikovanou verzi tradiční ruční laminace. Tento proces je taktéž výrazně ovlivněn dovednostmi a zkušenostmi pověřeného pracovníka, který manuálně klade vlákennou výztuž a zajišťuje její prosycení. Hlavním rozdílem v porovnání s běžnou ruční laminací je využití vakuového systému, který je uskutečněn pomocí vakuové pumpy. Tato pumpa odstraňuje nadbytečný vzduch a polymerní pryskyřici. [19]

Pro úspěšné provádění vakuového lisování je nezbytné do materiálové skladby zařadit specifické složky ve formě perforované folie a odsávací rohože, které umožňují odtok a následnou absorpci přebytečné pryskyřice. Mezi těmito dvěma prvky vlákennou výztuží je potřeba umístit také strhávací tkaninu z polyamidových vláken, jejíž cílem je zajistit jednotlý matný povrch na nepohledové straně kompozitního produktu, který tak eliminuje potřebu dalších povrchových úprav, jako je broušení např. u lepených spojů. V závěru výrobního procesu jsou všechny složky kompozitního materiálu, včetně těch doprovodných, pokryty vakuovací folií, která může obalovat celou formu nebo pouze její pracovní část, jak ilustruje obrázek č.11. Následná vakuace je prováděna pomocí vakuové pumpy po dobu vytvrzení celého kompozitního systému. [24, 25]

Díky tomuto technologickému procesu lze dosáhnout vyššího hmotnostního úbytku finálních kompozitních dílců s lepšími mechanickými vlastnostmi ve srovnání s tradiční ruční laminací. Zároveň zde existuje možnost vytváření sendvičových konstrukcí, kde mezi dvě vrstvy vlákenné výztuže může být vložen lehký sendvičový materiál ve formě různých aramidových voštin, či jiných plastických materiálů disponující rozmanitými tvary. Výsledkem je odlehčený kompozitní dílec specifického charakteru, který odpovídá požadavkům zákazníka. [19, 25]

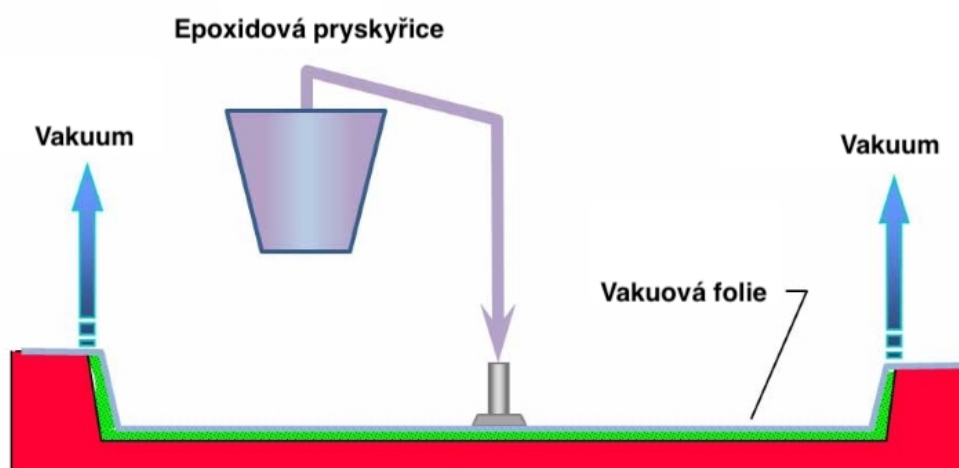


Obrázek 12: Schéma vakuového lisování [25]

### 4.3. Infuzní metoda

Infuzní laminace rovněž využívá vakuový systém obdobně jako v případě vakuového lisování. V tomto procesu je vlákenná výztuže ručně kladena do předem připravené a vhodně naseparované formy, ale již s absencí průběžného prosyncovacího procesu. K udržení soudržnosti vrstev neprosycené výztuže mohou být použity speciální adhezivní spreje, které neovlivňují finální kvalitu povrchu nebo strukturální integritu výsledného kompozitního dílce. Skladba doprovodného materiálu je následující. První vrstvou umístěnou na vlákenný útvar je separační tkanina, na kterou je dále nutno umístit distribuční a odvodňovací prvky spolu s distribuční sítí disponující vysokou propustností, což ve výrobním procesu zajišťuje rovnoměrné nasycení kompozitu po celé jeho ploše. Po uspořádání těchto komponent je prostor ve formě zabalen flexibilní vakuovou fólií, která přispívá k lisování materiálu. S pomocí vakua je pak pryskyřice absorbována skrze vstupní distribuční prvek, zatímco na opačné straně formy je odváděna přebytečná pryskyřice pomocí výstupního odváděcího prvku. Proces vytvrzení probíhá za běžných laboratorních podmínek včetně standardního atmosférického tlaku. [26–28]

Hlavní přínosy této metody zahrnují optimální množství aplikované pryskyřice, což může vést k výraznému snížení hmotnosti a zároveň umožňuje docílit požadovaných mechanických vlastností, v kombinaci s redukcí nákladů na potřebný materiál z hlediska použité matrice. Zároveň je díky tomuto postupu dosaženo vysoké kvality povrchu pohledové strany finálního kompozitu, ovšem s nevýhodou spojenou s komplexností celého výrobního procesu. [19]



Obrázek 13: Schéma infuzní technologie [19]

#### 4.4. Výroba s využitím autoklávu

Technologie výroby kompozitů s využitím autoklávu využívá zpravidla vláknenné výztuže ve formě prepregů, tedy předem předsycené vláknenné výztuže nevytvrzenou polymerní matricí. Tyto vláknenné výztuže mohou být různě orientovány a často se používají ve tkané nebo unidirekcionální formě. To umožňuje přesné řízení mechanických vlastností finálního komponentu, jako jsou tuhost a pevnost. Předem připravené vláknenné výztuže jsou nejprve tvarově nastřižené do požadovaného tvaru a následně jsou vrstveny ve formě dle určené posloupnosti s ohledem na požadované výsledné mechanické vlastnosti a tloušťku kompozitního dílce. [18, 29]

Vrstvený materiál je společně s doplňujícími materiály umístěn do vakuové folie a následně je hermeticky uzavře, aby došlo k odstranění vzduchu a stlačení jednotlivých vrstev. Takto připravený celek se poté umístí do autoklávu, kde je vystaven kontrolovanému teplu a tlaku. Princip této technologie využívá přetlaku a podtlaku vytvořeném ve vakuové folii společně s působením přednastavené teploty. Teplota podporuje vytvrzení pryskyřice, která spojuje vrstvy dohromady, zatímco tlak zajišťuje odstranění jakýchkoliv vzduchových bublin a dosahuje kompaktního, jednotného laminátu s vysoce kvalitním pohledovým povrchem. Typické podmínky vytvrzování zahrnují teploty kolem 180°C a tlak v rozmezí 2 až 25 barů. [19, 30]

Technologie autoklávu, ačkoliv poskytuje výstupní komponenty vysoké kvality, je známá svými vysokými investičními a provozními náklady, včetně potřeby sofistikovaného vybavení a teplotně kontrolovaného skladování pro nevytvrzené prepregové výztuže. Nicméně díky možnosti výroby komponent různé složitosti společně s dosažením konzistentně vysoké kvality zdůrazňuje tato technologie klíčovou roli ve výrobě moderních kompozitů. [19]



Obrázek 14: Autokláv [30]

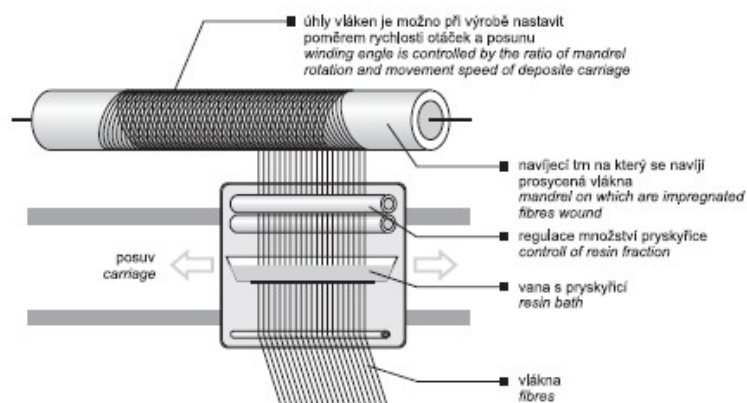
## 4.5. Kontinuální navíjení

Technologie výroby kompozitních dílců pomocí navíjení vláknenné výztuže, jako jsou vláknenné rovingy, umožňuje efektivně vyrábět duté objekty s osovou symetrií. Tento proces využívá možnost regulace napětí a orientace materiálu, což zajišťuje optimální strukturu výztuže a zajišťuje tak požadované mechanické vlastnosti v jednotlivých směrech výsledných výrobků, mezi které patří zejména profily, tlakové nádoby nebo součásti automobilů jako jsou kardanové hřídele či listová pera.[19, 31]

Tvar jádra může disponovat různých tvarů a jsou vyráběna z různých materiálů. V praktickém využití existuje několik možností aplikace jader, z nichž se některá po dokončení procesu odstraní z finálního produktu. Používají se ale také tzv. ztracená jádra, typicky z rozpustných solí, pěn nebo materiálů vhodných pro 3D tisk (např. FDM ST – 130), která usnadňují výrobu dílců komplexních tvarů. [32, 33]

Pro nasycení výztuže se nejčastěji využívá průtahu skrze polymerní lázeň, nicméně se lze setkat s variantou předem prosycených prepregových rovingů, nebo s méně využívanou metodou v podobě impregnace polymerní matricí až po navinutí vláknenné výztuže. Výrobní proces může zahrnovat také vytvrzovací proces v temperačních pecích, který zvyšuje kvalitu kompozitu, a především jeho vyšší teplotní odolnost, není to však podmínkou. [32]

Hlavním benefitem tohoto technologického procesu je vysoká automatizace, která je spojena s vysokou produktivitou, což umožňuje ekonomicky efektivní výrobu kompozitních dílců různých rozměrů. Z hlediska materiálové finanční nákladnosti se jedná o cenově výhodnější řešení ve srovnání s jinými technologiemi. Naopak, záporným aspektem je vysoká počáteční investice do technologického vybavení, zejména při použití ztracených jader. [21]

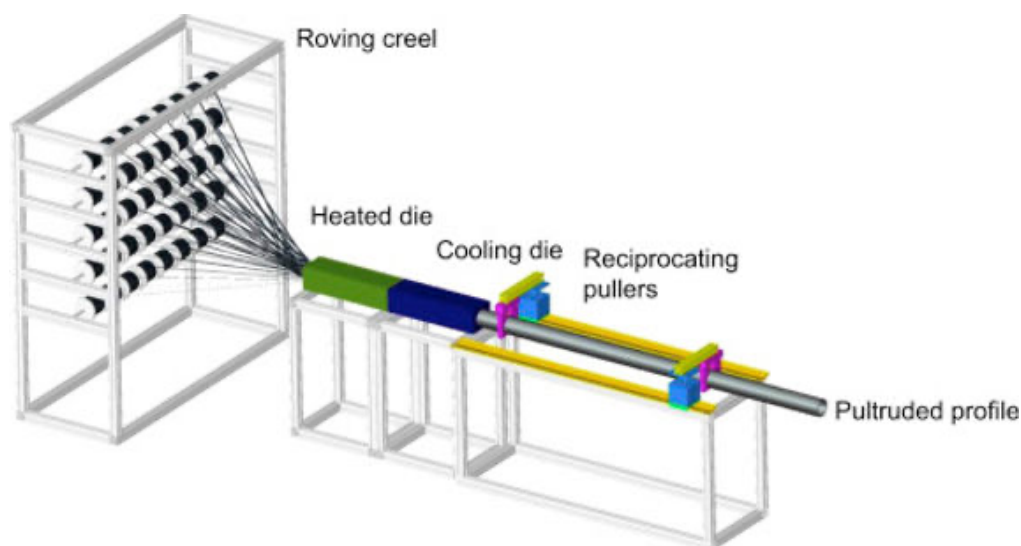


Obrázek 15: Schéma technologického procesu kontinuálního navíjení [32]

## 4.6. Pultruze

Technologický proces pultruze je charakterizován nepřetržitým tažením vlákenné výztuže skrz lázeň s pryskyřicí, kde dochází k jejímu prosycení. Vyztužující materiály jsou nejčastěji uplatňovány ve formě rovingů případně vlákenných rohoží. Po procesu prosycování polymerní pryskyřicí se materiál formuje do požadovaného průřezu ve tvarovací hlavě, která je spojena s vytvrzovací hlavou, kde dochází k finálnímu vytvrzení kompozitu. Pro zajištění požadované tvarové stálosti je nutné použít vysoce reaktivní polymerní systémy. Hotový kompozitní profil se poté protahuje odtahovacím zařízením, které určuje rychlost celé výrobní linky. V závěru výrobního procesu je zhotovený kompozitní profil přiveden do řezacího zařízení, kde se profil rozděluje na jednotlivé segmenty. [19, 34]

Pultruze nabízí možnost výroby nekonečně dlouhých profilů s průřezy různých tvarů dutého, či plného charakteru. Nespornou výhodou je vysoká automatizace výrobního procesu, což činí proces velmi efektivním. Z ekonomického hlediska se jedná o technologický proces vyžadující vyšší počáteční investice na pořízení výrobní linky. Mechanické vlastnosti vyrobených profilů technologií pultruze mohou být částečně omezeny z důvodu orientace vlákenné výztuže, která je ukládána pouze ve směru osy profilu. [34]



Obrázek 16: Schéma technologického procesu pultruze [34]

## 5. Design of experiments (DOE)

Metoda statistického plánování experimentů, často označována zkratkou DOE, je používána v průmyslových odvětvích k odhalení kardinálních vlivů jednotlivých faktorů s následným cílem dosáhnout zlepšení v rámci výrobních procesů. Statisticky naplánovaný experiment je proveden v podobě série zkušebního testování, které je systematicky uspořádáno s důrazem na jejich statistické vyhodnocení. [35]

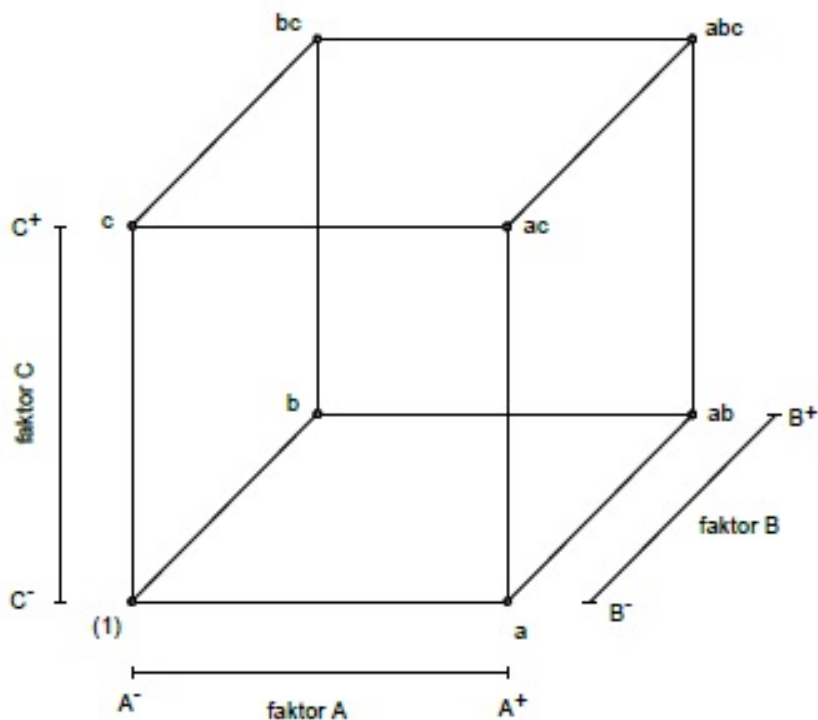
### 5.1. Vícefaktoriální plánovaný experiment

Mnoho průmyslových experimentů se věnuje studiu dvou, či více faktorů. Pro tyto experimenty je obecně nejvhodnější využití tzv. faktorových plánů. U těchto faktorových plánů je tvořen faktorový návrh, jehož podstatou je průzkum vlivu všech možných kombinací jednotlivých faktorů v celé řadě replikací daného experimentu. Obecně tedy jestliže je uvažováno o existenci „x“ úrovní faktoru „X“ a „y“ úrovní faktoru „Y“, každá replikace obsahuje všechny kombinace úrovní každého z faktorů. Výsledkem je efekt faktoru, který je definován jako změna odezvy způsobená změnou jednotlivé úrovně faktoru. [36]

#### Design $2^3$

V experimentální části práce budou při výrobě kompozitních trubíc zkoumány tři různé vlivy faktorů na závislých proměnných, přičemž každý z faktorů má dvě úrovně. Myšlenými faktory pro tuto práci jsou orientace vláken, počet vrstev vlákenné výztuže a typ použité pryskyřice. Pro tento typ experimentu je vhodné využít faktorového plánovaného experimentu  $2^3$ , jehož podstatou je průzkum třech různých faktorů se dvěma úrovněmi, u nichž je zapotřebí rozlišit hlavní faktory od vedlejších, které nemají na odezvu podstatný vliv. Celkovým počtem všech možných kombinací je v případě tohoto typu experimentu 8, které lze graficky znázornit jako krychli s jednotlivými kombinacemi (viz obrázek 17).





Obrázek 17: Grafické znázornění kombinací všech faktorů a úrovní designu  $2^3$  [36]

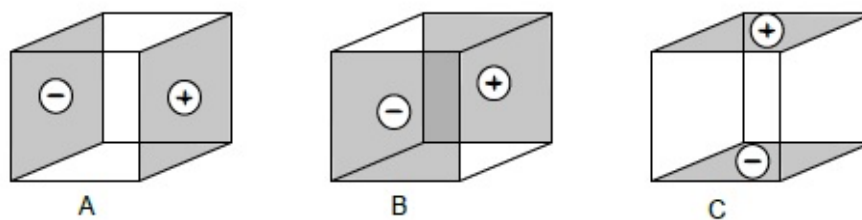
Run	A	B	C	Labels	A	B	C
1	-	-	-	(1)	0	0	0
2	+	-	-	a	1	0	0
3	-	+	-	b	0	1	0
4	+	+	-	ab	1	1	0
5	-	-	+	c	0	0	1
6	+	-	+	ac	1	0	1
7	-	+	+	bc	0	1	1
8	+	+	+	abc	1	1	1

Obrázek 18: Různé typy zápisů kombinací všech faktorů designu  $2^3$  [36]

### Hlavní efekt faktoru

Efekt jednotlivých faktorů na odezvu se vypočítá jako rozdíl v odezvě způsobený změnou v úrovni faktoru (viz rovnice 1). Pro přehlednost jsou faktory znázorněny na obrázku 19.

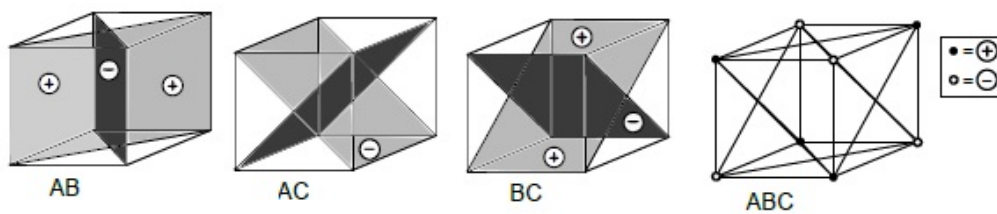
$$\text{efekt A} = \overline{y_{A+}} - \overline{y_{A-}} = \frac{1}{4n} [a + ab + ac + abc - b - c - (1) - bc] \quad (1)$$



Obrázek 19: Znázornění jednotlivých faktorů [36]

### Efekt interakce faktorů

V případě faktorového plánovaného experimentu  $2^3$  vystupují dva druhy interakcí. Prvním druhem jsou dvou faktorové interakce, které jsou zde obsaženy třikrát a dále interakce tří faktorová, která je zde obsažena pouze jednou. Jednotlivé interakce jsou graficky znázorněny na obrázku 20. [36]



Obrázek 20: Dvou faktorové a třífaktorová interakce faktorů [36]

Efekty interakcí AB a ABC lze vypočítat pomocí definovaných vztahů:

$$efekt\ AB = \overline{y_{AB+}} - \overline{y_{AB-}} = \frac{1}{4n} [abc + ab + c + (1) - a - b - ac - bc] \quad (2)$$

$$efekt\ ABC = \overline{y_{ABC+}} - \overline{y_{ABC-}} = \frac{1}{4n} [abc + c + b + a - (1) - ab - ac - bc] \quad (3)$$

## 6. Experimentální část

Experimentální část diplomové práce je věnována návrhu a zhotovení prototypu konstrukce zavěšení z vlákný vyztužených kompozitních materiálů aplikovatelného na monopost studentské formule týmu FS TUL Racing. Cílem této práce je navrhnout a zhotovit konstrukci kompozitního zavěšení s úmyslem redukce celkové hmotnosti neodpružených hmot podvozkové sestavy, která je pro tento projekt klíčová. Pro výrobu nosných částí lichoběžníkových ramen byla zvolena metodika výroby kontinuálního navíjení uhlíkového rovingu, přičemž byl připraven plánovaný experiment designu  $2^3$  s cílem sledovat vliv tří konstrukčních parametrů ve dvou úrovních na výsledné mechanické vlastnosti. Mechanické vlastnosti byly následně měřeny z hlediska tříosého ohybového namáhání a axiálního tlakového namáhání ve směru průřezu zhotovených kompozitních trubic, přičemž bylo měření doplněno o měření komerční varianty produktu pro možnost dodatečného porovnání mechanických vlastností vůči vyráběným vzorkům. Výsledky mechanických zkoušek byly poté porovnávány s okrajovými podmínkami získaných z MKP simulace dynamického modelu vozidla, na jejichž základě byla vybrána nejvhodnější varianta výrobních parametrů kompozitních trubic pro zhotovení prototypu lichoběžníkového zavěšení.

### 6.1. Návrh plánovaného experimentu designu $2^3$

Pro návrh plánovaného experimentu byly zhotoveny vzorky kompozitních trubic s různými vstupními parametry výrobního procesu. Volba vstupních parametrů byla zvolena na základě získaných znalostí z bakalářské práce s ohledem k charakteru plánovaného experimentu, tedy ke každému faktoru (parametru) náleží dvě jeho úrovně. [19]

- Faktor A byl zvolen jako počet navíjených vrstev (5 a 7) uhlíkového rovingu, jehož cílem je zjistit, zda má množství použité výztuže výrazný vliv na výsledné mechanické vlastnosti finálního dílce. V některých grafech uváděno pod symbolem X1.
- Faktor B, neboli navíjecí úhel byl z hlediska výsledného použití zvolen na  $20^\circ$  a  $30^\circ$ , přičemž materiál s tímto charakterem návínů dosahuje vyšší pevnosti při tahovém a tlakovém namáhání. V některých následujících grafech uvedeno pod symbolem X2.
- Sledovaným faktorem C byl použitý typ polymerní matrice, v práci dále uváděn jako typ A a typ B, přičemž každá z matic má výrobcem předepsané jiné výsledné mechanické vlastnosti. V některých následujících grafech uvedeno pod symbolem X3.

Myšlenkou sledování jednotlivých faktorů je zjistit, který z výrobních parametrů, případně jejich vzájemné kombinace, je vhodnější pro konkrétní použití kompozitního dílce.

V případě této práce byl uplatněn model plánovaného experimentu designu  $2^3$  disponující třemi faktory na dvou sledovaných úrovních, což odpovídá osmi variantám sledovaných vzorků (viz obrázek 18), přičemž u každého z nich byly provedeny 3 měření. Pro možnost třech opakovaných měření tedy bylo zhotoveno 24ks vzorků o délce 250mm, které byly připraveny pro testování mechanického namáhání v ohybu. Dále byla připravena druhá sada 24ks vzorků disponující délkou 60mm pro testování mechanického namáhání z hlediska axiálního tlaku v průřezu vzorku.

Jednotlivé sledované faktory a jejich úrovně pro plánovaný experiment jsou pro přehlednost znázorněny v následující tabulce 1.

Tabulka 1: Sledované faktory a jejich úrovně

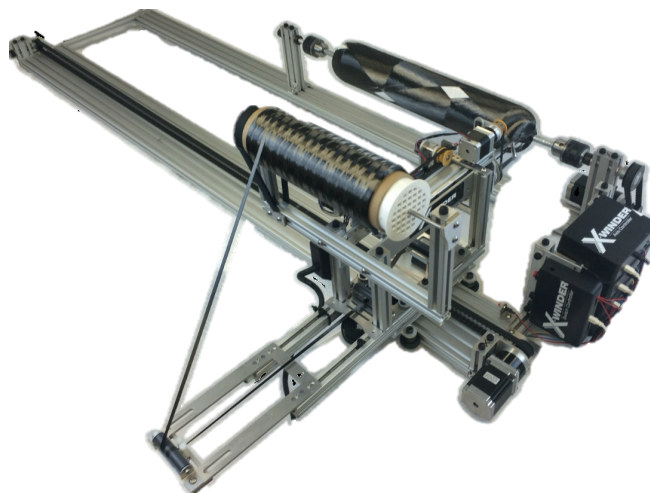
	Faktor		
Run	A	B	C
1	5	20	A
2	7	20	A
3	5	30	A
4	7	30	A
5	5	20	B
6	7	20	B
7	5	30	B
8	7	30	B

## 6.2. Výroba kompozitních trubíc

### Navíjecí zařízení

Vzorky kompozitních trubíc, tvořící nosnou část celého zavěšení monopostu, byly zhotoveny za pomoci navíjecího zařízení od americké společnosti X-Winder jehož princip spočívá v kontinuálním navíjení prosyceného uhlíkového rovingu epoxidovou pryskyřicí. Konkrétní použitý typ zařízení 4X-23 (viz obrázek 21) disponuje čtyřosým navíjecím mechanismem, který zajišťuje pohyb zařízení ve čtyřech samostatných osách. Díky tomuto mechanismu je možné také navíjet komponenty v podobě tlakových lahví. Samotné zařízení je sestrojeno na rámové konstrukci hliníkových profilů, na nichž je umístěna navíjecí hlava, upínky pro navíjecí trn a také řídicí systém, který je ovládán skrze osobní počítač. K navíjecímu zařízení jsou standardně dodávány dva podpůrné systémy v podobě softwarového rozhraní, díky kterým je

možné celý systém ovládat a volit požadované výrobní parametry. Na základě těchto programů je pak vygenerován G-code soubor, který automaticky ovládá celé zařízení.



Obrázek 21: Navíjecí zařízení X-Winder 4X-23 [31]

### **Použitý materiál**

#### Epoxidový laminační systém

Pro výrobu byly použity dva druhy polymerní epoxidové pryskyřice. Prvním druhem matrice byl pro svoji univerzálnost zvolen reaktoplastický epoxidový systém L285 s tužidlem L287, dále uváděn jako typ A, po jehož vhodném vytvrzení lze dosáhnout velmi vysokých mechanických vlastností. Volba tohoto epoxidového systému s tímto tužidlem byla vybrána z důvodu zpracovatelských vlastností, přičemž tento systém vyniká velmi nízkou viskozitou a zároveň dlouhou dobou zpracovatelnosti, což jsou žádoucí požadavky pro technologický proces kontinuálního navíjení. Zároveň se jedná o matrici, jenž je značně využívána v leteckém průmyslu a dosahuje potřebných vlastností. Výhodou tohoto systému je také možnost vytvrzení při pokojové teplotě za určitých podmínek, který lze ovšem značně urychlit pomocí vytvrzovací pece.

Jako druhý epoxidový systém byla zvolena infuzní pryskyřice Resoltech 1800 s tužidlem 1805, dále uváděn jako typ B, který by podle technické dokumentace měl dosahovat ještě vyšších mechanických vlastností. Tento systém vyniká především svojí smáčivostí a také velmi nízkou viskozitou. Jeho nevýhodou je ale delší vytvrzovací proces, který je výrobcem udáván při 60°C po dobu 16 hodin.

### Vláknenná výztuž

Pro návin kompozitních trubic byl použit uhlíkový roving 24K, což značí, že se jedná o roving zhotoven z 24000 jednotlivých uhlíkových vláken. Konkrétně se jedná o uhlíkový roving Tenax IMS65 E23 24K s jemností 830 tex, který byl zvolen pro dostupnost ze skladových zásob projektu studentské formule. Výrobce udávaná pevnost vláknenného útvaru v tahu dosahuje 6000 MPa a modul pružnosti v tahu dosahuje 290 GPa. Průměr samostatných vláken obsažených v rovingu je 5 $\mu$ m a hustota vláknenné výztuže disponuje 1,78 g/cm<sup>3</sup>.



Obrázek 22: Uhlíkový roving Tenax IMS65 E23 24K

### Separáční vosk

Nezbytnou součástí výrobního procesu je separační vosk, který byl na základě předchozích zkušeností z bakalářské práce zvolen od výrobce Spacewax s výrobním označením 300 [19]. Výhodou tohoto separátoru je především univerzálnost použití napříč epoxidovými, polyesterovými i akrylovými laminačními systémy a možnost kombinace s dalšími druhy separátorů (například PVA separátory). Zároveň je vhodný také pro vytvrzovací procesy využívající temperační pece. Teplotní odolnost je výrobcem udávána do 140°C.



Obrázek 23: Separáční vosk Spacewax 300

### Stahovací páska

Při zakončení navíjecího procesu byla pro bezpórovitý vnější povrch použita stahovací páska Diatex Filament 160, která umožňuje uzavřít navinutý materiál a při vhodném převinutí také vytlačit přebytečnou pryskyřici. Páska dosahuje teplotní odolnosti 160°C a je tedy vhodná pro vytvrzovací procesy využívající temperační pece. Po dokončení vytvrzovacího procesu je snadné pásku sejmout z kompozitního materiálu. Výhodou této pásky je možnost vhodného předepnutí na navinutý materiál a také vhodnost použití napříč epoxidovými i polyesterovými laminačními systémy.



Obrázek 24: Stahovací páska Diatex Filament 160

### **Technologický postup výroby**

Navíjený materiál byl postupně kladen na navíjecí ocelový trn o průměru 16 mm, který zajišťuje ideální vnitřní kruhový průřez.

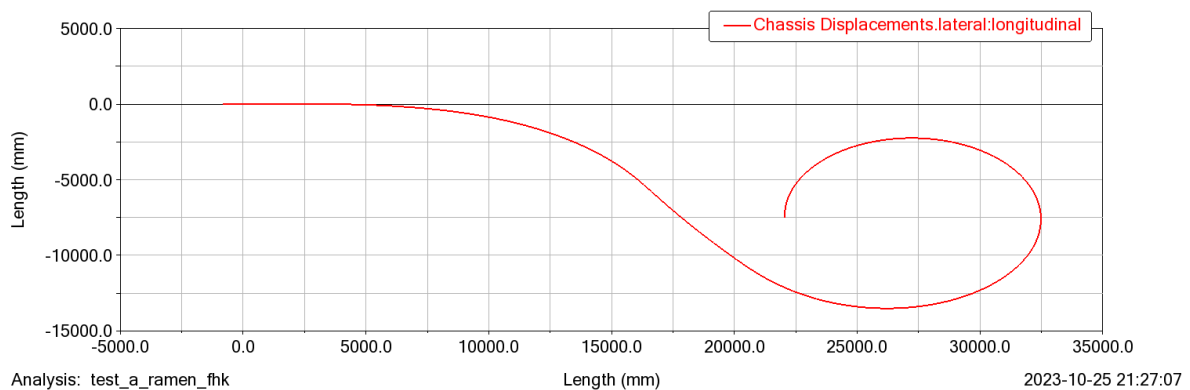
Ze zkušeností získaných při tvorbě bakalářské práce bylo nutností zajistit vhodnější vnější povrch materiálu z důvodu vysoké pórovitosti zapříčiněné vzduchovými bublinami. Tento jev by mohl zapříčinit deformaci materiálu v pórovitých místech a nedosažení potřebné celkové pevnosti. Tato problematika byla zajištěna zvolením vhodnější stahovací pásky, která je dodatečně navíjena ihned po dokončení procesu navíjení uhlíkového rovingu. Výhodou této stahovací pásky je vyšší tvarová přizpůsobivost a absence lepícího povrchu. Je však nezbytně nutné vhodně pásku předepnout a umístit tak, aby bylo zamezeno tvorbě jakékoliv vzduchové bublině. Jednotlivé vrstvy pásky se postupně musí přes sebe překládat. V případě ideálního navinutí pásky také dojde k odstranění přebytečné epoxidové pryskyřice, což značně ovlivní výslednou hmotnost a vlastnosti samotné kompozitní trubice.

Pro získání požadovaných vlastností kompozitního materiálu bylo zapotřebí provést vhodný vytvrzovací proces dle přiložených technických dokumentací použitých epoxidových

pryskyřic. Pro pryskyřici A s označením H285 probíhal vytvrzovací proces ve vytvrzovací peci při 70°C po dobu 5 hodin. V případě pryskyřice B - Resoltech 1800 je vytvrzování více než dvojnásobně delší v porovnání s pryskyřicí L285 a probíhá ve vytvrzovací peci za teploty 60°C. Po dokončení vytvrzovacího procesu je možné navíjecí trn z kompozitního materiálu vyjmout pouhým vykroucením. Pro usnadnění jeho vyjmutí je na počátku trn několikrát naseparován separačním voskem, který zamezuje přilnutí epoxidové pryskyřice k jeho ocelovému povrchu.

### 6.3. Simulace v programu ADAMS

Na základě kinematické simulace v programu MSC.ADAMS byly pomocí modulu Adams Car charakterizovány působící síly v bodech uložení ramen monopostu (tj. v těhlici kola a rámu monopostu). Pro získání působících sil byl v kooperaci s podvozkovou sekcí týmu FS TUL Racing zhotoven dynamický model, který poskytuje představu o silách působících na podvozek vozidla při dynamickém zatížení. Pro možnost simulace dynamického modelu je zapotřebí definovat charakteristiky jednotlivých dílů (nápravy, pneumatiky, řízení, hnací ústrojí aj.), včetně upřesnění hmotnostního rozvážení a těžiště, aby mohla být vytvořena kompletní sestava vozidla. Pro samotnou MBD (dynamika více prvkových těles) simulaci je nutné charakterizovat trajektorii a polohu vozovky, která je znázorněna na obrázku 25. Rychlost průjezdu touto vozovkou byla stanovena na 30 km/h.

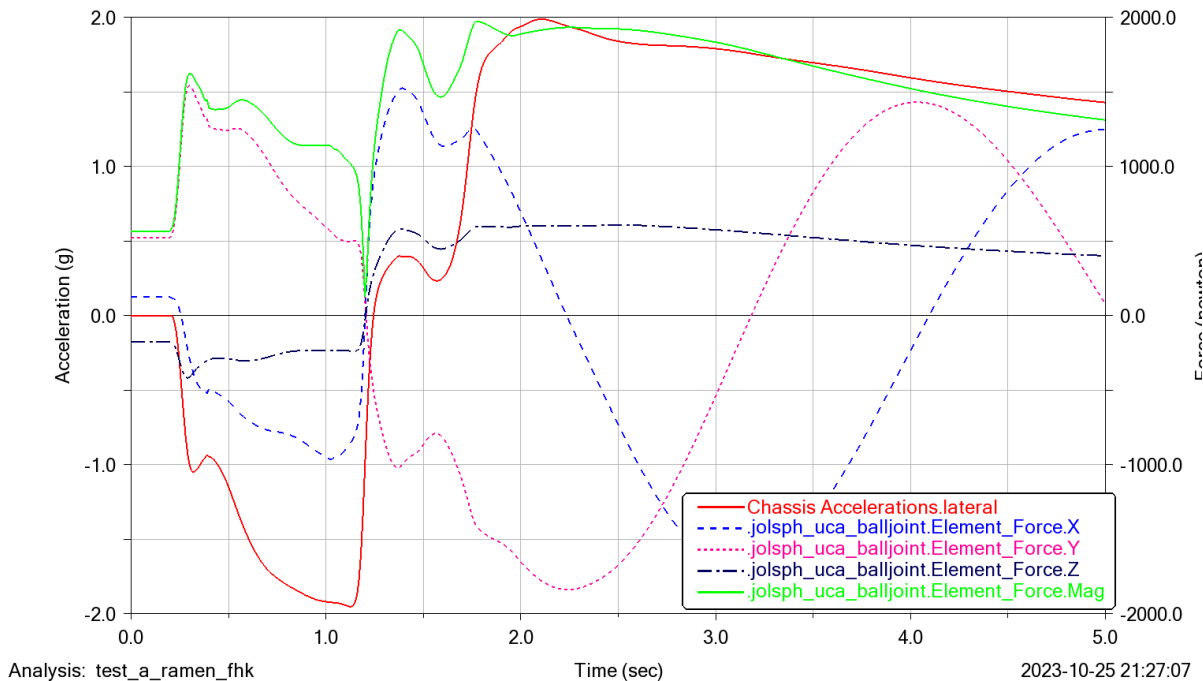


Obrázek 25: Trajektorie a poloha vozovky (fishhook)

Po provedení MBD simulace průjezdu zatáčkou typu „fishhook“ byly sledovány působící síly v bodech uchycení předních spodních a horních ramen zavěšení vozidla v jednotlivých směrech souřadnicového systému. Tyto síly jsou následně použity jako okrajové podmínky pro nadcházející MKP (metoda konečných prvků) simulaci, která analyzuje deformaci a napětí ve struktuře materiálu. Pro přehlednost získaných hodnot je souřadnicový systém vozidla

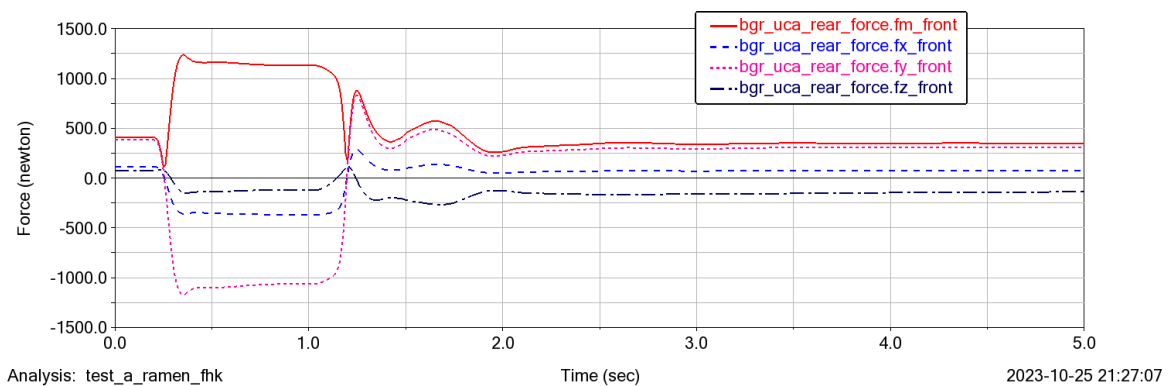


orientován způsobem, kdy osa X směřuje k zadní části vozidla a počátek je umístěn uprostřed přední nápravy. Na následujících obrázcích (26 - 29) jsou znázorněny jednotlivé působící síly v závislosti na čase průjezdu předních horních a spodních ramen na obou stranách uložení.



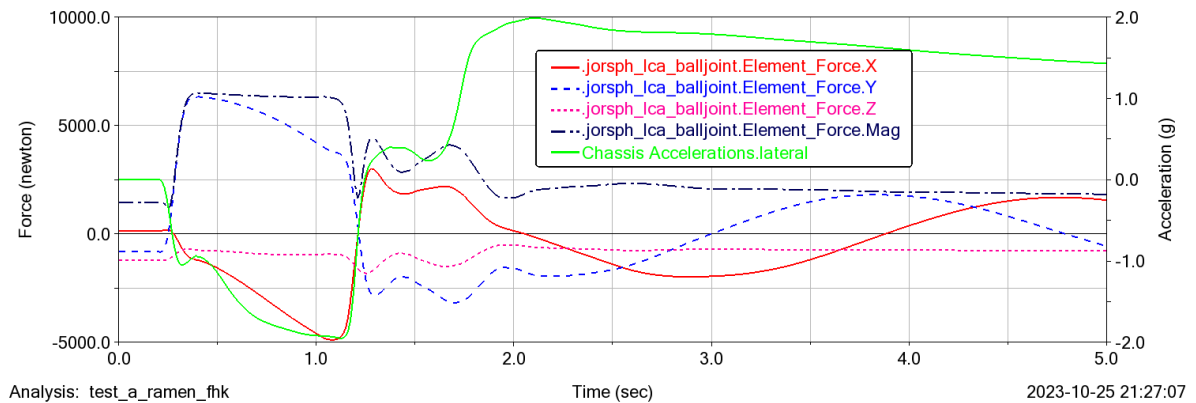
Obrázek 26: Grafické znázornění závislosti působících sil na čase (horní rameno, uložení u těhlice)

Obrázek č.26 znázorňuje průběh působících sil horního ramene v bodě uložení těhlice vozidla. Červená barva znázorňuje boční zrychlení, které při průjezdu zatáčkou dosahuje gravitačního přetížení 2G. Světle modrá křivka znázorňuje průběh působících sil v ose X, růžová křivka síly působící v ose Y a tmavě modrá křivka síly působící v ose Z. Zelená křivka je pak jejich výslednicí, z níž je zřejmé, že síly působící na horní rameno dosahují 2000 N.

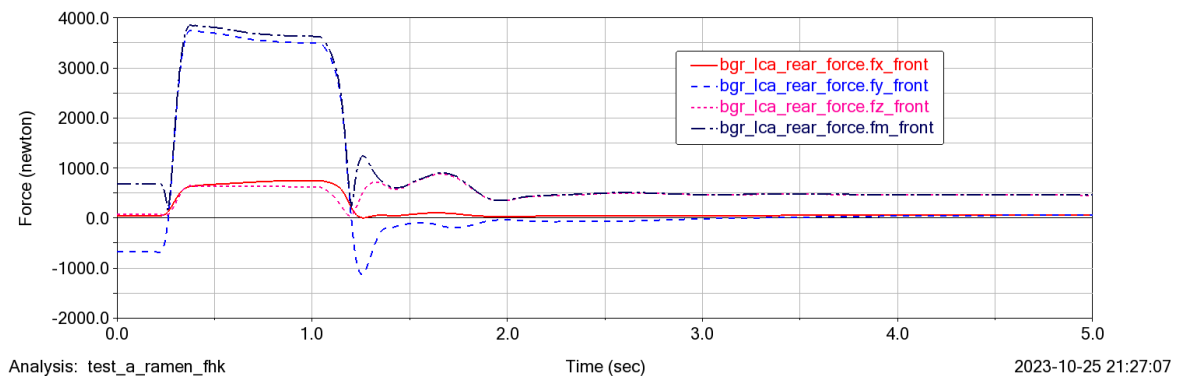


Obrázek 27: Grafické znázornění závislosti působících sil na čase (horní rameno, uložení v bodě rámu)

Na obrázku č.27 je znázorněn průběh působících sil horního ramene v bodě uložení rámu vozidla, přičemž světle modrá barva znázorňuje síly působící v ose X, růžová barva znázorňuje síly působící v ose Y a tmavě modrá barva síly v ose Z. Červenou barvou je znázorněna výslednice výše zmiňovaných sil, přičemž působící síly v tomto bodě dosahují 1250 N. Obdobně jako na předchozích obrázcích jsou znázorněny působící síly na spodní rameno v obou bodech uložení, viz obrázky 28 a 29.

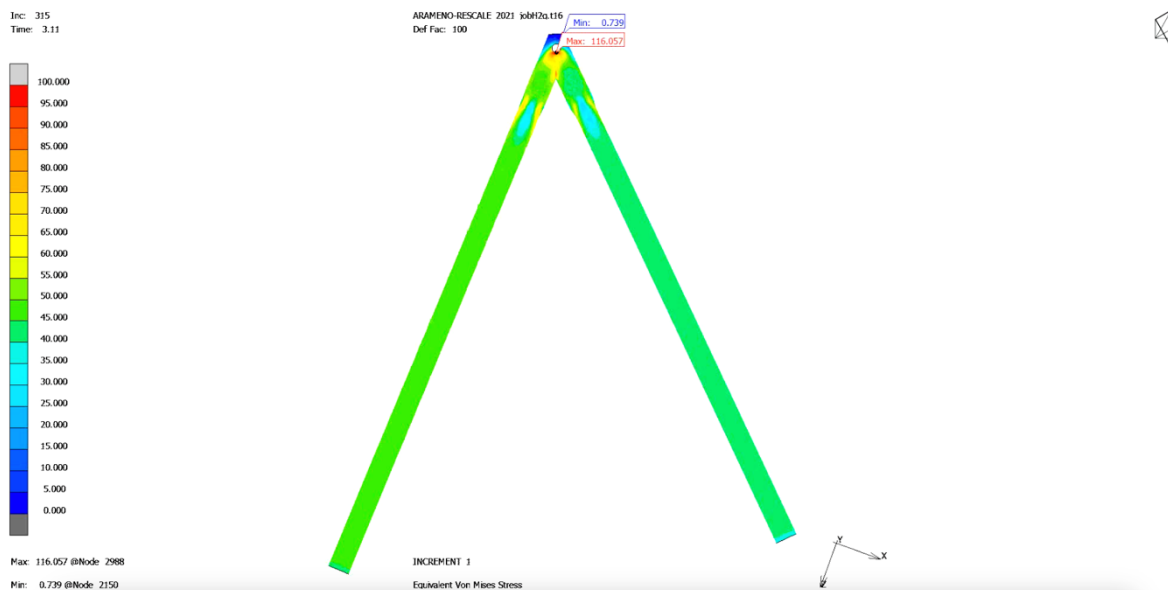


Obrázek 28: Grafické znázornění závislosti působících sil na čase (spodní rameno, uložení u těhlice)

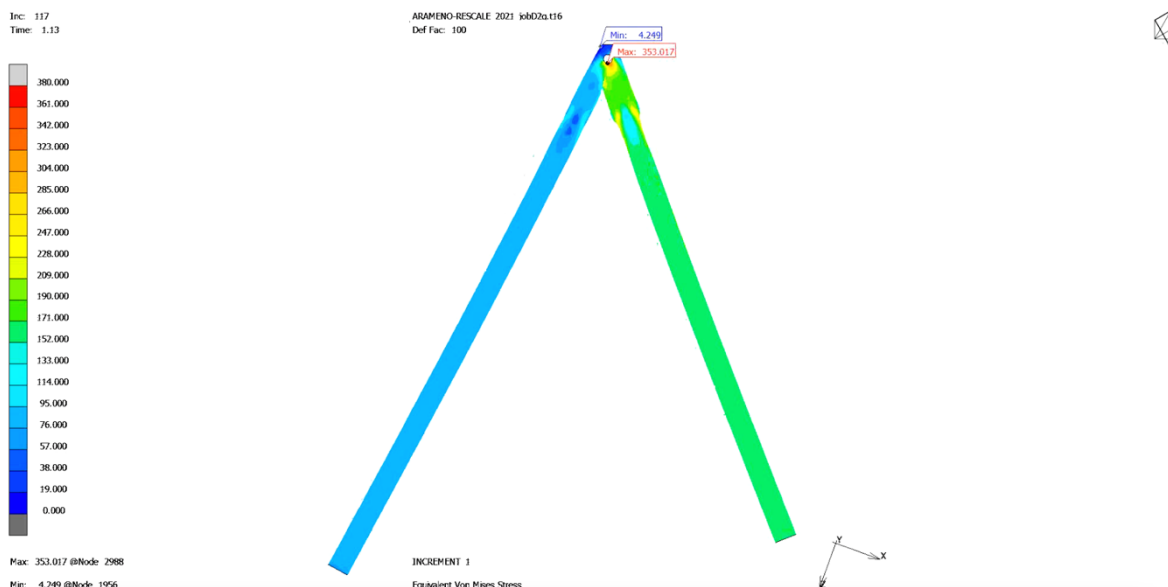


Obrázek 29: Grafické znázornění závislosti působících sil na čase (spodní rameno, uložení v bodě rámu)

Následně byla provedena MKP simulace, analyzující napětí a deformaci horního a spodního předního ramene při průjezdu zatáčkou „fishhook“ v reálném čase. Tento typ simulace rozdělí strukturu materiálu na jednotlivé elementy, které jsou matematicky popsány a následně jsou řešeny rovnice pro každý element tak, aby bylo dosaženo celkového chování obou ramen při průjezdu. Výstup MKP simulace je graficky znázorněn na následujících obrázcích 30 a 31.



Obrázek 30: Grafické znázornění maximálního napětí [MPa] a deformace horního předního ramene



Obrázek 31: Grafické znázornění maximálního napětí [MPa] a deformace spodního předního ramene

Na obrázcích 30 a 31 je graficky znázorněné maximální dosažené napětí působící na přední horní a spodní lichoběžníkové rameno při průjezdu zatáčkou, získané z MKP simulace. Zanedbáme-li body uložení ramen, kde působí největší zatížení z důvodu přenosu sil působících od vozovky, je zřejmé že nejvyššího dosaženého napětí je u spodního předního ramene, kdy je dosaženo maximálního napětí 195 MPa. U horního předního ramene je dosaženo maximálního napětí 55 MPa. Pro tuto práci budou tyto hodnoty uvažovány jako okrajové podmínky pro následné porovnávání s výsledky mechanických zkoušek prováděných na katedře materiálového inženýrství (KMI).

## 6.4. Mechanické zkoušky

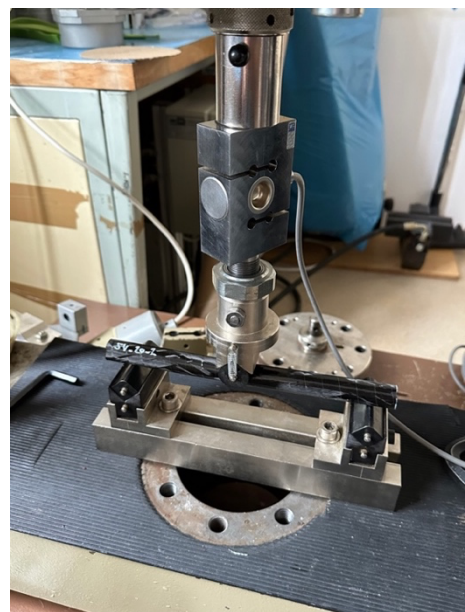
Pro ověření mechanických vlastností a výběr optimální varianty výrobních parametrů kompozitních trubic byly provedeny zkoušky mechanických vlastností se zaměřením na tříosé ohybové namáhání a na tlakové namáhání ve směru průřezu kompozitní trubice. Okrajové podmínky byly definovány simulacemi v programu ADAMS, nicméně testování mechanického namáhání přímo neodpovídá charakteru zatěžování v reálném použití. Z tohoto důvodu bylo testování doplněno o měření komerční varianty trubic, která je v rámci projektu Formula Student uplatňována konkurenčními týmy právě na konstrukci zavěšení podvozku.

### 6.4.1. Tříosé ohybové namáhání

Tříosé ohybové namáhání bylo v tomto případě zvoleno pro simulaci působení laterálních sil při průjezdu zatáčkou. Pro zjištění maximální ohybového napětí u zhotovených vzorků byla provedena zkouška tříosého ohybového namáhání s konstantní rychlostí posuvu. Cílem tohoto měření bylo porovnat dosažení maximálního napětí při ohybovém namáhání pro vzorky různých vstupních výrobních parametrů, na jehož základě budou uvažovány nejvhodnější výrobní parametry finálního výrobku. Stanovení mechanických vlastností bylo prováděno na trhacím zařízení Tiratest 2300 disponující snímací hlavou o rozsahu 10kN. Měření bylo z důvodu absence normovaného měření kompozitních materiálů kruhového průřezu provedeno podle normy ČSN EN ISO 178, která je určena primárně pro stanovení ohybových vlastností plastů.



Obrázek 32: Trhací zařízení Tiratest 2300 (ohyb)



Obrázek 33: Uložení testovaného vzorku (ohyb)

Pro měření mechanických zkoušek byly zhotoveny vzorky s různými charakteristikami návinu, přičemž byly měněny následující parametry (faktory): úhel návinu, počet vrstev, typ použité pryskyřice. Každý z faktorů je definován dvěma úrovněmi dle tabulky 1 na straně 36. Veškeré měřené vzorky byly zkrácené na délku 250 mm a disponovaly vnitřním průřezem 16 mm. Vnější průřez byl u vzorků s 5 vrstvami návinu roven 19 mm a u vzorků se 7 vrstvami návinu 20 mm.



Obrázek 34: Vzorky různých úhlů návinu (vlevo 20°, vpravo 30°)

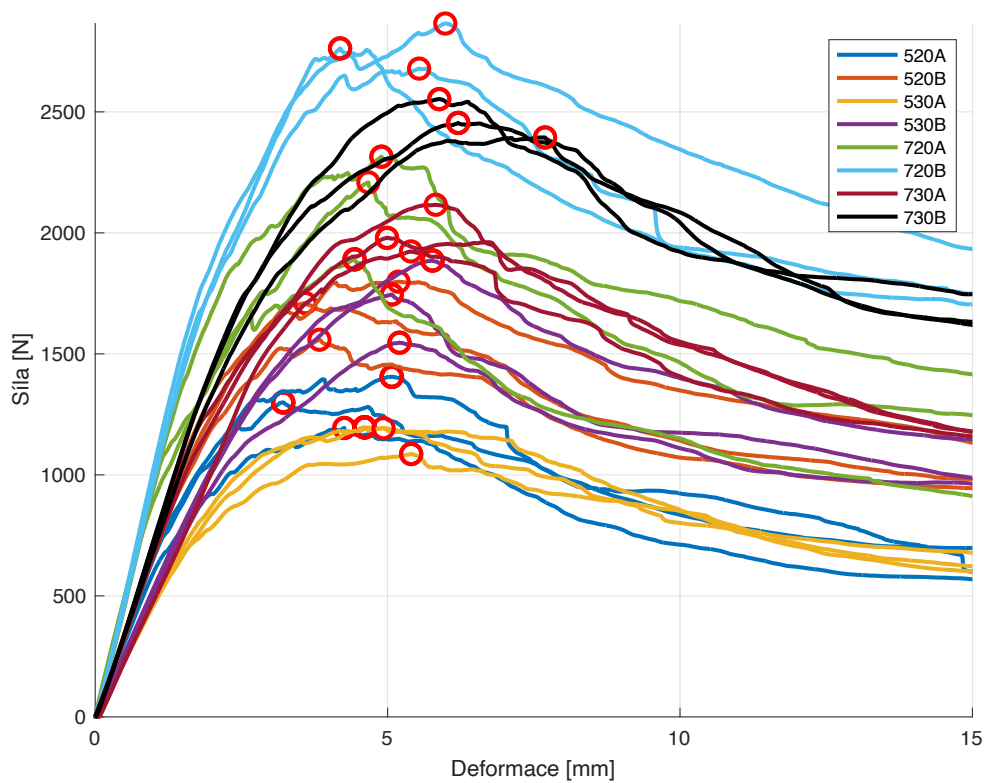
Měřené vzorky byly následně umístěny do nosné podložky se dvěma podpěrami, jejichž rozteč byla stanovena na 210 mm (viz obrázek 33). Z důvodu finanční a časové náročnosti byly dle normovaných parametrů zhotoveny 3 vzorky kompozitních trubíc pro možnost opakovaného měření. Ohybová zkouška probíhala při konstantní rychlosti 2mm/min a standardních laboratorních podmínkách (teplota 23°C, relativní vlhkost vzduchu 42%, atmosférický tlak 1007,4hPa). Maximální posun ohybového trnu byl stanoven na 15 mm.

### Výsledky měření tříosého ohybového namáhání

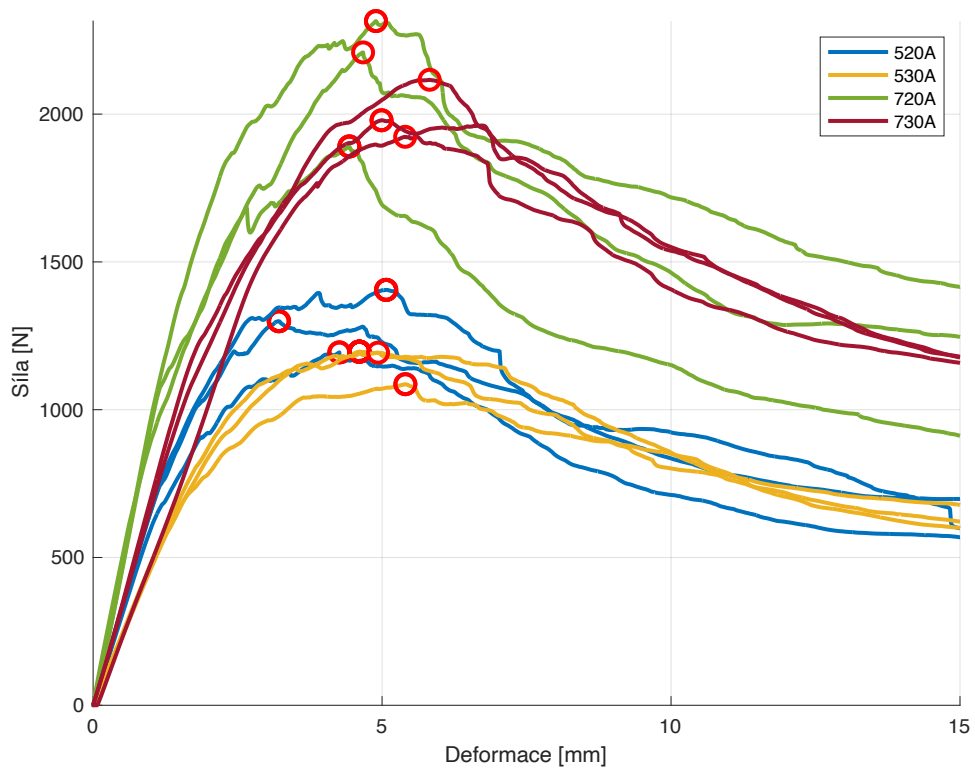
V níže uvedené tabulce 2 jsou znázorněny výsledky měření jednotlivých vzorků, přičemž je zde uvedena maximální působící síla, maximální průhyb, modul pružnosti, maximální dosažené napětí do prasknutí a způsobení trvalé deformace materiálu. Z tabulky je zjevné, že nejvyššího modulu pružnosti (43,47 GPa) dosahuje vzorek s návinem 20 stupňů a 5 vrstvami, u něhož byla použita pryskyřice typu B. Nejvyššího maximálního napětí (324,55 MPa) dosahuje vzorek s návinem 20 stupňů o 7 vrstvách vlákenné výztuže a použitou pryskyřicí typu B. Vzorky těchto parametrů se tak na první pohled jeví jako optimální variantou z hlediska ohybového namáhání. Grafické znázornění průběhu zkoušky všech 24 měřených vzorků je uvedeno na obrázku 35, kde je zvýrazněná mez pevnosti jednotlivých vzorků. Z grafu lze pozorovat vliv použité polymerní matrice, přičemž zhotovené vzorky disponující matricí typu B dosahují jednoznačně vyšších hodnot z hlediska ohybového namáhání.

Tabulka 2: Naměřené hodnoty ohybové zkoušky

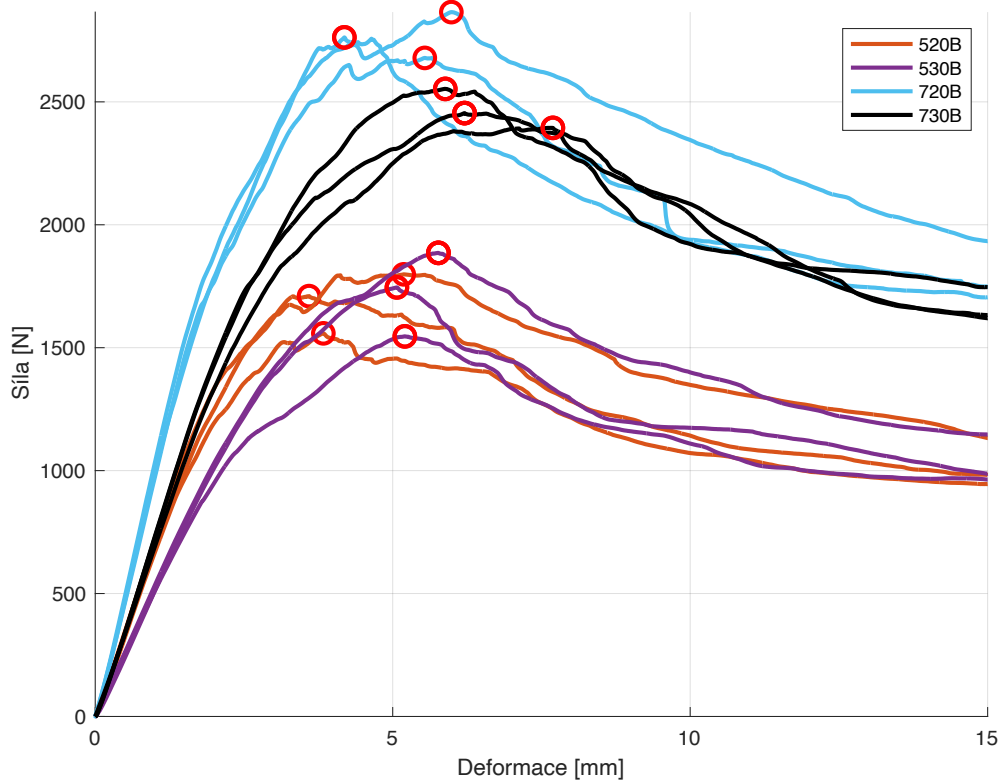
Zkouška	Parametry vzorků			Fmax	Smax	Ef	ofmax
	A	B	C	[N]	[mm]	[GPa]	[MPa]
1	5	20	A	1299,48	3,21	39,92	203,91
2				1405,36	5,07	39,87	220,52
3				1193,88	4,26	36,31	187,34
4	7	20	A	1890,59	4,43	37,26	214,16
5				2314,87	4,89	40,42	262,22
6				2208,78	4,67	39,38	250,20
7	5	30	A	1196,57	4,60	28,01	187,76
8				1192,96	4,93	29,14	187,19
9				1086,34	5,40	28,79	170,46
10	7	30	A	1923,27	5,40	19,96	217,86
11				1979,26	4,99	29,19	224,21
12				2116,24	5,82	27,81	239,72
13	5	20	B	1709,84	3,59	41,38	268,30
14				1798,40	5,19	43,47	282,19
15				1558,40	3,83	40,42	244,53
16	7	20	B	2678,77	5,54	40,98	303,44
17				2865,11	5,99	42,86	324,55
18				2762,29	4,19	40,40	312,91
19	5	30	B	1546,16	5,20	31,17	242,61
20				1745,38	5,07	30,99	273,87
21				1885,79	5,77	32,34	295,90
22	7	30	B	2454,31	6,21	30,43	278,02
23				2394,24	7,69	28,69	271,21
24				2552,76	5,88	30,24	289,17
25	X	10	C	1284,42	6,46	31,61	179,71
26				1407,45	6,07	34,65	196,92
27				1054,17	2,30	35,32	147,50



Obrázek 35: Grafické znázornění průběhu ohybové zkoušky



Obrázek 36: Grafické znázornění průběhu ohybové zkoušky (pryskyřice A)



Obrázek 37: Grafické znázornění průběhu ohybové zkoušky (pryskyřice B)

### Vyhodnocení plánovaného experimentu 2<sup>3</sup> z hlediska ohybového namáhání

Tabulka 3 znázorňuje vstupní výrobní parametry (faktory) testovaných vzorků, které jsou předmětem pozorování plánovaného experimentu designu 2<sup>3</sup>, jehož cílem je vypořádat, zda některý z parametrů, či jejich vzájemná kombinace má významný vliv na výsledné mechanické vlastnosti. Každý z faktorů je testován v rámci třech replikací, přičemž výstupním pozorovaným parametrem je maximální dosažené napětí testovaných vzorků, které lze porovnat s hodnotami dosaženého napětí působící na ramena získaných ze simulace v programu ADAMS (viz kapitola 6.3).

Tabulka 3: Hodnoty dosaženého maximálního napětí v ohybu znázorněny v matici designu 2<sup>3</sup>

Run	Faktor			σ <sub>max</sub> [MPa]		
	A	B	C	Replikace 1	Replikace2	Replikace3
1	5	20	A	203,91	220,52	187,34
2	7	20	A	214,16	262,22	250,20
3	5	30	A	187,76	187,19	170,46
4	7	30	A	217,86	224,21	239,72
5	5	20	B	268,30	282,19	244,53
6	7	20	B	303,44	324,55	312,91
7	5	30	B	242,61	273,87	295,90
8	7	30	B	278,02	271,21	289,17

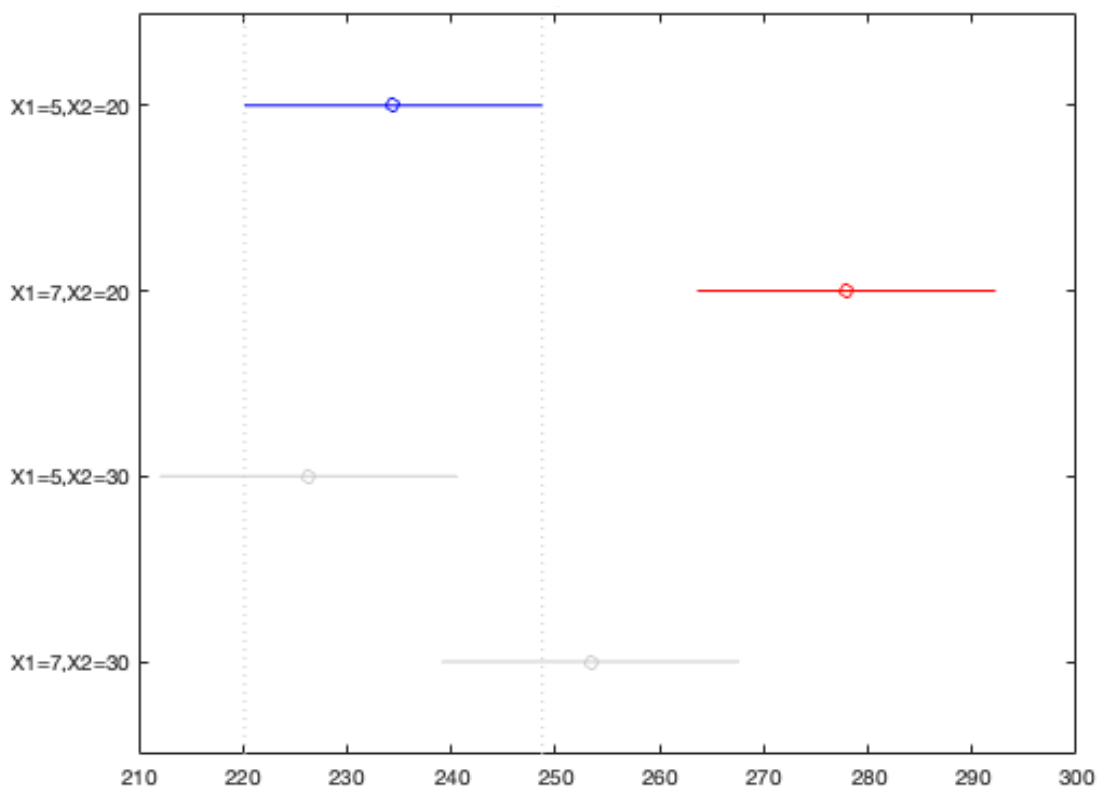
Pro statistické vyhodnocení dat byla využita analýza statistickým nástrojem ANOVA, který charakterizuje statisticky významné rozdíly mezi skupinovými průměry v experimentálním designu. Testuje se hypotéza H<sub>0</sub>, kdy jsou rozdíly výrobních parametrů statisticky nevýznamné na dosažené mechanické vlastnosti vůči alternativní hypotéze H<sub>1</sub>, která zastává statistický rozdíl výrobních vstupních parametrů na dosažené mechanické vlastnosti z hlediska ohybového namáhání. Pro posouzení významnosti je sledována P-hodnota, přičemž hodnoty vyšší než 0,05 značí statisticky nevýznamný vliv faktoru. Tabulka 4 znázorňuje vyhodnocení nástroje ANOVA a poskytuje údaje o součtu čtverců, stupních volnosti, průměru čtverců, F-hodnoty a P-hodnoty. F-hodnota slouží k testování nulové hypotézy, zda jsou všechny skupinové průměry shodné. P-hodnota je hlavním pozorovaným parametrem, který slouží k posouzení statistické významnosti. V posledním sloupci tabulky je dopočítán procentuální příspěvek každého členu modelu ve vztahu k celkovému součtu čtverců. Vyhodnocení bylo provedeno na hladině významnosti  $\alpha = 0,05$ .



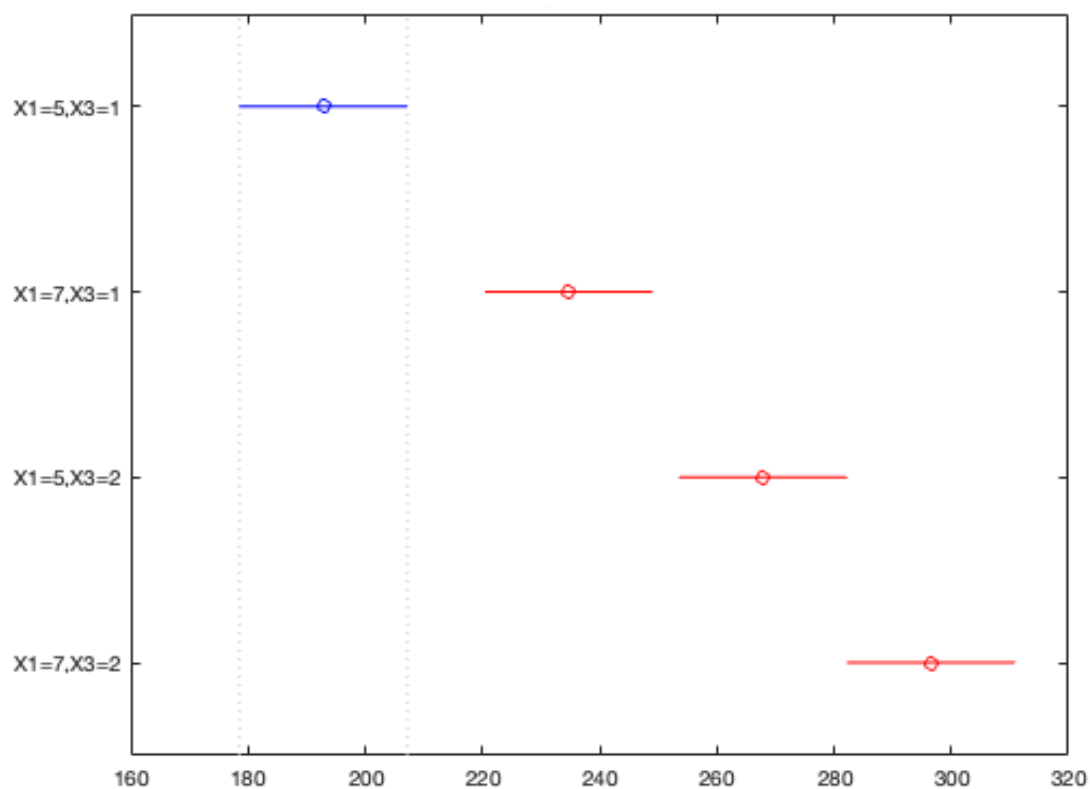
Tabulka 4: Statistické vyhodnocení nástrojem ANOVA pro ohybové namáhání všech faktorů

Source	Sum. Sq.	d.f.	Mean Sq.	F	P-value	%
A	7462,1	1	7462,1	24,90	0,0001	17,2
B	1603,8	1	1603,8	5,35	0,0343	3,7
C	28088,5	1	28088,5	93,74	0,0000	64,6
A:B	403,4	1	403,4	1,35	0,2630	0,9
A:C	261,3	1	261,3	0,87	0,3643	0,6
B:C	28,4	1	28,4	0,09	0,7621	0,1
A:B:C	834,6	1	834,6	2,79	0,1146	1,9
Error	4794,5	16	299,7			11,0
Total	43476,4	23				100,0

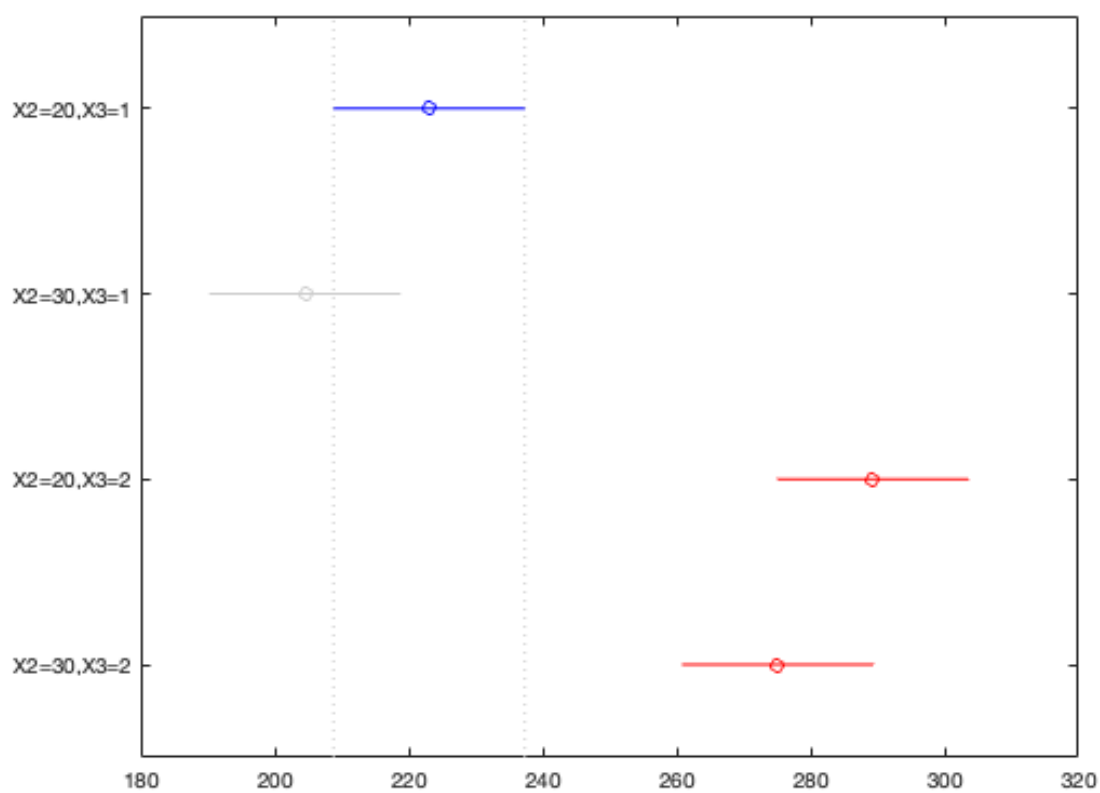
Z výsledků jednotlivých faktorů a jejich vzájemných interakcí uvedených v tabulce 4 lze posoudit značný statisticky významný vliv faktoru A a C, jejichž procentuální příspěvek tvoří 17,2% v případě faktoru A a 64,6% v případě faktoru C. Nízký procentuální příspěvek k celkové variabilitě vykazuje také faktor B, jehož hodnota je rovna 3,7%, ale lze ho také považovat za statisticky významný. Na následujících obrázcích 38 – 40 jsou graficky znázorněny interakce faktorů AB, AC a BC z hlediska ohybového namáhání.



Obrázek 38: Grafické znázornění statistické významnosti interakce faktorů A a B (v ohybu)



Obrázek 39: Grafické znázornění statistické významnosti interakce faktorů A a C (v ohybu)



Obrázek 40: Grafické znázornění statistické významnosti interakce faktorů B a C (v ohybu)

Ačkoliv z vyhodnocení v tabulce 4 nelze potvrdit statisticky významný vliv u žádné z interakcí faktorů, z výše uvedených obrázků lze identifikovat vzájemné překrytí pouze u intervalů interakcí AB (X1 a X2) a BC (X2 a X3), které tedy lze považovat za statisticky nevýznamné. Nicméně v případě interakce AC (X1 a X3) uvedených na obrázku 39 se jednotlivé intervaly nepřekrývají a lze tedy usuzovat, že jejich vliv může být statisticky významný. Proto bylo za pomoci dvou výběrové ANOVY provedeno numerické ověření procentuálního příspěvku vzájemných interakcí statisticky významných faktorů A a C. Pro toto vyhodnocení byl odebrán statisticky méně významný faktor B. Vyhodnocení statistickým nástrojem ANOVA je uveden v tabulce 5.

Tabulka 5: Statistické vyhodnocení nástrojem ANOVA pro ohybové namáhání pouze pro faktory A a C

Source	Sum. Sq.	d.f.	Mean Sq.	F	P-value	%
A	2204,2	1	2204,17	5,62	0,0307	0,7
C	282645	3	94215,00	240,01	0,0000	94,7
A:C	7193,5	3	2397,83	6,11	0,0057	2,4
Error	6280,7	16	392,54			2,1
Total	298323,3	23				100,0

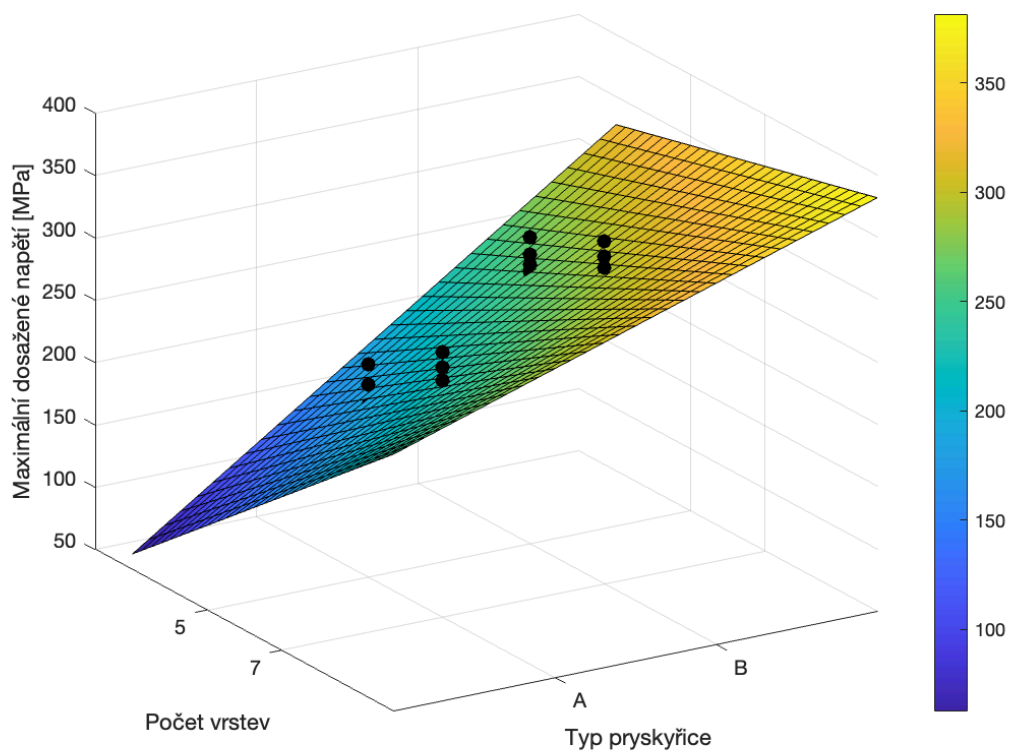
Z tabulky 5 je zjevné, že mezi interakcemi existuje nízký statisticky významný vliv, přičemž jeho procentuální příspěvek k celkové variabilitě je roven 2,4%. Z charakteru výsledků lze tedy považovat za významný faktor A (počet vrstev) a C (typ použité pryskyřice), a také jejich vzájemnou interakci.

Regresní model pro předpověď dosažených mechanických vlastností je definován vztahem (4):

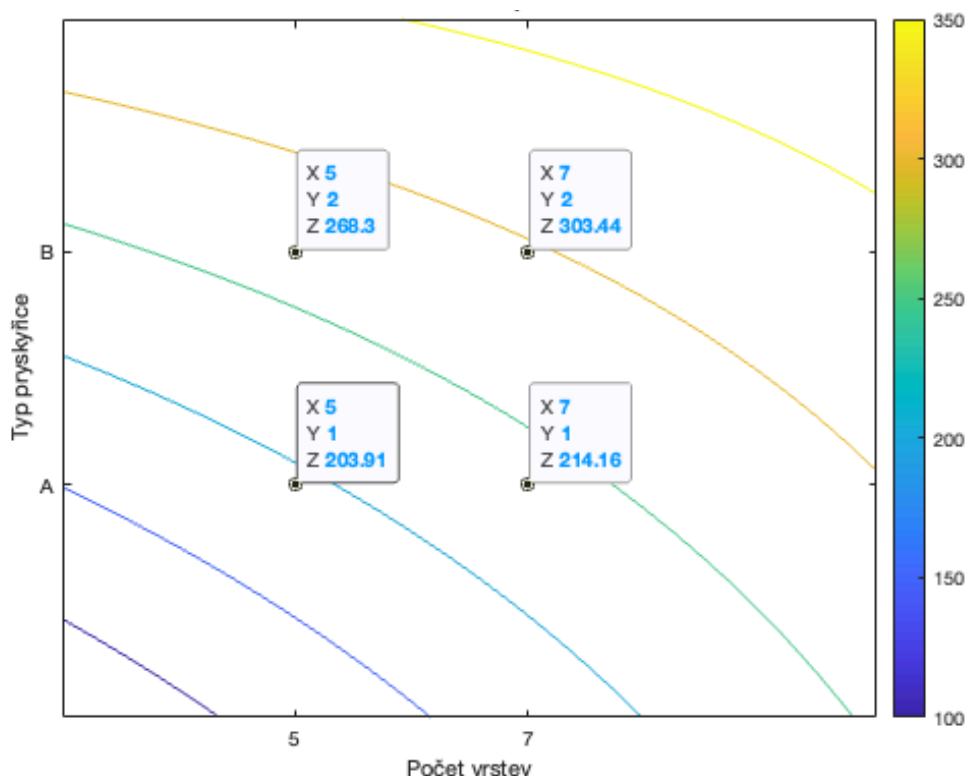
$$\hat{y} = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 x_1 + \hat{\beta}_3 x_3 + \hat{\beta}_{13} x_1 x_3 \quad (4)$$

$$\hat{y} = -19,8150 + 27,5317A + 108,0158C - 6,5992AC \quad (5)$$

kde zakódované proměnné  $x_1$  a  $x_3$  představují sledované faktory A a C. Obrázky 41 a 42 prezentují plošné znázornění výstupu a vrstevnicový graf pro výsledné mechanické vlastnosti v ohybu testovaných vzorků, získané z regresního modelu. Díky pozitivní interakci faktorů A a C můžeme pozorovat zakřivené křivky v případě vrstevnicového grafu (obrázek 42) a mírně zakřivenou rovinu v případě plošného znázornění. Pro dosažení příznivějších mechanických vlastností kompozitního materiálu z hlediska ohybového namáhání je tedy vhodné použít pryskyřici typu B v kombinaci se 7 navíjenými vrstvami. Úhel navíjeného rovingu nepředstavuje významný vliv na dosažené mechanické vlastnosti.



Obrázek 41: Plošné znázornění výstupu (pro ohyb)



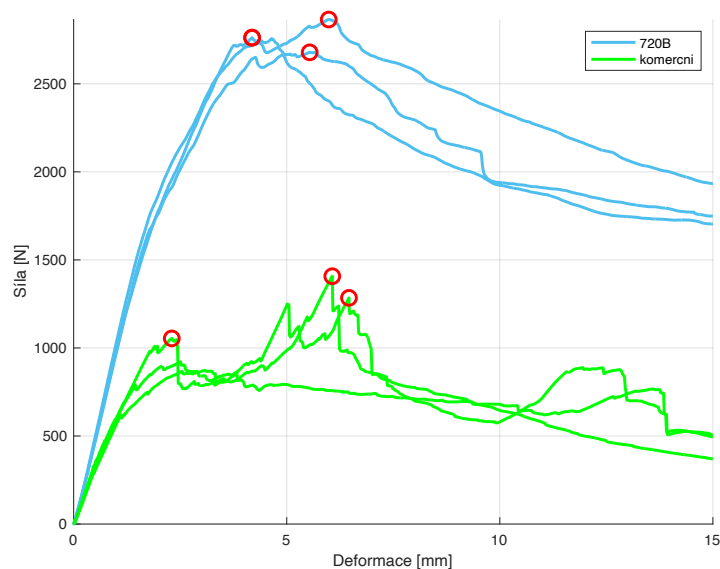
Obrázek 42: Vrstevnicový graf výstupu (pro ohyb)

### Porovnání s komerční variantou

V rámci měření tříosého ohybového namáhání bylo provedeno měření komerční varianty kompozitních trubek pro porovnání mechanických vlastností s vyráběnými trubkami, které jsou předmětem experimentu této práce. Zmíněné komerční kompozitní trubky jsou v praxi často aplikovány v konkurenčních týmech projektu Formula Student právě na konstrukci zavěšení monopostů. Měřená komerční varianta je zhotovena technologickým procesem pultruze, přičemž disponuje obdobným průřezem jako 5 vrstvé vyráběné trubky v tomto experimentu. Výsledky měření komerční varianty jsou znázorněny v tabulce 2 v posledních třech řádcích s parametry vzorku označených: X; 10; C.

- Z naměřených hodnot lze pozorovat dosažení vyšších mechanických vlastností z hlediska ohybového namáhání u většiny variant navržených a zhotovených kompozitních trubek v rámci této práce.
- Zajímavým faktem je také deformace testovaných vzorků, přičemž u dvou měření komerčních trubek došlo k deformaci téměř v celém rozsahu a došlo tak ke zborcení profilu i v místech, kde nedocházelo k přímému namáhání. V případě vyráběných kompozitních trubek nastala deformace vždy pouze v bodě dotyku ohybového trnu.

Na následujícím obrázku 43 je pro názornost vyobrazena pracovní křivka vybrané varianty optimálních výrobních parametrů společně s výsledky dosaženými u komerčního produktu, která je definována světle zelenou barvou. Na obrázku 44 je znázorněna sada všech testovaných vzorků z hlediska tříosého ohybového namáhání.



Obrázek 43: Grafické znázornění průběhu ohybové zkoušky včetně komerční varianty



Obrázek 44: Sada vzorků testovaných tříosým ohybovým namáháním (včetně komerční varianty)

### 6.4.2. Axiální tlakové namáhání

Další zkouškou pro ověření mechanických vlastností byla zvolena tlaková zkouška ve směru osy zhotovených vzorků, která simuluje namáhání při zrychlení vozu. Cílem tohoto měření bylo porovnat dosažení maximálního napětí při tlakovém namáhání pro vzorky různých vstupních výrobních parametrů, na jehož základě budou uvažovány nejvhodnější výrobní parametry finálního výrobku. Laboratorní měření probíhalo na zařízení Tiratest 2300 disponující snímací hlavou o rozsahu 100kN. Z důvodu absence normovaného měření kompozitních materiálů kruhového průřezu byly vstupní podmínky měření stanoveny podle normy ASTM D1598, která je určena primárně pro stanovení tlakové odolnosti plastových trubek.



Obrázek 45: Trhací zařízení Tiratest 2300 (tlak)



Obrázek 46: Uložení testovaného vzorku (tlak)

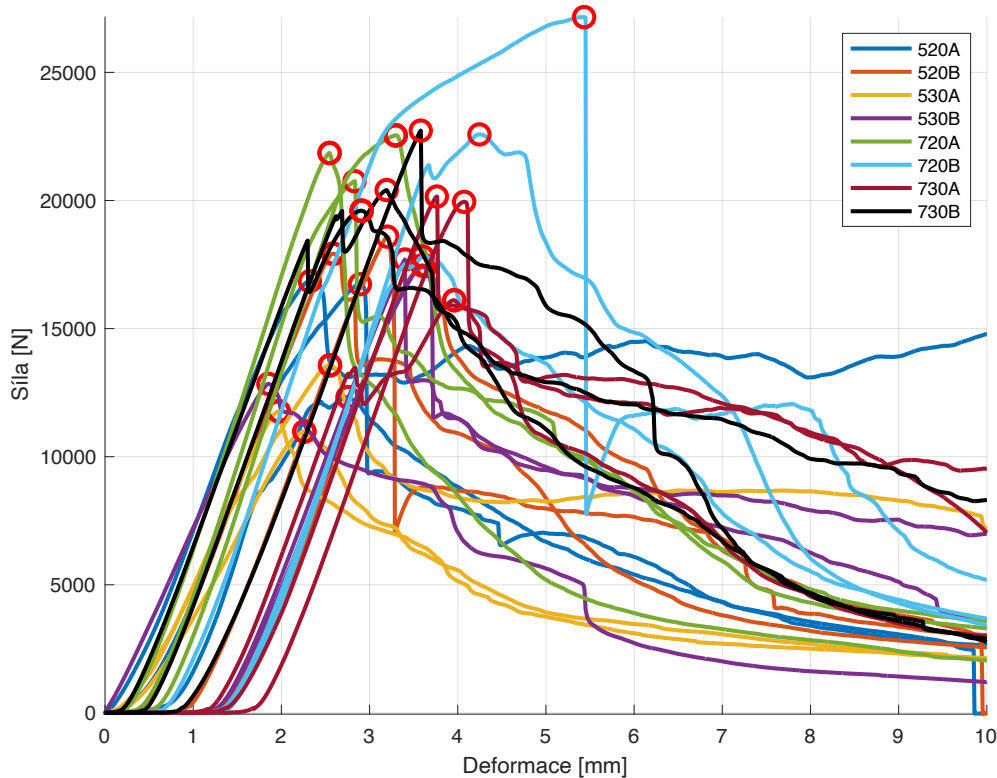
Pro měření axiálního tlakového namáhání byla připravena sada vzorků s různými charakteristikami návinu obdobně jako u zkoušky tříosého ohybového namáhání. Jednotlivé charakteristiky jsou uvedeny v tabulce 1 na straně 36. Zhotovené vzorky byly zkrácené na délku 60 mm, přičemž disponovaly vnitřním průřezem 16 mm. Vnější průřez byl opět rozdílný u vzorků s 5 vrstvami návinu ( $D = 19$  mm) a u vzorků se 7 vrstvami návinu ( $D = 20$  mm). Plánovaný experiment byl opět charakterizován třemi replikacemi, proto byly zhotoveny 3 vzorky ke každé z variant kompozitních trubíc. Dohromady tedy bylo připraveno 24 vzorků, které byly ještě doplněny o 3 vzorky komerční varianty pro možnost následného porovnání. Axiální tlaková zkouška probíhala při konstantní rychlosti 2mm/min a standardních laboratorních podmínkách (teplota 22,5°C, relativní vlhkost vzduchu 45%, atmosférický tlak 1003,7hPa). Maximální posun ohybového trnu byl stanoven na 10 mm.

### **Výsledky měření axiálního tlakového namáhání**

V níže uvedené tabulce 6 jsou znázorněny výsledky měření každého ze vzorků, přičemž je zde uvedena maximální působící síla, dosažená deformace do prasknutí, modul pružnosti, maximální dosažené napětí do prasknutí a způsobení trvalé deformace materiálu. Z tabulky je zjevné, že nejvyššího modulu pružnosti (5372,51 MPa) dosahuje vzorek s návinem 20 stupňů a 5 vrstvami, u něhož byla použita pryskyřice typu A. Nejvyššího maximálního napětí (240,13 MPa) dosahuje vzorek s návinem 20 stupňů o 7 vrstvách vlákenné výztuže a použitou pryskyřicí typu B. Z hlediska dosaženého maximálního napětí a pevnosti je možné předpokládat, že se jedná o optimální variantu vstupních výrobních parametrů z hlediska axiálního tlakového namáhání. Nicméně rozptyl dosažených napětí u této zkoušky není tak znatelný jako v případě zkoušky ohybového namáhání. Grafické znázornění průběhu zkoušky všech 24 měřených vzorků je uvedeno na obrázku 47, kde je zvýrazněná mez pevnosti jednotlivých vzorků. Z grafu lze pozorovat pozitivní vliv použité polymerní matrice, přičemž zhotovené vzorky disponující polymerní matricí typu B dosahují jednoznačně vyšších hodnot z hlediska tlakového namáhání. Pozitivní vliv je viditelný také na úhlu navíjené výztuže.

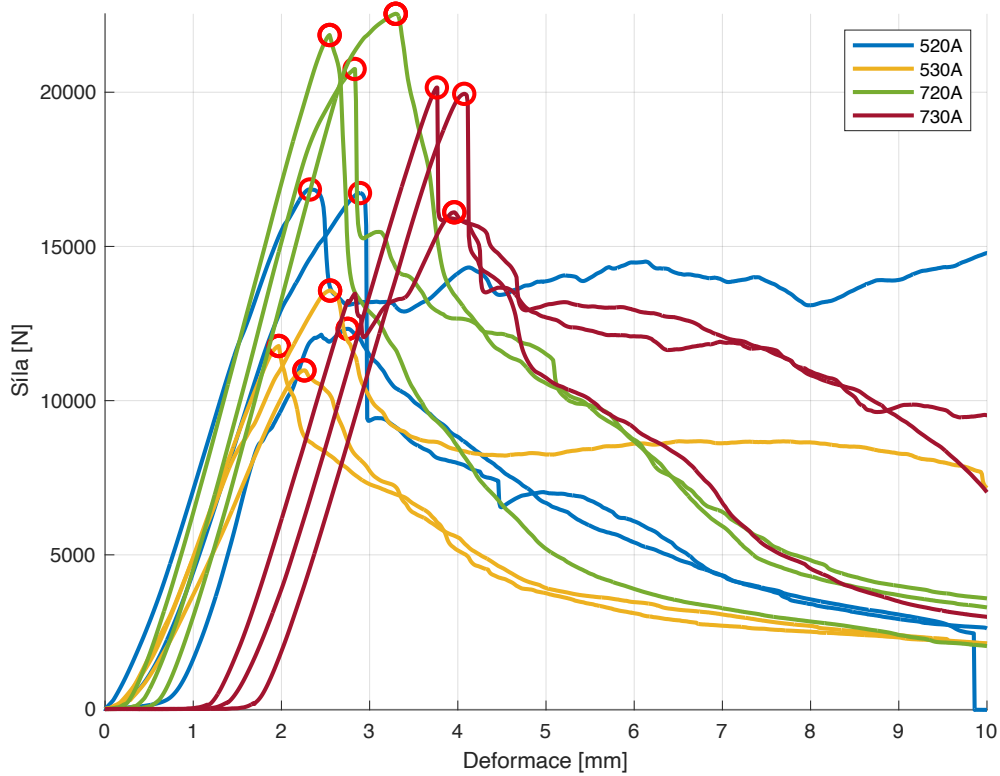
Tabulka 6: Naměřené hodnoty tlakové zkoušky

Zkouška	Parametry vzorků			Fmax	Smax	Ef	σfmax
	A	B	C	[N]	[mm]	[MPa]	[MPa]
1	5	20	A	12327,50	2,75	2578,75	149,48
2				16730,60	2,89	3932,66	202,88
3				16846,40	2,32	5372,51	204,28
4	7	20	A	20754,40	2,83	3318,83	183,51
5				22542,60	3,30	2753,62	199,32
6				21855,70	2,55	3816,25	193,25
7	5	30	A	10982,10	2,26	3116,83	133,17
8				11772,40	1,97	3731,09	142,75
9				13568,90	2,55	3515,22	164,54
10	7	30	A	20154,40	3,76	1829,05	178,20
11				16107,00	3,96	1952,27	142,42
12				19947,70	4,07	1549,92	176,38
13	5	20	B	17444,00	3,64	2402,43	211,53
14				17921,00	2,59	4467,92	217,31
15				18590,00	3,20	2980,39	225,42
16	7	20	B	27158,30	5,43	2996,91	240,13
17				22579,00	4,25	2184,90	199,64
18				22987,40	3,60	2076,41	201,15
19	5	30	B	17696,80	3,40	2321,31	214,59
20				17465,30	3,60	2070,28	211,79
21				12842,40	1,85	5192,55	155,73
22	7	30	B	20406,90	3,19	3176,47	180,44
23				22727,30	3,58	2681,88	200,95
24				19601,60	2,91	3942,18	173,32
25	X	10	C	21482,40	3,09	1670,69	226,42
26				20953,40	2,32	3687,99	220,35
27				16337,00	3,99	866,99	187,40

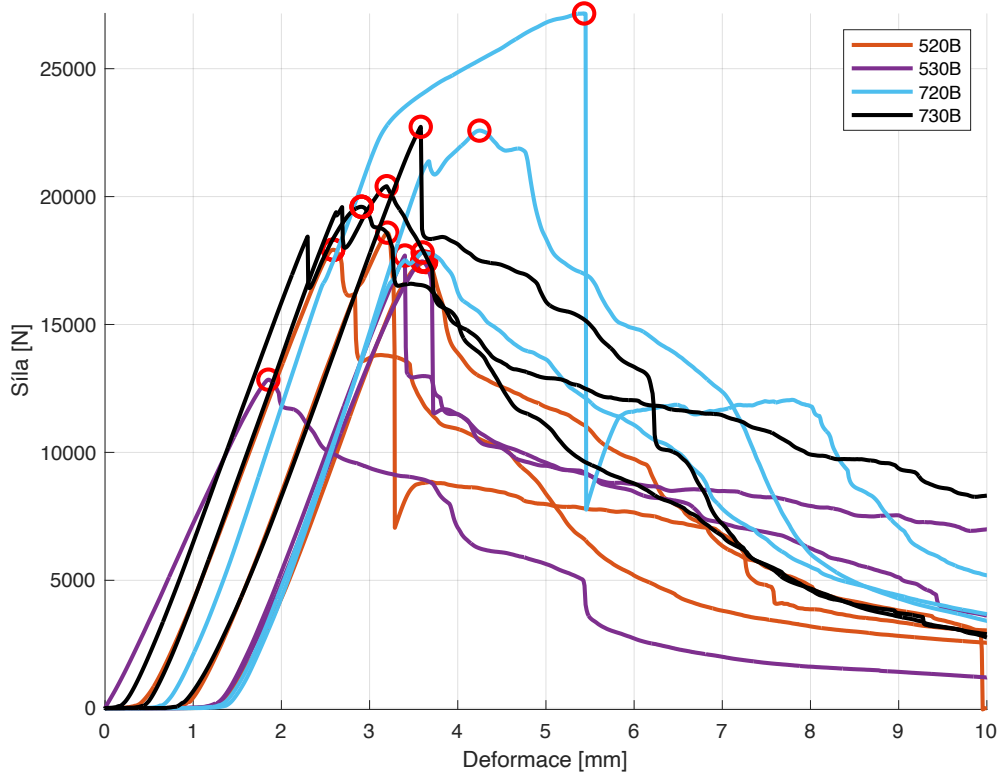


Obrázek 47: Grafické znázornění průběhu axiální tlakové zkoušky





Obrázek 48: Grafické znázornění axiální tlakové zkoušky (pryskyřice A)



Obrázek 49: Grafické znázornění axiální tlakové zkoušky (pryskyřice B)

### Vyhodnocení plánovaného experimentu 2<sup>3</sup> z hlediska axiálního tlakového namáhání

Tabulka 7, stejně jako u zkoušky ohybového namáhání, představuje vstupní výrobní parametry testovaných vzorků, které jsou předmětem pozorování plánovaného experimentu designu 2<sup>3</sup>. Jednotlivé parametry jsou opět sledovány v rámci třech replikací, přičemž sledovaným výstupem je maximální napětí dosažené při axiálním tlakovém namáhání, které je možné porovnat s hodnotami dosaženého napětí působící na ramena získaných ze simulace v programu ADAMS (viz kapitola 6.3).

Tabulka 7: Hodnoty dosaženého maximálního napětí v axiálním tlaku znázorněny v matici designu 2<sup>3</sup>

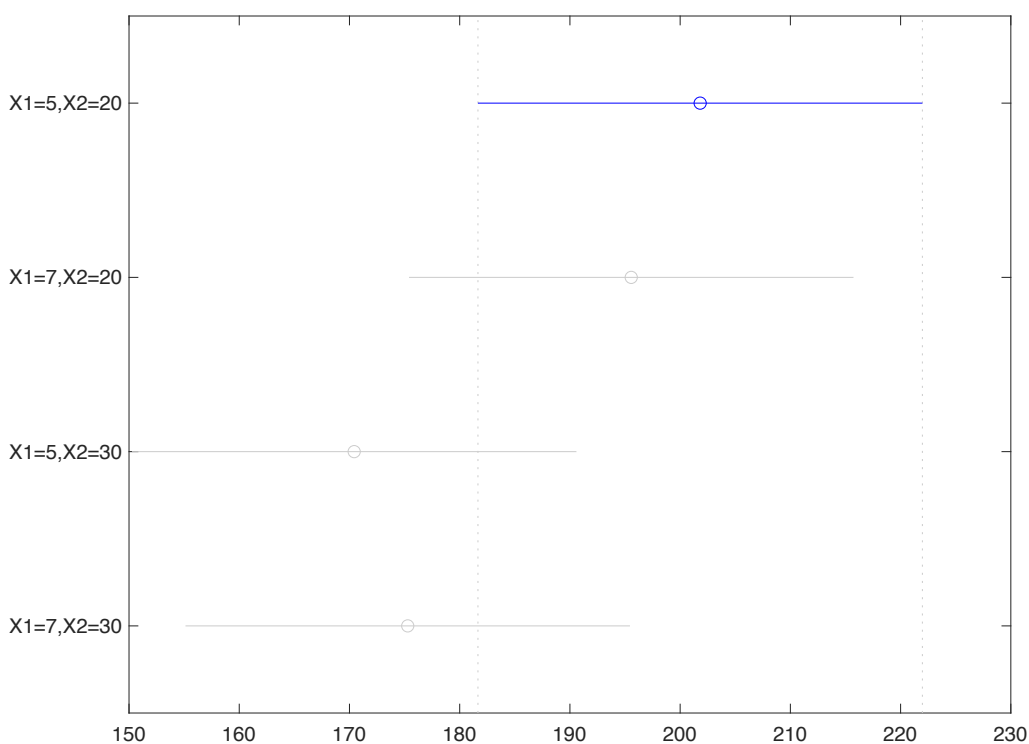
Run	Faktor			σ <sub>fmax</sub> [MPa]		
	A	B	C	Replikace 1	Replikace 2	Replikace 3
1	5	20	A	149,48	202,88	204,28
2	7	20	A	183,51	199,32	193,25
3	5	30	A	133,17	142,75	164,54
4	7	30	A	178,20	142,42	176,38
5	5	20	B	211,53	217,31	225,42
6	7	20	B	240,13	199,64	201,15
7	5	30	B	214,59	211,79	155,73
8	7	30	B	180,44	200,95	173,32

Statistické vyhodnocení dat bylo opět vyhodnoceno pomocí statistického nástroje ANOVA, jejíž výsledek je znázorněn v tabulce 8 uvedené níže. Testuje se zde hypotéza H<sub>0</sub>, kdy jsou rozdíly výrobních parametrů statisticky nevýznamné na dosažené mechanické vlastnosti vůči alternativní hypotéze H<sub>1</sub>, která zastává statistický rozdíl výrobních vstupních parametrů na dosažené mechanické vlastnosti z hlediska axiálního tlakového namáhání. Vyhodnocení bylo provedeno na hladině významnosti  $\alpha = 0,05$ .

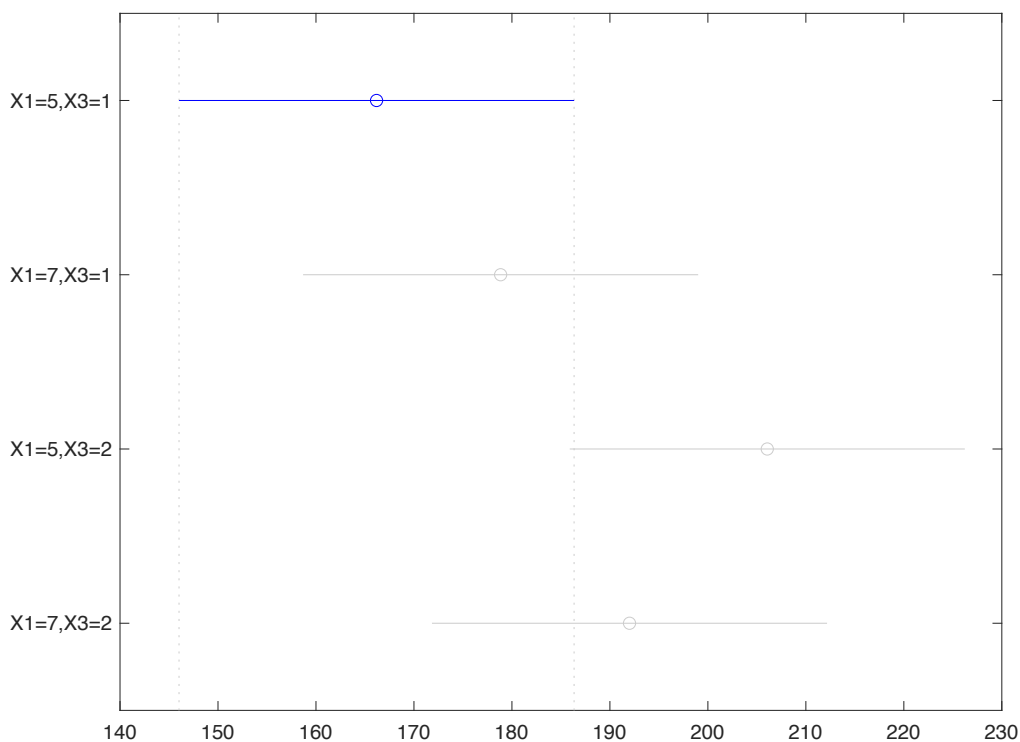
Tabulka 8: Statistické vyhodnocení nástrojem ANOVA pro tlakové namáhání všech faktorů

Source	Sum. Sq.	d.f.	Mean Sq.	F	P-value	%
A	2,9	1	2,9	0,00	0,9450	0,0
B	4004,2	1	4004,2	6,72	0,0196	20,8
C	4218,8	1	4218,8	7,08	0,0171	21,9
A:B	185,1	1	185,1	0,31	0,5850	1,0
A:C	1071,2	1	1071,2	1,80	0,1987	5,6
B:C	270,1	1	270,1	0,45	0,5104	1,4
A:B:C	2,4	1	2,4	0,00	0,9505	0,0
Error	9534,4	16	595,9			49,4
Total	19289,1	23				100,0

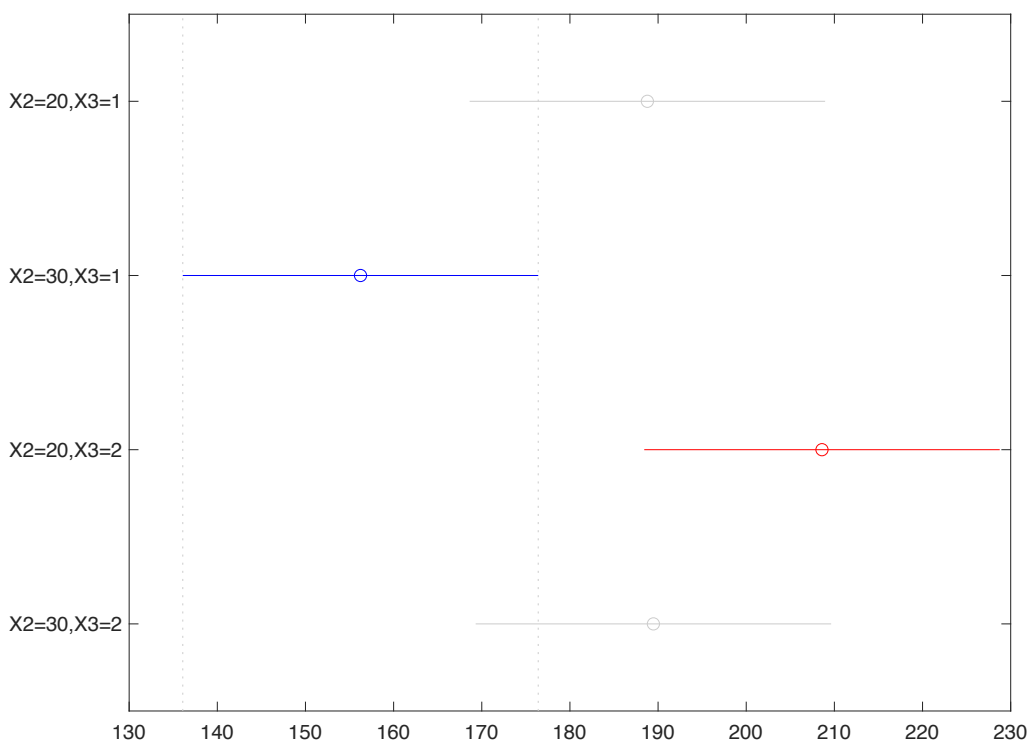
Z výsledků jednotlivých faktorů a jejich vzájemných interakcí uvedených v tabulce 8 lze v případě axiálního tlakového namáhání posoudit statisticky významný vliv faktoru B a C, jejichž procentuální příspěvek k celkové variabilitě tvoří 20,8% v případě faktoru B a 21,9% v případě faktoru C. Faktor A v tomto případě nemá vůbec žádný vliv na dosažené maximální napětí, jeho procentuální příspěvek k celkové variabilitě je roven 0%. Z výsledků nelze evidovat statistickou významnost ani u žádné z interakcí jednotlivých faktorů. Pro vizuální ověření statistické významnosti těchto interakcí je na následujících obrázcích (50 – 52) uvedeno jejich grafické znázornění.



Obrázek 50: Grafické znázornění statistické významnosti interakce faktorů A a B (v tlaku)



Obrázek 51: Grafické znázornění statistické významnosti interakce faktorů A a C (v tlaku)



Obrázek 52: Grafické znázornění statistické významnosti interakce faktorů B a C (v tlaku)

Z výše uvedených obrázků (50 – 52) lze evidovat u interakce faktorů B a C (X2 a X3) dva intervaly, které se vzájemně nepřekrývají a lze tedy usuzovat, že existuje interakce mezi vstupními výrobními parametry, která by pozitivně ovlivnila výsledné mechanické vlastnosti

na dosažené maximální napětí. Pro numerické ověření bylo tedy znovu přistoupeno k vyhodnocení dat statistickým nástrojem ANOVA, tentokrát ale pouze pro statisticky významné faktory B a C a jejich vzájemné interakce, jehož vyhodnocení je uvedeno v níže uvedené tabulce 9.

Tabulka 9: Statistické vyhodnocení nástrojem ANOVA pro ohybové namáhání pouze pro faktory B a C

Source	Sum. Sq.	d.f.	Mean Sq.	F	P-value	%
B	1290,7	1	1290,70	3,65	0,0741	0,4
C	318834,8	3	106278,30	300,65	0,0000	95,8
B:C	6952,3	3	2317,40	6,56	0,0042	2,1
Error	5656	16	353,50			1,7
Total	332733,8	23				100,0

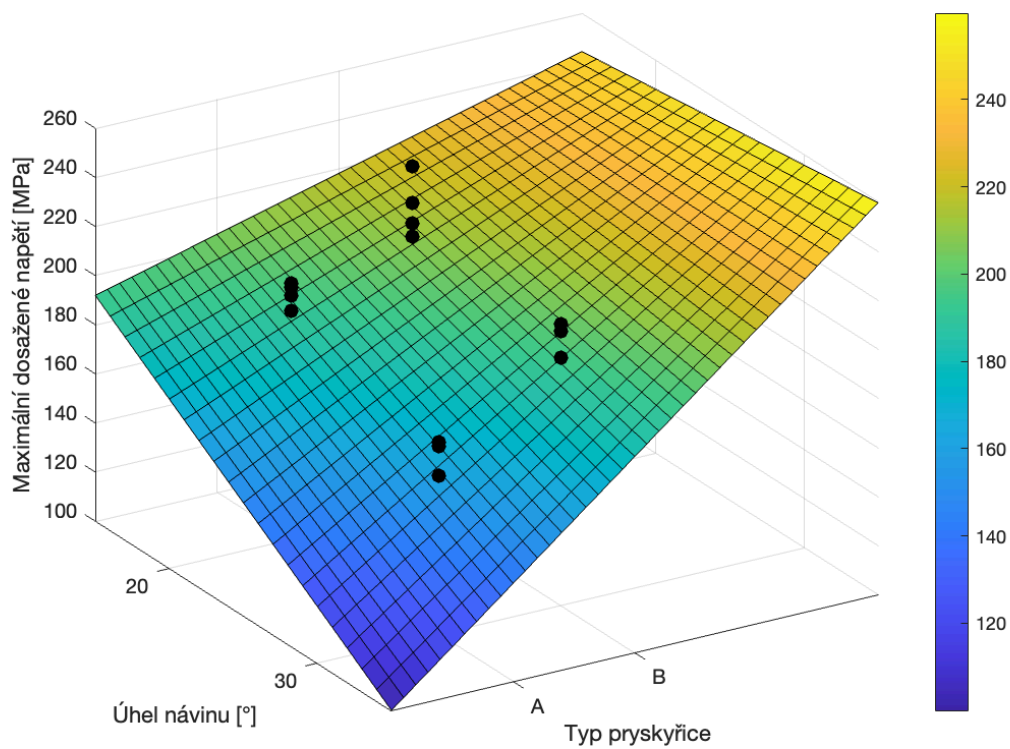
Z tabulky 9 je zjevné, že mezi interakcemi existuje nízký statisticky významný vliv, přičemž jeho procentuální příspěvek k celkové variabilitě je roven 2,1%.

Regresní model pro předpověď dosažených mechanických vlastností z hlediska tlakového namáhání je definován vztahem (6):

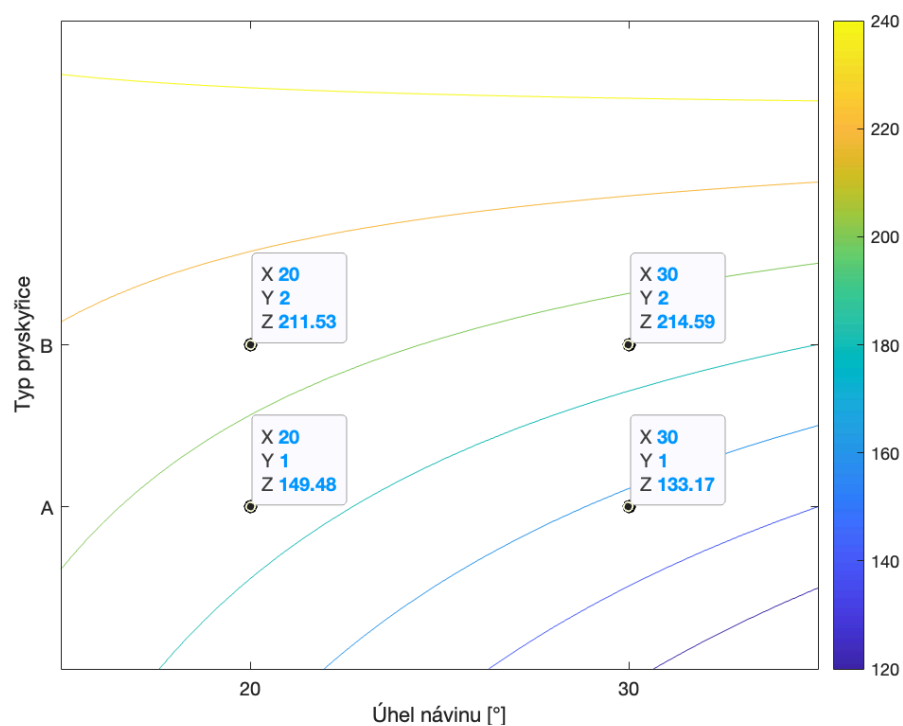
$$\hat{y} = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_2 x_2 + \hat{\beta}_3 x_3 + \hat{\beta}_{23} x_2 x_3 \quad (6)$$

$$\hat{y} = 260.9067 - 4.5963B - 7.0333C + 1.3420BC \quad (7)$$

kde zakódované proměnné  $x_2$  a  $x_3$  představují sledované faktory B a C. Obrázek 53 prezentuje plošné znázornění výstupu pro výsledné mechanické vlastnosti v axiálním tlaku testovaných vzorků, získané z regresního modelu uvedeného výše. Díky velmi nízké interakci všech faktorů vykazuje graf rovinu spíše lineárního charakteru. Z grafu je však evidentní, že pryskyřice typu B dosahuje mírně vyšších mechanických vlastností, stejně jako úhel navíjené výztuže pod úhlem 20°. Obrázek 54 znázorňuje alternativní vrstevnicový graf výstupu. Pro dosažení optimálních mechanických vlastností kompozitního materiálu z hlediska ohybového namáhání je tedy vhodné použít pryskyřici typu B v kombinaci s úhlem 20° navíjené vláknenné výztuže. Počet navíjených vrstev v tomto případě nepředstavuje významný vliv na finální mechanické vlastnosti.



Obrázek 53: Plošné znázornění výstupu (pro tlak)



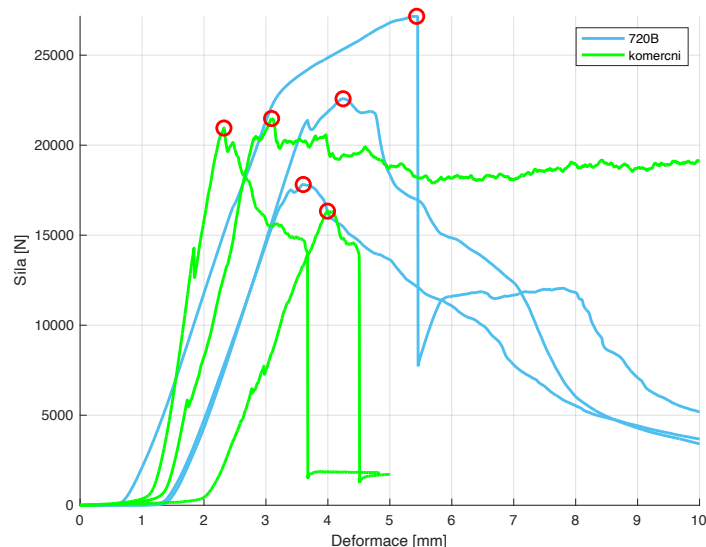
Obrázek 54: Vrstevnicový graf výstupu (pro tlak)

### Porovnání s komerční variantou

V rámci měření axiálního tlakového namáhání bylo také provedeno měření komerční varianty kompozitních trubek pro porovnání mechanických vlastností s trubkami vyráběnými v této práci. Na základě skutečnosti vinutí pultrudovaného vlákna pod úhlem  $10^\circ$  bylo předpokladem u komerční varianty trubek dosažení vyšších mechanických vlastností. Výsledky měření komerční varianty jsou znázorněny v tabulce 6 v posledních třech řádcích s parametry vzorku označených: X; 10; C.

- Komerční varianta trubek vykazuje v axiálním tlakovém zatížení hodnoty přibližně odpovídající naměřeným hodnotám u vzorků disponující  $20^\circ$  návinem vlákenné výztuže a pryskyřici typu B, které dosahují nejvyšších hodnot ze všech testovaných variant. Zmíněný předpoklad byl tedy potvrzen, nicméně i přes tuto skutečnost dosahují zkoumané vzorky konkrétních parametrů téměř stejných mechanických vlastností.
- Pozoruhodným hodnocením ale může být samotné chování materiálu při tlakovém zatěžování, přičemž u komerční varianty došlo u dvou ze tří měření k úplnému rozdělení materiálu na dvě poloviny, což se v případě navržených vyráběných vzorků nestalo ani u jednoho z měření. Z hlediska případných rázových deformací v praktické aplikaci je předpokladem, že by navržené vyráběné trubice měli být odolnější než trubice komerční.

Na následujícím obrázku 55 je pro názornost vyobrazena pracovní křivka axiálního tlakového namáhání všech testovaných vzorků včetně komerční varianty, která je definována světle zelenou barvou. Obrázek 56 vyobrazuje sadu všech testovaných vzorků pro tlakové namáhání.



Obrázek 55: Grafické znázornění průběhu axiální tlakové zkoušky včetně komerční varianty



Obrázek 56: Sada vzorků testovaných axiálním tlakovým namáháním (včetně komerční varianty)

## 6.5. Numerické ověření kritické síly

Dle tenzometrického měření sil v zavěšení provedeného na předchozí generaci monopostu týmu FS TUL Racing byla pro tento monopost uvažována návrhová síla působící v zavěšení  $F_A = 1900$  N. Vzhledem k výše uvedenému plánovanému experimentu a jeho dosažených výsledků byla pro výpočet a následnou konstrukci zvolena kompozitní trubka disponující 7 vrstvami navinutého uhlíkového rovingu pod úhlem  $20^\circ$  a pryskyřicí typu B. Parametry kompozitní trubky jsou uvedeny v následující tabulce 10.

Tabulka 10: Parametry a mechanické vlastnosti zvolené kompozitní trubice

$D$	20 mm	Vnější průměr kompozitní trubky
$d$	16 mm	Vnitřní průměr kompozitní trubky
$l_{max}$	310 mm	Nejdelší použitá kompozitní trubka používaná v zavěšení
$R_{mb}$	313,63 MPa	Mez pevnosti v ohybu kompozitní trubky
$E_{mb}$	41,41 GPa	Naměřený modul pružnosti v ohybu kompozitní trubky
$R_{mc}$	213,64 MPa	Mez pevnosti v tlaku kompozitní trubky
$E_{mc}$	2,41 GPa	Naměřený modul pružnosti v tlaku kompozitní trubky



Z důvodu převládajícího charakteru zatěžování kompozitní trubky v režimu tah – tlak a nemožnosti měření tahového namáhání na katedře KMI byla zvolená varianta trubice ověřena následujícím výpočtem maximální síly při namáhání tahem dle [37].

$$\sigma_{max} = \frac{F_{max}}{S} \quad (8)$$

$$F_{max} = R_{mc}\pi \frac{D^2 - d^2}{4} \quad (9)$$

$$F_{max} = \mathbf{24\ 162\ N} \quad (10)$$

kde  $F_{max}$  je maximální dosažená síla,  $\sigma_{max}$  je maximální dosažené napětí,  $S$  je plocha průřezu vzorku,  $R_{mc}$  je mez pevnosti v tlaku a koeficienty  $D$  a  $d$  jsou průměry mezikruží trubky.

Dále je zapotřebí vypočítat bezpečnostní koeficient  $k_{MSP}$  vůči meznímu stavu, který je dle publikace [37] dán vztahem (11):

$$k_{MSP} = \frac{F_{max}}{F_A} \quad (11)$$

$$k_{MSP} = \mathbf{12,72} \quad (12)$$

kde  $F_{max}$  je maximální dosažená síla a  $F_A$  je návrhová síla.

I přes poměrně vysokou hodnotu bezpečnostního koeficientu je důležité si uvědomit, že v tomto případě bude nejkritičtější zatěžování představovat tlakové namáhání kompozitní trubky, zejména pak z hlediska mezního stavu vzpěrné stability trubky. Je proto nutné zajistit kontrolu stability proti kritickému vzpěrnému zatížení podle vztahu (13) uvedeného v [37]. Při výpočtu bude předpokládána méně příznivá konfigurace uložení trubky, konkrétně s volným koncem na jedné straně a pevným vetknutím na straně druhé.

$$F_{kr} = \frac{\pi^2 EJ}{L^2} \quad (13)$$

$$F_{kr} = \frac{\pi^2 E_{mb}\pi \frac{(D^4 - d^4)}{64}}{(l_{max})^2} \quad (14)$$

$$F_{kr} = \mathbf{21\ 057\ N} \quad (15)$$

kde  $F_{kr}$  je kritická síla,  $E_{mb}$  je modul pružnosti v ohybu,  $D$  a  $d$  jsou průměry průřezu trubky a  $l_{max}$  je maximální délka kompozitní trubky.

V porovnání s naměřenými výsledky tlakového namáhání této konkrétní varianty kompozitní trubky můžeme pozorovat, že vypočtená kritická síla koresponduje s naměřenými hodnotami. Opět je zapotřebí vypočítat bezpečnostní koeficient vůči meznímu stavu vzpěrné stability obdobně jako v případě tahového namáhání dle následujícího vztahu (16) převzatého z publikace [37].

$$k_{MSP} = \frac{F_{kr}}{F_A} \quad (16)$$

$$k_{MSP} = 11,08 \quad (17)$$

kde  $F_{kr}$  je kritická síla a  $F_A$  je návrhová síla.

Vzhledem k charakteru materiálu použitého v tomto případě, kterým je uhlíková výztuž ve formě rovingu s epoxidovou polymerní matricí, je zvolený bezpečnostní koeficient považován za vhodný.

## 6.6. Zhodnocení výsledků experimentální části

Z provedené dynamické simulace zatěžování lichoběžníkových ramen zavěšení byly stanoveny okrajové podmínky pro horní a spodní přední rameno. Pro zhodnocení výsledků bylo zvoleno porovnávání maximálního dosaženého napětí ze simulací s maximálním dosaženým napětím při testování zhotovených kompozitních vzorků. Ačkoliv je převládající charakter zatěžování ve směru tah – tlak, byl zvolen způsob testovacího namáhání z hlediska tříosého ohybového namáhání a axiálního tlakového namáhání. Toto rozhodnutí vychází z důvodu absence vhodných upínacích čelistí pro kruhový průřez vzorků potřebných pro upnutí do trhacího zařízení Tiratest 2300. Z naměřených hodnot pro tříosé tlakové namáhání byl proveden výpočet kritické síly kompozitní trubky pro tahové namáhání. Na základě vyhodnocení plánovaného experimentu byla pro obě testovaná namáhání zvolena jako nejvhodnější varianta kompozitní trubka s návinem 7 vrstev uhlíkového rovingu pod úhlem  $20^\circ$  a druhým typem (B) použité polymerní matrice.

Ze simulace je zjevné, že nejvíce namáhaným lichoběžníkovým ramenem je spodní přední rameno, přičemž bylo dosaženo napětí 195 MPa. U horního předního ramene bylo dosaženo napětí 55 MPa. Při porovnání naměřených výsledků s okrajovými podmínkami lze pozorovat

hodnoty překračující okrajové podmínky u obou variant ramen, přičemž pro tříosé ohybové namáhání bylo dosaženo průměrného napětí 314 MPa. Pro axiální tlakové namáhání bylo dosaženo průměrného napětí 214 MPa.

Nevýhodou těchto měření je částečně rozdílný charakter namáhání než v reálných podmínkách, kterých nelze dosáhnout jiným způsobem než testováním reálných prvků při reálném použití. Z tohoto důvodu bylo měření doplněno o komerční variantu kompozitních trubek používaných konkurenčními týmy, u kterých byly dosaženy ještě nižší výsledky mechanických vlastností a zároveň dosahovaly fatálnějších deformací v podobě úplného prasknutí skrze celou součást. Pro reálné testování bude tedy postupováno aplikací kompozitní variantou u méně namáhaného horního ramene s podrobnou analýzou případných deformací a následně budou postupně nahrazovány kompozitní variantou zbylá lichoběžníková ramena monopostu.

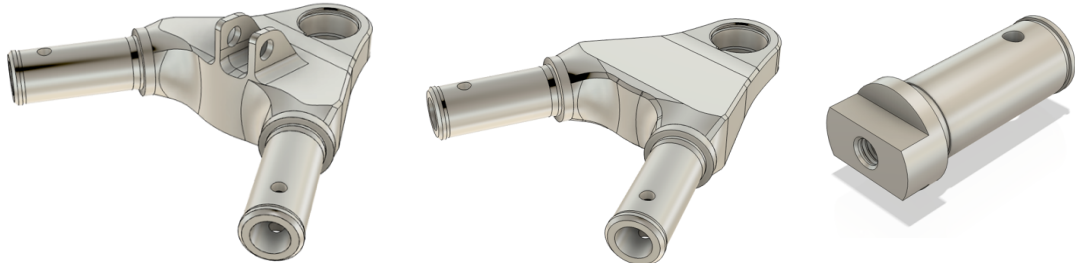
### 6.7. Návrh hliníkových insertů

Návrh hliníkových insertů byl proveden pomocí modelovacího softwaru Fusion 360. Pro kompletaci bylo zapotřebí navrhnout koncové a vidlicové inserty, které spojují kompozitní trubice a tvoří tak rameno lichoběžníkového tvaru. Při návrhu insertů bylo uvažováno využití shodných kloubových ložisek a kloubových hlav, jako v případě původní ocelové varianty ramen.

U insertů vidlicového tvaru bylo dbáno především na kompatibilitu se sférickými kloubovými ložisky značky Rodobal, které budou ve finálním výrobku nalisovány, proto je otvor pro ložisko navržen s tolerancí H6/p7. U tohoto typu uložení není zapotřebí dalšího zajištění, nicméně pro dodatečné zajištění zde byla vymodelována drážka pro pojistný kroužek. Pro jednodušší manipulaci s pojistným kroužkem je také přidáno malé vybrání v horní ploše insertu. Rotační části insertů, které budou zasunuty v trubci z uhlíkových vláken, jsou téměř v celém rozsahu zúženy z důvodu lepeného spoje, u kterého je důležité, aby bylo epoxidové lepidlo spojitě rozprostřeno mezi kompozitní trubicí a inserty. Nebylo také opomenuto na odlehčení samotného insertu v rotačních částech insertů.

U návrhu koncových insertů byla věnována pozornost především dosažení co nejnižší hmotnosti samotného dílu s možností využití kloubové hlavy pro upevnění k rámu monopostu. Opět bylo uvažováno využití identických kloubových hlav jako v případě dosavadního ocelového zavěšení vozidla. Tvar vnější strany insertu byl navržen tak, aby bylo možné lehce manipulovat s pozicí kloubové hlavy v případě potřeby dodatečného nastavení upevňující

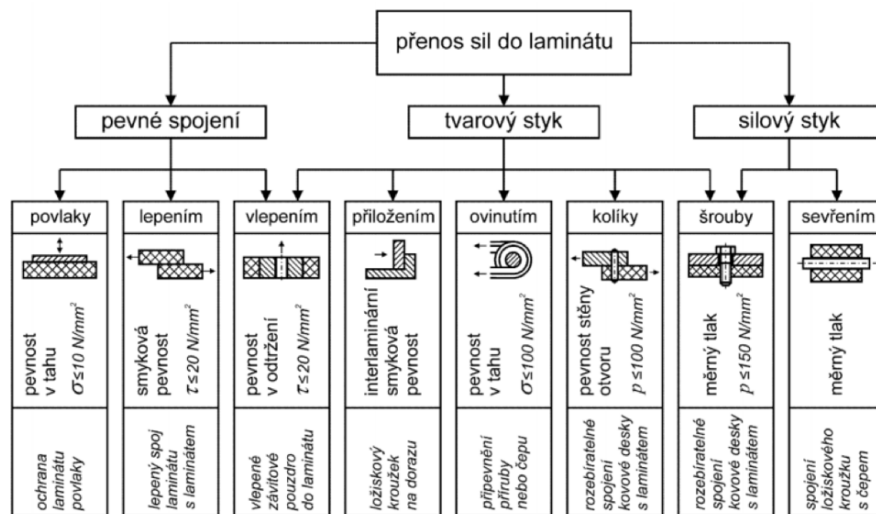
pozice. Rotační vlepaná část je shodná s vidlicovým typem insertu, avšak bez dodatečného odlehčení z důvodu potřebného závitového vrtání. Na obrázku 57 jsou znázorněny navržené varianty vlepaných insertů.



Obrázek 57: Náhled insertů určených ke kompletaci sestavy zavěšení předního kola studentské formule

## 6.8. Návrh lepeného spoje

Pro kompletaci zavěšení využívající kombinaci kompozitních trubek s hliníkovými inserty je nutno uvažovat také vhodné spojení jednotlivých komponent. V praxi existuje několik různých variant, jak vhodně kompozitní komponenty vzájemně spojit. Příkladem mohou být mechanické spoje, či řešení kdy dochází k ovinutí insertů v průběhu výrobního procesu samotných trubíc. Dalším způsobem je možnost využití lepených spojů, která byla zvolena i v rámci této diplomové práce. Jednotlivé metody spojování dále znázorněny na obrázku 58. Lepený spoj je z hlediska výrobní náročnosti nejjednodušším řešením pro konkrétní aplikaci v této diplomové práci a zároveň nabízí možnost snadné výměny vlepaných komponent v případě jejich poškození.



Obrázek 58: Typy spojení kov – kompozitní materiál [38]

### Volba vhodného lepidla

Jelikož bude lepený spoj dynamicky namáhaný, je důležité, aby zvolené lepidlo bylo dostatečně houževnaté a nedocházelo tak k následné degradaci jeho mechanických vlastností v důsledku jeho vystárnutí. Zároveň je důležité, aby lepidlo odolávalo vyšším teplotám vzhledem k umístění finálního komponentu blízko k vozovce, která může při určitých podmínkách dosahovat hodnot vyšších než 50°C.

Na základě průzkumu trhu a zkušeností získaných v rámci projektu studentské formule bylo pro tento experiment uvažováno strukturální epoxidové lepidlo od společnosti 3M s obchodním označením Scotch-Weld™ EC-9323 B/A, které vykazuje velmi příznivé adhezní vlastnosti při spojování hliníkových, ocelových, či CFRP materiálů. Dle technické dokumentace, uvedené v příloze 4, dosahuje maximální pevností ve střihu 28 MPa a tepelnou odolností do 150°C. Jedná se o lepidlo, které je běžně používáno v leteckém průmyslu, či ve vrcholovém odvětví motorsportu. Na trhu však existuje několik dalších komerčních variant např. od výrobce Loctite aj., které disponují obdobnými nebo dokonce vyššími mechanickými vlastnostmi, což by jako porovnání mohlo být zajímavým námětem na další budoucí výzkum.



Obrázek 59: Epoxidové lepidlo 3M Scotch-Weld EC-9323 B/A

### Výpočet délky lepeného spoje

V praxi se obecně považuje za nepsané pravidlo, že lepidla by neměla být zatěžována na více než 10 % své pevnostní hranice. S touto úvahou lze částečně předejít deformaci lepidel za studena (tzv. creepu). Je však nutné také uvažovat nad samotnou délkou lepeného spoje, jelikož existuje limitní rozměr, při jehož překročení se může zvyšovat možnost creepu adheziva ve střední nezatížené části, což zvyšuje riziko únavového porušení materiálu.

Pro výpočet požadované délky lepeného spoje lze využít upraveného vztahu (8), který je nutné rozšířit o povrch válce lepeného insertu a jako působící sílu dosadit návrhovou sílu  $F_A = 1900 \text{ N}$ . Návrh lepené plochy je pro jistotu uvažován se zatížením lepeného spoje na 5% své pevnostní hranice. Dosahovaná pevnost lepeného spoje lepidla Scotch-Weld™ EC-9323 B/A je rovna  $\sigma_{LS} = 28 \text{ MPa}$ . Výpočet je dán vztahem (18).

$$l_{LS} = \frac{F_A}{0,05\pi d\sigma_{LS}} \quad (18)$$

$$l_{LS} = 26,99 \text{ mm} \approx \mathbf{27 \text{ mm}} \quad (19)$$

kde  $l_{LS}$  je délka lepeného spoje,  $F_A$  je návrhová síla a  $\sigma_{LS}$  je pevnost lepeného spoje. Výsledná délka lepeného spoje je dle výše uvedeného výpočtu uvažována v délce 27 mm.

## 6.9. Kompletace prototypu sestavy

Vzhledem k výsledům získaných experimentálními měření a jejich následujícím porovnáním vůči okrajovým podmínkám bylo možné přistoupit k návrhu a kompletaci finální sestavy kompozitních ramen zavěšení monopostu. Pro prvotní realizaci bylo přistoupeno opět ke 3D návrhu pomocí CAD programu Fusion 360, kde byly zkonstruovány podvozkové komponenty na základě dat kinematických bodů předešlé ocelové varianty. Na následujícím obrázku 60 je uvedeno grafické znázornění zkonstruované sestavy lichoběžníkového zavěšení využívající kompozitní trubky.



Obrázek 60: 3D vizualizace lichoběžníkového zavěšení využívající kompozitní trubky

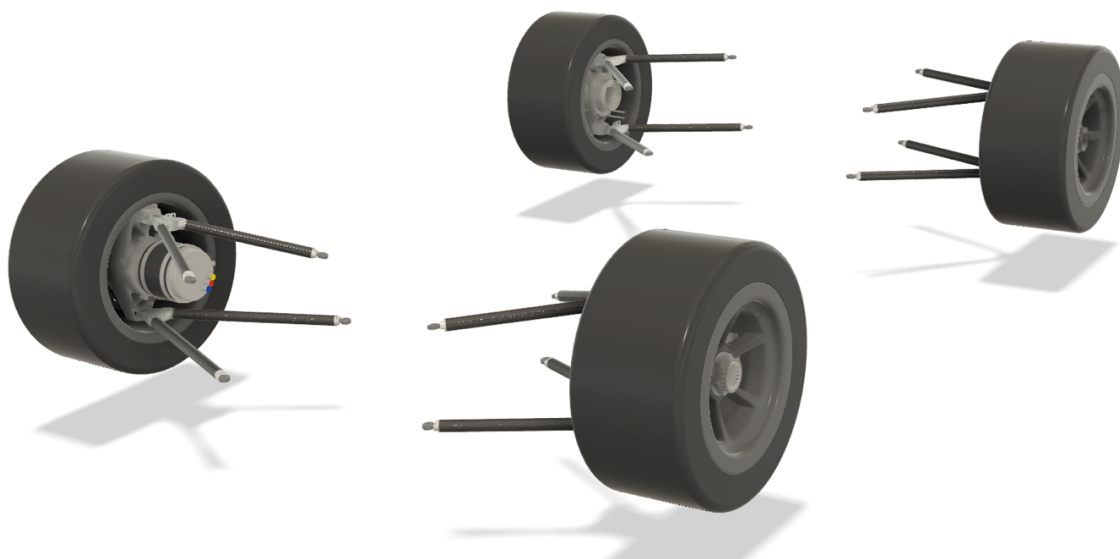
Každé z lichoběžníkových ramen je sestrojeno z kompozitních trubek definovaných požadovanými rozměrovými parametry, vlepanými inserty vidlicového a koncového tvaru

společně s kloubovými hlavami a sférickými kloubovými ložisky. U vlepaných insertů bylo uvažováno využití shodných kloubových ložisek a ložiskových hlav jako v případě původní ocelové varianty z důvodu již ověřené požadované funkcionalitě. Co se týče uvažovaným materiálem samotných vlepaných insertů, byla zvolena hliníková slitina EN AW 7075 T6. Na následujícím obrázku 61 je uvedena grafická vizualizace detailu sestavy ramen levého předního kola monopostu



Obrázek 61: 3D vizualizace detailu sestavy ramen levého předního kola monopostu

Pro vhodnější názornost je na následujícím obrázku 62 znázorněna sestava kompletního lichoběžníkového zavěšení včetně umístěných komponent v podobě těhlic, elektromotorů, nábojů a kol používaných v aktuálním monopostu týmu FS TUL Racing.



Obrázek 62: 3D vizualizace sestavy podvozku včetně doplňujících komponent

Z časových a ekonomických důvodů byla pro reálnou konstrukci prototypu sestavy zvolena technologie 3D tisku uvažovaných hliníkových insertů. Při sestavení prototypových lichoběžníkových ramen s tištěnými inserty bylo postupováno identickým způsobem, jakým bude přistoupeno i s obrobenými hliníkovými inserty. Při postupu lepení jednotlivých komponent bylo důležité docílit vhodného zdrsnění povrchu vlepovaných částí insertů společně se zdrsněním povrchu vnitřní strany kompozitních trubek. Tyto povrchy byly následně důkladně odmaštěny odmašťovacím přípravkem pro zajištění potřebné adheze mezi lepidlem a jednotlivými komponenty lichoběžníkových ramen. Pro lepený spoj bylo využito zvolené epoxidové lepidlo zmíněné v kapitole 6.8. V případě potřeby lze lepené spoje vzájemně rozlepit při zahřátí nad teplotu 150°C a bude tedy možné následně využít zhotovené kompozitní trubky, jakmile budou vyrobeny hliníkové inserty. Testování kompozitních ramen v reálných podmínkách bude provedeno v průběhu závodní sezóny týmu. Pro ověření celkové hmotnostní redukce bylo využito softwarového dopočítání hmotnosti hliníkových komponent z hustoty definovaného materiálu EN AW 7075 T6. Hmotnosti jednotlivých komponent pro všechna ramena jsou uvedeny v následující tabulce 11.

Tabulka 11: Hmotnostní podíly jednotlivých komponent

Horní přední rameno		Spodní přední rameno	
Komponent	Hmotnost [g]	Komponent	Hmotnost [g]
Vidlicový insert	212	Vidlicový insert	182
Koncový insert (2x)	21,5 + 21,5	Koncový insert (2x)	21,5 + 21,5
Kompozitní trubka 1	47	Kompozitní trubka 1	57
Kompozitní trubka 2	46	Kompozitní trubka 2	56
<b>Celková hmotnost</b>	<b>348</b>	<b>Celková hmotnost</b>	<b>338</b>
<b>Ocelová varianta</b>	<b>511</b>	<b>Ocelová varianta</b>	<b>610</b>
<b>Hmotnostní úbytek</b>	<b>163</b>	<b>Hmotnostní úbytek</b>	<b>272</b>
Horní zadní rameno		Spodní zadní rameno	
Komponent	Hmotnost [g]	Komponent	Hmotnost [g]
Vidlicový insert	195	Vidlicový insert	212
Koncový insert (2x)	21,5 + 21,5	Koncový insert (2x)	21,5 + 21,5
Kompozitní trubka 1	54	Kompozitní trubka 1	57
Kompozitní trubka 2	50	Kompozitní trubka 2	54
<b>Celková hmotnost</b>	<b>342</b>	<b>Celková hmotnost</b>	<b>366</b>
<b>Ocelová varianta</b>	<b>609</b>	<b>Ocelová varianta</b>	<b>630</b>
<b>Hmotnostní úbytek</b>	<b>267</b>	<b>Hmotnostní úbytek</b>	<b>264</b>



Dosažená hmotnostní redukce u lichoběžníkových ramen činí 966 g pro sestavu jedné strany předního a zadního zavěšení kol. Celková hmotnostní redukce pro zavěšení podvozku u všech čtyř kol monopostu dosahuje 1932 g, což je z hlediska neodpružených hmot velmi příznivý úbytek hmotnosti, který je v rámci tohoto projektu klíčovým aspektem. Na následujícím obrázku 63 je uveden zhotovený prototyp sestavy předních lichoběžníkových ramen využívající kompozitní trubky.



Obrázek 63: Dva pohledy na zhotovené prototypy předních lichoběžníkových ramen s optimálním návinem

### 6.10. Návrh dalšího experimentu

Hlavním předmětem dalšího experimentu bude testování kompozitní varianty lichoběžníkového zavěšení v reálných podmínkách, které bude provedeno v rámci závodní sezóny týmu FS TUL Racing v následujících měsících. Nicméně námětem pro další experiment by z hlediska charakteru zatěžování mohlo být uvažováno o testování pevnosti samotných lepených spojů pomocí tahového zatěžování. U tohoto experimentálního měření by bylo vhodné uvažovat použití různých komerčních variant lepidel a zkoumat tak vhodnost použití pro zvolené lepené spoje, které mohou být kritickým místem z hlediska pevnosti celého dílce.

Při experimentálním axiálním tlakovém namáhání komerčních vzorků v rámci této práce bylo rovněž dosaženo zásadně nižších mechanických vlastností, než uvádí samotný výrobce, což může být zapříčiněno nedostatečnou délkou testovaných vzorků. Pro budoucí experiment by bylo tedy vhodné sledovat vliv délky testovaných vzorků na výsledné mechanické vlastnosti. Obzvláště pak u sledovaných navíjených vzorků kompozitních tubic, jejichž charakter návinu a počet ovinutí na délku kompozitního profilu může značně ovlivnit dosažené mechanické vlastnosti.

## 7. Závěr

Teoretická část práce se zabývala konstrukčním typům zavěšení podvozku a problematikou kompozitních materiálů s polymerní matricí vyztužených uhlíkovou výztuží. Dále jsou zde vysvětleny technologické výrobní procesy pro přípravu kompozitních materiálů s ohledem na výrobu kompozitních trubíc a profilů.

Cílem práce bylo navrhnout a zkonstruovat kompozitní zavěšení pro projekt studentské formule týmu FS TUL Racing, který reprezentuje Technickou univerzitu v Liberci. Hlavní motivací tohoto návrhu bylo zredukovat celkovou hmotnost neodpružených hmot podvozkové sestavy. Dosavadní řešení využívající chrommolybdenovou ocel je na takové úrovni, že pomocí běžně dostupných technologií a materiálů již není prostor pro další vylepšení a redukcii hmotnosti. Z tohoto důvodu bylo přistoupeno k řešení návrhu kompozitní varianty využívající jako vyztužující materiál uhlíková vlákna disponující vysokých mechanických vlastností.

V úvodu experimentální části byl připraven plánovaný experiment designu  $2^3$  jehož cílem je sledování vlivu výrobních vstupních parametrů kompozitních prvků na jejich dosažené mechanické vlastnosti. Sledovanými faktory byly: počet vrstev vlákenné výztuže (5 a 7), úhel návínů vlákenné výztuže ( $20^\circ$  a  $30^\circ$ ) a typ použité pryskyřice (A a B), přičemž každý z faktorů byl sledován na dvou úrovních, které jsou uvedeny v závorkách. Zároveň zde byl uveden popis výrobního procesu zhotovených testovaných vzorků, které byly pro ověření mechanických vlastností vystaveny mechanickým zkouškám tříosého ohybového namáhání a axiálního tlakového namáhání. U každé z variant zhotovených vzorků byly provedeny tři měření, přičemž z dosažených výsledků se jako optimální varianta jevila trubice disponující návínem se 7 vrstvami uhlíkové výztuže navíjené pod úhlem  $20^\circ$  s polymerní pryskyřicí typu B. Tato varianta dosahovala průměrné hodnoty maximálního napětí 314 MPa z hlediska tříosého ohybového namáhání a 214 MPa z hlediska axiálního tlakového namáhání. Pro ověření vhodnosti použití v konkrétní aplikaci byly porovnávány výsledky dosaženého maximálního napětí s okrajovými podmínkami získaných z dynamické simulace, která byla provedena ve spolupráci s týmem FS TUL Racing. Vzhledem k možnostem katedry materiálového inženýrství nebylo možné provést zkoušku tahového namáhání u vzorků kruhového průřezu. Proto bylo pro tento typ namáhání provedeno numerické ověření kritické síly, které odpovídá 24162 N, vůči návrhové síle ( $F_A = 1900$  N). Z těchto hodnot byl dopočítán bezpečnostní koeficient  $k_{MSP} = 12,72$ .

Na základě dosažených výsledků lze uvažovat vhodnost použití kompozitních prvků v návrhu konstrukce zavěšení monopostu studentské formule. Nevýhodou těchto měření je však částečně rozdílný charakter namáhání než v reálných podmínkách, kterých nelze dosáhnout jiným způsobem než testováním reálných prvků při reálném použití. Z tohoto důvodu bylo měření doplněno o komerční variantu kompozitních trubek používaných konkurenčními týmy, u kterých byly dosaženy nižší výsledky mechanických vlastností z hlediska tříosého ohybového namáhání, kdy bylo dosaženo průměrné hodnoty maximálního napětí (175 MPa). V případě axiálního tlakového namáhání bylo dosaženo přibližně stejné průměrné hodnoty maximálního napětí (211 MPa). Testované vzorky komerční varianty zároveň dosahovaly fatálnějších deformací v podobě úplného prasknutí skrze celou kompozitní součást.

V závěru práce je uveden 3D návrh vlepovaných hliníkových insertů společně s návrhem celé sestavy lichoběžníkového zavěšení využívající kompozitní elementy, na jejichž základě je zhotoven prototyp zavěšení předního kola. Z tohoto návrhu bylo zjištěno, že celková hmotnostní redukce pro zavěšení podvozku u všech čtyř kol monopostu dosahuje 1932 g, což je z hlediska neodpružených hmot velmi příznivý úbytek hmotnosti, který je v rámci tohoto projektu klíčovým aspektem.

## Seznam použité literatury

- [1] FORMULA STUDENT CZECH REPUBLIC. *FS Czech* [online]. 2024 [vid. 2024-01-29]. Dostupné z: <https://fsczech.cz/>
- [2] SRNÍČEK, Dávid. *Návrh a optimalizace kinematiky vozidla Formula Student*. Ostrava, 2022. Technická univerzita Ostrava.
- [3] FSAE. *FSAE History* [online]. 2024 [vid. 2024-01-29]. Dostupné z: <https://www.fsaeonline.com/page.aspx?pageid=c4c5195a-60c0-46aa-acbf-2958ef545b72>
- [4] WIKIPEDIA. Formula SAE. *Wikipedia* [online]. 2024 [vid. 2024-05-16]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Formula\\_SAE&oldid=1217738250](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Formula_SAE&oldid=1217738250)
- [5] FORMULA STUDENT GERMANY. *FSG Rules* [online]. 2023. Dostupné z: <https://www.formulastudent.de/fsg/rules/>
- [6] FS TUL RACING. *Tým - Student Formula Liberec* [online]. 2023 [vid. 2024-01-23]. Dostupné z: <http://www.fstulracing.cz/tym>
- [7] MACHOTKA, Michal. *Návrh úprav podvozku vozidla*. Liberec, 2022. Technická univerzita v Liberci.
- [8] VLK, František. *Podvozky motorových vozidel*. Brno: Nakladatelství a vydavatelství VLK, 2000. ISBN 80-238-5274-4.
- [9] OKÁNÍK, František. *Nápravy moderních osobních automobilů*. Brno, 2012. Vysoké učení technické v Brně.
- [10] SAJDL, Jan. *Náprava De Dion*. *autolexicon.net* [online]. 2011 [vid. 2024-01-23]. Dostupné z: <https://www.autolexicon.net/cs/articles/naprava-de-dion/>
- [11] SAJDL, Jan. *Náprava MacPherson (McPherson) - autolexicon.net* [online]. 2011 [vid. 2024-01-23]. Dostupné z: <https://www.autolexicon.net/cs/articles/naprava-macpherson-mcpherson/>
- [12] FRANC, Radek. *Konstrukce podvozku studentské formule*. Liberec, 2022. Technická univerzita v Liberci.
- [13] SAJDL, Jan. *Lichoběžníková náprava*. *autolexicon.net* [online]. 2011 [vid. 2024-01-23]. Dostupné z: <https://www.autolexicon.net/cs/articles/lichobeznikova-naprava/>
- [14] SAJDL, Jan. *Víceprvková náprava*. *autolexicon.net* [online]. 2011 [vid. 2024-01-23]. Dostupné z: <https://www.autolexicon.net/cs/articles/viceprvkova-naprava/>

- [15] POLÁŠEK, Jan. *Návrh přípravku pro zkoušení tuhosti zavěšení kol formule student*. Brno, 2013. Vysoké učení technické v Brně.
- [16] AULAKH, Savitoy a Renold ELSEN. *Modeling and Fabrication of CFRP Tubes for Double Wishbone Suspension of Formula SAE Race-Car*. B.m., 2020. University of fouthern California.
- [17] AMG PETRONA FORMULA ONE TEAM. *The Suspension of a Formula One Car* [online]. 2024 [vid. 2024-05-15]. Dostupné z: <https://www.mercedesamgf1.com/news/the-suspension-of-a-formula-one-car>
- [18] EHRENSTEIN, Gottfried W. *Polymerní kompozitní materiály*. Praha 5: Scientia, 2009. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [19] HADAŠČOK, Matěj. *Trubice z vlákný vyztužených kompozitních materiálů a možnosti jejich uplatnění*. Liberec, 2022. Technická univerzita v Liberci.
- [20] GP BOX. *2005 Renault F1 carbon fibre & titanium wishbone* [online]. 2024 [vid. 2024-05-16]. Dostupné z: <https://www.thegpbox.com/product/2005-renault-f1-carbon-fibre-fiber-titanium-wishbone-arm-real-formula-1-car-display-part-motorsport-engineering-racing-gift/>
- [21] JANČÁŘ, Josef. *Úvod do materiálového inženýrství polymerních kompozitů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2003. ISBN 80-214-2443-5.
- [22] DLÁPAL, Václav. *Návrh ramen zavěšení kol s vlepými úchyty kloubů*. Brno, 2016. Vysoké učení technické v Brně.
- [23] PLASTIC. *Ruční laminace* [online]. 2024 [vid. 2022-03-14]. Dostupné z: [http://www.plastic.cz/technologie-rucni\\_laminace](http://www.plastic.cz/technologie-rucni_laminace)
- [24] HAVEL COMPOSITES. *Strhávací tkanina* [online]. 2024 [vid. 2024-05-16]. Dostupné z: <https://www.havel-composites.com/cs/produkty/strhavaci-tkanina-64g-m2-pa-64-sire-157cm-200-0c-1028-9591>
- [25] POLYMER - COMPOSITES. Lisování. *Spolek pro technickou podporu a propagaci polymerních kompozitů* [online]. 2017 [vid. 2024-05-16]. Dostupné z: <https://polymer-composites.cz/press-moulding/>
- [26] KRATOCHVÍL, Bohumil, Václav ŠVORČÍK a Dalibor VOJTĚCH. *Úvod do studia materiálů*. Vysoká škola chemicko-technologická. 2005. ISBN 80-7080-568-4.
- [27] MOLDED FIBER GLASS. *Vacuum Infusion Molding Process* [online]. Dostupné z: <https://moldedfiberglass.com/processes/vacuum-infusion/>

- [28] POLYMER - COMPOSITES. Injektážní a infuzní technologie. *Spolek pro technickou podporu a propagaci polymerních kompozitů* [online]. 2017. Dostupné z: <https://polymer-composites.cz/injektazni-infuzni-technologie/>
- [29] PLASTIC. *Autokláv* [online]. [vid. 2024-05-16]. Dostupné z: <https://www.plastic.cz/technologie-autoklav-cz>
- [30] CONNOVA. Prepreg Autoclave Technology. *Connova* [online]. 7. prosinec 2021 [vid. 2024-05-16]. Dostupné z: <https://www.connova.com/en/competencies/prepreg-autoclave-technology/>
- [31] X-WINDER. 4-Axis Model 4X-23. *X-Winder LLC* [online]. [vid. 2024-05-16]. Dostupné z: <https://xwinder.com/4-axis-model-4x-23/>
- [32] POLYMER - COMPOSITES. Navíjení. *Spolek pro technickou podporu a propagaci polymerních kompozitů* [online]. 15. listopad 2017 [vid. 2024-05-16]. Dostupné z: <https://polymer-composites.cz/filament-winding/>
- [33] STRATASYS. *ST-130* [online]. [vid. 2024-05-16]. Dostupné z: <https://www.stratasys.com/en/materials/materials-catalog/fdm-materials/st-130/>
- [34] LUTHADA, Pravin. Pultrusion Manufacturing Process. *Addcomposites* [online]. 2022 [vid. 2024-05-15]. Dostupné z: <https://www.addcomposites.com/post/pultrusion>
- [35] NOŽIČKA, Miloš. *Využití metody Design of Experiments ve ŠKODA AUTO a.s.* Liberec, 2012. Technická univerzita v Liberci.
- [36] MONTGOMERY, Douglas C. *Design and analysis of experiments*. Eighth edition. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc, 2013. ISBN 978-1-118-14692-7.
- [37] SHIGLEY, Joseph Edward, Charles R. MISCHKE a Richard Gordon BUDYNAS. *Konstruování strojních součástí*. Přel. Martin HARTL a Miloš VLK. Brno: VUTIUM, 2010. ISBN 978-80-214-2629-0.
- [38] KROPÍK, Bohumil. *Návrh a analýza kompozitní trubky pro poloosu studentské formule*. Praha, 2015. České vysoké učení technické v Praze.

## Seznam obrázků

Obrázek 1: První studentská formule [4].....	12
Obrázek 2: Monopost Viktorie týmu FS TUL Racing (sezóna 2023).....	16
Obrázek 3: Zavěšení kol podvozku (závislé a nezávislé) [8] .....	17
Obrázek 4: Náprava De Dion vozu Alfa 75 [10].....	18
Obrázek 5: Náprava McPherson vozidla MB E-Class [11].....	19
Obrázek 6: Vysoká lichoběžníková náprava [13].....	20
Obrázek 7: Zadní víceprvková náprava [14] .....	21
Obrázek 8: Schéma zavěšení monopostu F1 Mercedes Benz W10 [17].....	22
Obrázek 9: Kompozitní zavěšení Formule 1 [20] .....	23
Obrázek 10: Příklad synergického efektu trubky[18].....	24
Obrázek 11: Schéma ruční laminace [19].....	26
Obrázek 12: Schéma vakuového lisování [25] .....	27
Obrázek 13: Schéma infuzní technologie [19] .....	28
Obrázek 14: Autokláv [30] .....	29
Obrázek 15: Schéma technologického procesu kontinuálního navíjení [32] .....	30
Obrázek 16: Schéma technologického procesu pultruze [34] .....	31
Obrázek 17: Grafické znázornění kombinací všech faktorů a úrovní designu $2^3$ [36] .....	33
Obrázek 18: Různé typy zápisů kombinací všech faktorů designu $2^3$ [36].....	33
Obrázek 19: Znázornění jednotlivých faktorů [36] .....	34
Obrázek 20: Dvou faktorové a třífaktorová interakce faktorů [36].....	34
Obrázek 21: Navíjecí zařízení X-Winder 4X-23 [31] .....	37
Obrázek 22: Uhlíkový roving Tenax IMS65 E23 24K.....	38
Obrázek 23: Separační vosk Spacewax 300 .....	38
Obrázek 24: Stahovací páska Diatex Filament 160.....	39
Obrázek 25: Trajektorie a poloha vozovky (fishhook).....	40
Obrázek 26: Grafické znázornění závislosti působících sil na čase (horní rameno, uložení u těhlice).....	41
Obrázek 27: Grafické znázornění závislosti působících sil na čase (horní rameno, uložení v bodě rámu).....	41
Obrázek 28: Grafické znázornění závislosti působících sil na čase (spodní rameno, uložení u těhlice).....	42

Obrázek 29: Grafické znázornění závislosti působících sil na čase (spodní rameno, uložení v bodě rámu).....	42
Obrázek 30: Grafické znázornění maximálního napětí [MPa] a deformace horního předního ramene .....	43
Obrázek 31: Grafické znázornění maximálního napětí [MPa] a deformace spodního předního ramene .....	43
Obrázek 32: Trhací zařízení Tiratest 2300 (ohyb).....	44
Obrázek 33: Uložení testovaného vzorku (ohyb).....	44
Obrázek 34: Vzorky různých úhlů návínů (vlevo 20°, vpravo 30°).....	45
Obrázek 35: Grafické znázornění průběhu ohybové zkoušky.....	46
Obrázek 36: Grafické znázornění průběhu ohybové zkoušky (pryskyřice A) .....	47
Obrázek 37: Grafické znázornění průběhu ohybové zkoušky (pryskyřice B).....	47
Obrázek 38: Grafické znázornění statistické významnosti interakce faktorů A a B (v ohybu).....	49
Obrázek 39: Grafické znázornění statistické významnosti interakce faktorů A a C (v ohybu).....	50
Obrázek 40: Grafické znázornění statistické významnosti interakce faktorů B a C (v ohybu).....	50
Obrázek 41: Plošné znázornění výstupu (pro ohyb).....	52
Obrázek 42: Vrstevnicový graf výstupu (pro ohyb).....	52
Obrázek 43: Grafické znázornění průběhu ohybové zkoušky včetně komerční varianty .....	53
Obrázek 44: Sada vzorků testovaných třiosým ohybovým namáháním (včetně komerční varianty) .....	54
Obrázek 45: Trhací zařízení Tiratest 2300 (tlak).....	54
Obrázek 46: Uložení testovaného vzorku (tlak).....	54
Obrázek 47: Grafické znázornění průběhu axiální tlakové zkoušky.....	56
Obrázek 48: Grafické znázornění axiální tlakové zkoušky (pryskyřice A).....	57
Obrázek 49: Grafické znázornění axiální tlakové zkoušky (pryskyřice B).....	57
Obrázek 50: Grafické znázornění statistické významnosti interakce faktorů A a B (v tlaku) ..	59
Obrázek 51: Grafické znázornění statistické významnosti interakce faktorů A a C (v tlaku) ..	60
Obrázek 52: Grafické znázornění statistické významnosti interakce faktorů B a C (v tlaku) ..	60
Obrázek 53: Plošné znázornění výstupu (pro tlak).....	62
Obrázek 54: Vrstevnicový graf výstupu (pro tlak).....	62
Obrázek 55: Grafické znázornění průběhu axiální tlakové zkoušky včetně komerční varianty .....	63



Obrázek 56: Sada vzorků testovaných axiálním tlakovým namáháním (včetně komerční varianty) .....	64
Obrázek 57: Náhled insertů určených ke kompletaci sestavy zavěšení předního kola studentské formule .....	68
Obrázek 58: Typy spojení kov – kompozitní materiál [38].....	68
Obrázek 59: Epoxidové lepidlo 3M Scotch-Weld EC-9323 B/A.....	69
Obrázek 60: 3D vizualizace lichoběžníkového zavěšení využívající kompozitní trubky .....	70
Obrázek 61: 3D vizualizace detailu sestavy ramen levého přední kola monopostu .....	71
Obrázek 62: 3D vizualizace sestavy podvozku včetně doplňujících komponent.....	71
Obrázek 63: Dva pohledy na zhotovené prototypy předních lichoběžníkových ramen s optimálním návínem .....	73

## Seznam tabulek

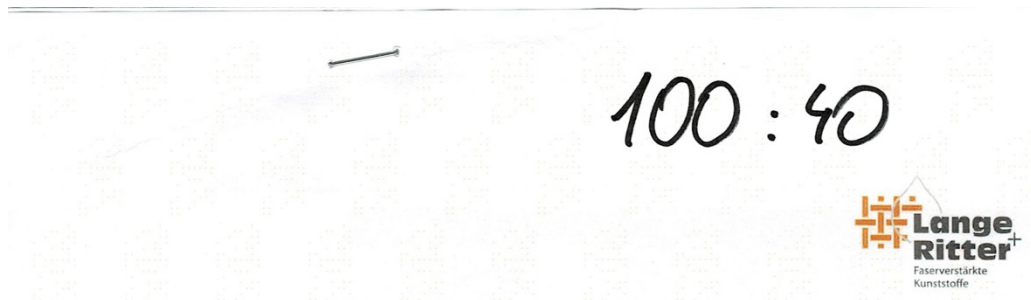
Tabulka 1: Sledované faktory a jejich úrovně .....	36
Tabulka 2: Naměřené hodnoty ohybové zkoušky .....	46
Tabulka 3: Hodnoty dosaženého maximálního napětí v ohybu znázorněny v matici designu $2^3$ .....	48
Tabulka 4: Statistické vyhodnocení nástrojem ANOVA pro ohybové namáhání všech faktorů .....	49
Tabulka 5: Statistické vyhodnocení nástrojem ANOVA pro ohybové namáhání pouze pro faktory A a C .....	51
Tabulka 6: Naměřené hodnoty tlakové zkoušky .....	56
Tabulka 7: Hodnoty dosaženého maximálního napětí v axiálním tlaku znázorněny v matici designu $2^3$ .....	58
Tabulka 8: Statistické vyhodnocení nástrojem ANOVA pro tlakové namáhání všech faktorů	58
Tabulka 9: Statistické vyhodnocení nástrojem ANOVA pro ohybové namáhání pouze pro faktory B a C.....	61
Tabulka 10: Parametry a mechanické vlastnosti zvolené kompozitní trubice.....	64
Tabulka 11: Hmotnostní podíly jednotlivých komponent.....	72

## Seznam příloh

Příloha 1: Laminační epoxidový systém L285 – technický list.....	84
Příloha 2: Laminační epoxidový systém Resoltech 1800 – technický list .....	88
Příloha 3: Teijin Tenax IMS65 E23 24K – technický list .....	93
Příloha 4: 3M Scotch-Weld EC-9323 B/A – technický list.....	94

## Přílohy

Příloha 1: Laminační epoxidový systém L285 – technický list



100 : 40

**Lange Ritter**  
Faserverstärkte  
Kunststoffe

### Laminační pryskyřice L285 + tvrdidlo H285, H286, H287

**Použití**

Neplněná laminační pryskyřice bez ředidla s nízkou viskozitou pro výrobu staticky i dynamicky vysoce namáhaných dílů v leteckém průmyslu. Tento systém obdržel atest od Luftfahrt-Bundesamt pro použití v kombinaci se skelnou tkaninou, carbonovou tkaninou a aramidovými vlákny.

Po teplotě při 50 – 55 °C tento systém splňuje pevnostní požadavky pro větroně a motorové kluzáky (teplotní tvarová stálost do 54 °C). Díky hydrofobním vlastnostem má tento laminační systém omezenou nasákavost (např. při 50 °C v 80% rel. vlhkosti několik měsíců)

**Skladování**

Skladovatelnost systému je 12 měsíců v době uzavřených originálních obalech na suchém místě. Při teplotě pod 15 °C může dojít u pryskyřice i tvrdidla ke krystalizaci. Pak je před vlastním použitím nutno obě komponenty zahřát ve vodní lázni na 50 – 60 °C a dobře promíchat. Tento proces nemá vliv na výsledné vlastnosti laminačního systému. Zpracovávejte pouze transparentní produkty. Před nahříváním obal otevřete. Nenahřívajte přímým plamenem.

**Zpracování**

Tento laminační systém je vhodný pro všechny běžné laminační metody. Optimální teplota pro zpracování je 20 – 25 °C. Zpracování při vyšších teplotách je možné, zkracuje se však doba zpracovatelnosti. Zvýšení teploty o 10 °C znamená zkrácení doby zpracovatelnosti na polovinu. Vysoké hodnoty vzdušné vlhkosti nebo vlhkost obsažená v plnivu působí jako urychlovač. Přesto různé teploty zpracování a různé hodnoty vzdušné vlhkosti mají zanedbatelný vliv na výsledné mechanické vlastnosti vytvrzených dílů.

Je nutno, pokud možno, přesně dodržet předepsaný směšovací poměr. Menší nebo větší podíl tvrdidla neznamená pomalejší nebo rychlejší vytvrzování systému, má za následek ne zcela úplné vytvrzení, které již nelze (ani následnými opatřeními) zcela korigovat. Pryskyřice a tvrdidlo musí být dokonale promíchány. Pozornost věnujte stěnám a dnu směšovací nádoby.

Při zpracování za vyšších teplot se doporučuje zpracovávat pouze malé množství směsi. Jelikož je odvod tepla směsi ve směšovací nádobě značně omezen, může dojít k neřízené exotermické reakci, teplota směsi vzroste nad 200 °C, začne se uvolňovat velké množství kouře a směs zuhelnatí.

Při kombinaci polyesterového gel-coatu a epoxidového systému se doporučuje předem vyzkoušet přilnavost systémů stejně jako ostatní všeobecné mechanické vlastnosti. Nevhodná kombinace může ovlivnit tvorbu trhlin nebo barvu gel-coatu.

Při zpracování směsi dbejte pokynů bezpečnostních listů. Doporučujeme informace obsažené v naší publikaci: "Bezpečné zpracování epoxidových a polyesterových pryskyřic."

---

Lange Ritter L 285 + H285/ H286/ H287strana 1

**Specifikace**

Vlastnost	Pryskyřice L 285	Tvrdivlo 285	Tvrdivlo 286	Tvrdivlo 287
Hustota při 25 °C (g/cm <sup>3</sup> )	1.20-1.25	0.94-0.97	0.95-0.98	0.97-1.0
Viskozita při 25 °C (mPa.s)	600-900	60-100	60-100	60-100
Epoxidový ekvivalent	160 - 170	-	-	-
Podíl aminů (mg KOH/g)	-	350-400	450-500	450-500
Podíl barviva (Gardner)	max 6	max 4+	max 4+	max 4+

+ platí pouze pro nenabarvená transparentní tvrdidla, běžně jsou tvrdidla modře obarvena

**Data při zpracování**

Vlastnost	Pryskyřice L 285	Tvrdivlo 285	Tvrdivlo 286	Tvrdivlo 287
EP - hodnota	0.59-0.63	-	-	-
Aminový ekvivalent	-	62-67	62-67	62-67
Teplota zpracování	18 –30 °C			
Skladovatelnost při 15-25 °C	>12 měsíců v originálním obalu			
Viskozita směsi při 25 °C	300 – 500 mPa.s			
Nárůst teploty při vytvrzování	Viz. diagram			
Tvrzení	Předtvrzení při 20-25 °C			
Temperace	15 hod/50 °C až 15 min/150 °C			

**Směšovací poměry**

	L 285 : Tvrdivlo 285 / 286 / 287
Hmotnostní díly	100 : 38 - 40
Objemové díly	100 : 47 -50

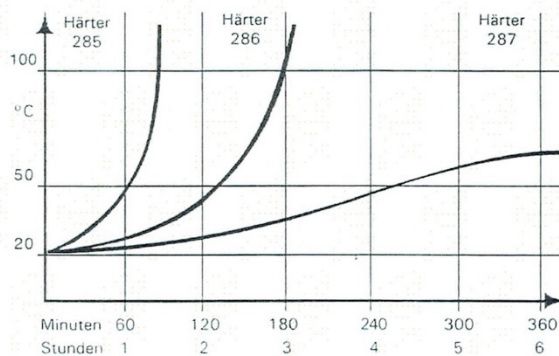
**Doba zpracovatelnosti**

Tvrdivlo 285	Tvrdivlo 286	Tvrdivlo 287
45 – 60 min	100 – 120 min	cca. 300 min

**Data nepevněné epoxidové směsi**

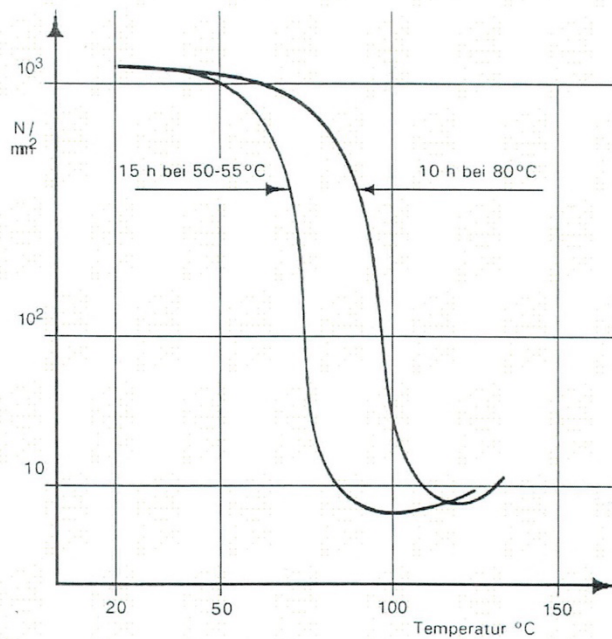
Tvrzeno: 24 hod/20 – 25 °C + 15 hod/50 – 55 °C	L285+H285	L285+H286	L285+H278	
	Hustota při 25 °C (g/cm <sup>3</sup> )	1.20	1.20	1.20
Ohybová pevnost (N/mm <sup>2</sup> )	118	110	115	
Pevnost v tahu (N/mm <sup>2</sup> )	80	75	73	
Rázová pevnost (Nmm/mm <sup>2</sup> )	46	52	50	
Tažnost (%)	4.8	4.8	5.3	
Pevnost v tlaku (N/mm <sup>2</sup> )	126	132	130	
E-modul z ohybové zkoušky (N/mm <sup>2</sup> )	3400	3300	3300	
Cyklická ohybová pevnost dle DLR (DFVLR)	10%	1.7 exp4	1.2 exp4	2.0exp6
	90%	1.3exp6	5.6 exp6	2.0exp6

**Nárůst teploty**



**Modul pružnosti ve smyku**

**Laminační pryskyřice L 285 + H 286**  
 Předtvrzeno: 24 hod/ 20 – 25°C  
 Temperace viz diagram



**Teplota skelného přechodu (Tg)**

Předtvrzeno při 20 – 25 °C Temperováno-----	15hod/40 °C	15hod/50 °C	15hod/60 °C	10hod/80 °C
L 285 + H 285	60 °C	68-73 °C	73-75 °C	75-80 °C
L 285 + H 286	60 °C	70-75 °C	75-80 °C	85-90 °C
L 285 + H 287	60 °C	70-75 °C	80-85 °C	95-100 °C

Měřeno systémem Mettler TA 4000

**Data zpevněného systému**

GfK- zkušební tělísko: 16 vrstev sklo-tkaniny Interglas 92626 I 550, 4 mm tloušťka  
 CfK- zkušební tělísko: 8 vrstev carbon-tkaniny Interglas 02924, 2 mm tloušťka  
 SfK- zkušební tělísko: 15 vrstev aramidové tkaniny Interglas 98613, 4 mm tloušťka  
 Obsah vláken při zkoušce. 40-45%objemových, přepočteno na 43% objemových

**L 285 + H 285**

Tvrzeno: 24 hod/20 – 25 °C + 15 hod/50 – 55 °C		GfK	CfK	SfK
Ohybová pevnost	(N/mm2)	484	712	349
Pevnost v tahu	(N/mm2)	485	541	508
Pevnost v tlaku	(N/mm2)	315	383	138
Rázová pevnost	(N/mm2)	41	51	28
E – modul ze zkoušky ohybem	(kN/mm2)	21	43	27

**L 285 + H 286**

Tvrzeno: 24 hod/20 – 25 °C + 15 hod/50 – 55 °C		GfK	CfK	SfK
Ohybová pevnost	(N/mm2)	483	693	339
Pevnost v tahu	(N/mm2)	485	532	479
Pevnost v tlaku	(N/mm2)	321	350	135
Rázová pevnost	(N/mm2)	38	48	29
E – modul ze zkoušky ohybem	(kN/mm2)	21	43	26

**L 285 + H 286**

Tvrzeno: 24 hod/20 – 25 °C + 15 hod/50 – 55 °C		GfK	CfK	SfK
Ohybová pevnost	(N/mm2)	483	693	339
Pevnost v tahu	(N/mm2)	485	532	479
Pevnost v tlaku	(N/mm2)	321	350	135
Rázová pevnost	(N/mm2)	38	48	29
E – modul ze zkoušky ohybem	(kN/mm2)	21	43	26



SKOLIL KOMPOZIT s.r.o.  
 Jankovcova 1059/12  
 170 00 Praha 7

tel/fax: 220 873 550, 551, 553 www.skolil.cz

Lange Ritter L 285 + H285/ H286/ H287

strana 4



# resoltech 1800

Hardeners 1803 to 1808

## Structural epoxy system for infusion & injection



- Adjustable pot life from 18min to 7h
- Very low viscosity and high wetting power
- $T_g$  up to 120°C
- Snap curing (2 minutes) with 1808 hardener
- Excellent cross linking properties even at low post-curing temperatures



## INTRODUCTION

RESOLTECH 1800 is an advanced infusion and injection epoxy resin system with an **extremely low viscosity** for fast and safe wet out by infusion and injection.

It features high mechanical properties, **a service temperature up to 130°C** and up to 7h of infusion or injection time.

The **constant low viscosity** right until gel time offers reliable impregnation and air release throughout the infusion or injection process.

This system has excellent cross linking properties and enables to release from plugs even after low post curing temperatures at 40°C.

It is suitable for both **tooling and parts manufacturing**. Typical applications include large marine structures, wind turbine blades, moulds for prepreg production.

Monolithic carbon fibre infusions may be performed with fiber ratios of over 68% with 0,4% porosity.

The superior interlaminar shear strength of this system is one of its key advantages with its improved **health and safety formulation** following the latest EU regulation (CE) n° 453/2010.

## MIXING RATIO

The mixing ratio must be accurately followed. It is not possible to change the ratio, it would result in lower mechanical properties. The mixture should be thoroughly stirred to ensure full homogeneity.

Systems	1800/1803	1800/1805	1800/1807	1800/1808
Mixing ratio by weight	100/30	100/17	100/16	100/38

## APPLICATION

- Thermosetting products generate heat when curing. The amount of heat generated varies with the hardener used, the temperature and the quantity of resin mixed. It is therefore necessary to only mix the necessary amount usable within the given pot life.
- Keeping the mixture in flat open containers reduces the risks of exothermic reaction as the mixture will heat up more in a mass than in a film. Automatic mixing and dispensing devices solve the exothermy problem by mixing at the required speed for the infusion.

RESOLTECH 1800 system is formulated for infusion and injection applications. It is recommended to infuse with a resin transfer medium onto the laminate or through the core when prepared with a special grooving for infusion. Controlling the resin temperature, workshop temperature and humidity is important. The reinforcements should not present any excessive moisture content as it may modify the infusion progress through the fibers.

## PHYSICAL CHARACTERISTICS

### 1 Visual aspect

**1800 :**  
Opalescent neutral liquid

**1803 to 1808 :**  
Transparent to yellow liquid

**Mix :**  
Neutral to transparent yellow liquid

### 2 Density

References	1800	1803	1805	1807	1808
Density at 23°C	1.15	0.94	0.94	0.99	0.99
Mixed density at 23°C	-	1.10	1.12	1.13	1.11

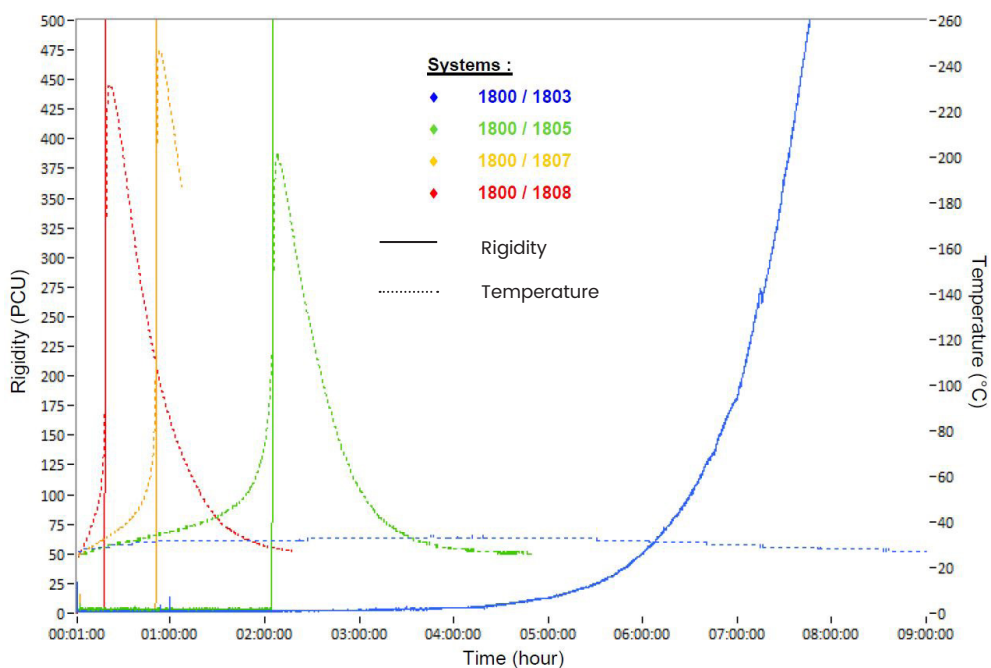
ISO 1675, ± 0.05 tolerance

### 3 Viscosity

References	1800	1803	1805	1807	1808
Viscosity at 23°C (mPa.s)	900	11	15	20	130
Mixed viscosity at 23°C (mPa.s)	-	190	250	273	325

ISO 12058.2, ± 15% tolerance

Mixed viscosity evolution vs. time on 70mL at 23°C



Datasheet V6 - 23.03.2018 / Previous version - 08.06.2016

315

## REACTIVITIES

Systems	1800/1803	1800/1805	1800/1807	1800/1808
Gel time on 70mL at 23°C (4cm high mix)	7h	2h04min	50min	18min
Time at exothermic peak on 70 mL at 23°C	3h45min	2h05min	53min	21min
Temperature at exothermic peak on 70mL at 23°C	34°C	201°C	246°C	232°C
Gel time on 2mm thick film at 23°C	8h20min	7h17min	3h	1h20min
Demolding time at 100°C on a 2mm film	-	-	-	2min30sec

Reactivity measurements realized on Trombotech®

## CURING AND POST-CURING

With 1805 hardener, parts should not be released from the mould without initial curing of minimum 8 to 12h at 40°C or 6h at 60°C as it remains brittle without this initial cure.

In order to obtain the maximum thermo-mechanical properties, it is necessary to respect the recommended curing cycle. The table below shows the glass transition temperatures (DMA) according to different curing cycles.

Systems		1800/1803	1800/1805	1800/1807	1800/1808
14 days at 23°C	T <sub>g</sub>	42.4°C	46.3°C	48.6°C	49.1°C
	Shore D Hardness	88	88	89	89
16h at 60°C	T <sub>g</sub>	54.6°C	64.9°C	65.9°C	66.7°C
	Shore D Hardness	88	89	89	90
6h at 60°C + 10h at 120°C	T <sub>g</sub>	70.9°C	111.2°C T <sub>g,max</sub> 119.8°C	95°C	-

T<sub>g</sub> measured on Kinetech®  
Hardness : ISO 868

## MECHANICAL PROPERTIES

Systems		1800/1803	1800/1805	1800/1807	1800/1808
14 days at 23°C	FLEXION Modulus	3.22 GPa	3.55 GPa	3.48 GPa	3.04 GPa
	Maximum strength	89.8 MPa	76.9 MPa	104.0 MPa	93.7 MPa
	Elongation at break	3.1%	2.3%	3.2%	4.2%
16h at 60°C	FLEXION Modulus	3.15 GPa	3.10 GPa	2.98 GPa	2.81 GPa
	Maximum strength	108.4 MPa	95.0 MPa	116.5 MPa	97.0 MPa
	Elongation at break	5.0%	2.1%	6.0%	5.5%

Measurements on pure resin according to the following standard : ISO 178

Datasheet V6 - 23.03.2018 / Previous version - 08.06.2016

4 | 5

## PACKAGING

### 1800/1803 :

- Plastic jerrycan kit of 1kg + 0.3kg
- Plastic jerrycan kit of 5kg + 1.5kg
- Plastic drum kit of 25kg + 7.5kg
- Drum kit of 200kg + 2 x 30kg

### 1800/1805 :

- Plastic jerrycan kit of 1kg + 0.17kg
- Plastic jerrycan kit of 5kg + 0.85kg
- Plastic drum kit of 25kg + 4.25kg
- Drum kit of 200kg + 2 x 17kg
- IBC kit of 1000kg + 170kg

### 1800/1807 :

- Plastic jerrycan kit of 1kg + 0.16kg
- Plastic jerrycan kit of 5kg + 0.8kg
- Plastic drum kit of 25kg + 4kg
- Drum kit of 200kg + 2 x 16kg
- IBC kit of 1000kg + 160kg

### 1800/1808 :

- Plastic jerrycan kit of 1kg + 0.38kg
- Plastic jerrycan kit of 5kg + 1.9kg
- Plastic drum kit of 25kg + 9.5kg
- Drum kit of 200kg + 3 x 25.33kg
- IBC kit of 1000kg + 2 x 190kg

## HEALTH & SAFETY

Skin contact must be avoided by wearing protective nitrile gloves & overalls or other protective clothing.

Eye protection should be worn to avoid risk of resin, hardener, solvent or dust entering the eyes. If this occurs flush the eye with water for 15 minutes, holding the eyelid open, and seek medical attention.

Ensure adequate ventilation in work areas. Respiratory protection should be worn with ABEKP coded filters.

Resoltech issues full Material Safety Data Sheet for all hazardous products. Please ensure that you have the correct MSDS to hand for the materials you are using before commencing work.

## TRANSPORT & STORAGE

Keep containers sealed and away from heat and cold preferably between 10°C and 30°C in a well ventilated area. Our products are guaranteed in their original packaging (check expiry date on the label).



The data provided in this document is the result of tests and is believed to be accurate. We do not accept any responsibility over the mishandling of these products and our liability is limited strictly to the value of the products we manufacture and supply.



249, Avenue Gaston Imbert  
13790 ROUSSET  
FRANCE

Tel. : +33 (0)4 42 95 01 95  
Fax : +33 (0)4 42 95 01 98  
export@resoltech.com



Delivery programme and characteristics for  
Tenax® IMS65 filament yarn

Brand name	Tenax®	
Production site	E	
Product designation	IMS65 E23 24K 830tex	
Sizing properties	E23	
Number of filaments	24.000	
Nominal linear density <sup>1)</sup>	[tex]	830
Twist	[t/m]	0
Running length per kg	[m/kg]	1200

1) without sizing

**Characteristics (typical values)**

Filament diameter	[µm]	5
Density	[g/cm <sup>3</sup> ]	1.78
Tensile strength	[MPa]	6000
Tensile modulus	[GPa]	290
Elongation at break	[%]	1.9
Specific electrical resistance	[Ω cm]	1.45 x 10 <sup>-3</sup>

**Sizing properties for fiber family IMS**

IMS (Intermediate Modulus) is tailored to suit applications where strength and stiffness are of ultimate priority.

E23 = Type with ca. 1.3 % sizing based on epoxy resin

Please contact our sales team any time for choosing the right type. The stated numbers are typical values. For design purposes please request fiber specification.

Please note the application (aerospace or industry & sports) on your order.



## 3M™ Scotch-Weld™ EC-9323 B/A

### Two Part Structural Adhesive

#### Product Description

3M™ Scotch-Weld™ Structural Epoxy Adhesive EC-9323 B/A is a two component epoxy paste adhesive which cures at room temperature or with mild heat to form a tough, impact resistant structural bond. It has an excellent adhesion to a wide variety of substrates such as metals, glass, ceramics and plastics, incl. GFRP and CFRP. Once cured it provides extremely high shear and peel strength over a wide temperature range, with outstanding resistance to harsh environments and chemicals commonly encountered in aerospace applications.

#### Key Features

- Toughened system providing extremely high shear and peel strength
- Wide service temperature range
- Outstanding environmental resistance
- Full room temperature processing



#### Product Characterization

The following technical information and data should be considered representative or typical only and should not be used for specification purpose

General Properties	Part B	Part A
Colour	Off-white	Red-orange
Base	Modified epoxy	Modified amine
Consistency	Thixotropic paste	Slight gel
Density	1.18 g / cm <sup>3</sup>	1.06 g / cm <sup>3</sup>
Solids	100 %	100 %
Viscosity <sup>(a)</sup>	700 Pas	18 Pas
Mix ratio by weight (by volume)	100 : 27 wt. (100 : 30 vol.)	
Work life <sup>(b)</sup> / Open Time at 23 ± 2 °C	150 minutes / 20 minutes	
Strength build-up at 23 ± 2 °C		
Handling strength <sup>(c)</sup>	4-5 hours	
Full cure cycle	14 days at room temperature	
Packaging	Cans and pails	

<sup>(a)</sup> Brookfield RVF Spindle 7, 2 rpm

<sup>(b)</sup> 50 g of mixed adhesive

<sup>(c)</sup> Time to reach 1 MPa Overlap Shear Strength

Two Part Structural Adhesive Scotch-Weld™ EC-9323 B/A

Attachment of LabWI-00002



## Product Performance

The following data show typical values obtained with Scotch-Weld™ EC-9323 B/A on unprimed, sulfochromic etched, 2024 T3 aluminium. The samples have been cured for 15 days at room temperature, if not stated otherwise. To control the bond line thickness, approximately 1 wt. % of glass beads, 90 – 150 µm diameter were added to the adhesive.

Mechanical Properties		Test Temperature	Cured for 15 days at 23 °C	Cured for 2 hours at 65 °C
<b>Overlap Shear Strength</b> EN 2243-1		-55 °C	38 MPa	42 MPa
		23 °C	36 MPa	40 MPa
		80 °C	22 MPa	22 MPa
		120 °C	4 MPa	4 MPa
		150 °C	2 MPa	-
<b>Overlap Shear Strength</b> EN 2243-1	Stainless steel	23 °C	-	27 MPa
	CFRP, GFRP epoxy matrix resin	23 °C	-	28 MPa <sup>(d)</sup>
	PMMA	23 °C	-	3 MPa <sup>(d)</sup>
<b>Floating Roller Peel Strength</b> EN 2243-2		-55 °C	120 N / 25 mm	90 N / 25 mm
		23 °C	170 N / 25 mm	190 N / 25 mm
		80 °C	145 N / 25 mm	145 N / 25 mm
<b>Impact Resistance ANFOR NF 76-115</b>		23 °C	17,4 kJ / m <sup>2</sup>	32,2 kJ / m <sup>2</sup>

<sup>(d)</sup> Substrate Failure

## Environmental Ageing

The following data show typical values obtained with Scotch-Weld™ EC-9323 B/A after 750 hours exposure to different media and environments to determine the aging resistance. The samples have been cured for 15 days at room temperature.

Mechanical Properties	Environment	Test Temperature	Results
<b>Overlap Shear Strength</b> EN 2243-1	Demineralized water at 23 ± 2 °C	23 °C	34 MPa
	Gasoline super at 23 ± 2 °C	23 °C	36 MPa
	Engine oil (20W40) 23 ± 2 °C	23 °C	36 MPa
	Hydraulic fluid skydrol 500B at 23 ± 2 °C	23 °C	37 MPa
	JP4 fluid at 23 ± 2 °C	23 °C	36 MPa
	5 % Salt spray at 23 ± 2 °C	23 °C	34 MPa
	Hot / Wet 70 °C, ≥ 95% R.H.	23 °C	33 MPa
	Dry heat at 120 ± 2 °C	23 °C	35 MPa

## 3M™ Scotch-Weld™ Structural Epoxy Adhesive EC-9323-150 B/A

Scotch-Weld™ EC-9323-150 B/A is a product modification of Scotch-Weld™ EC-9323 B/A. There are no significant differences in terms of performance. It contains 1 wt % of glass beads 90 – 150 µm diameter for bond line thickness control. Slight differences can be observed in density and viscosity.

## Handling, Application, Storage

### Precautionary Information

Refer to product label and Material Safety Data Sheet (MSDS) for health and safety information before using this product. For MSDS visit our website [www.3M.com/msds](http://www.3M.com/msds).

### Instructions for use

While this information is provided as general application guideline based upon typical conditions, it is recognized that no two applications are identical due to, among other things, differing assemblies, methods of heat and pressure application, production equipment and other limitations. It is therefore suggested that experiments be run, within the actual constraints imposed to determine optimum conditions for your specific application and to determine suitability of product for particular intended use.

Process step	Instruction
Surface preparation	<p>The strength and durability of a bonded joint are dependent on proper treatment of the surface to be bonded. An acclimated, thoroughly cleaned, dry, grease-free surface is essential for maximum performance. Cleaning methods which will produce a break free water film on metal surfaces are generally satisfactory.</p> <p>At the very least, joint surfaces should be cleaned with a good proprietary degreasing agent and mechanically abraded, e.g. with 3M Scotch-Brite™ 7447. Abrading should be followed by a second degreasing treatment, e.g. with 3M 08984 Adhesive Cleaner.</p> <p>Optimum processing temperature for substrates and adhesive is around room temperature of 23 °C.</p>
Application	<p>This product consists of two parts. Combine Part B and Part A in a separate container just prior to application in the proportions specified. <b>Note:</b> Mix ratio deviations above +/- 5 % have significant influence on material performance. Mix both components thoroughly until a uniform colour is obtained. <b>Important:</b> Be careful when mixing quantities larger than 100 grams, because exothermic reaction may occur. Apply adhesive to parts to be bonded before the work life expires, e.g. by spatula. <b>Note:</b> Work life depends to some extent on mixed quantity and the shape of the container. Use of a shallow container will minimize the quantity impact. In order to obtain optimum mechanical performance, the joint components should be assembled and clamped as soon as the adhesive has been applied and before end of the open time. A fixation of the joint and an even contact pressure throughout the joint area during cure will ensure optimum performance. Maximum shear strength is obtained with 0.10 – 0.20 mm bond line thickness. Close the containers after use to protect the material against humidity.</p>
Curing	<p>Once mixed, Scotch-Weld™ EC-9323 B/A will gel in 3 hours, build up handling strength in 4-5 hours and fully cure within 14 days at room temperature. <b>Note:</b> Lower temperature will slow down the reaction times. Curing time can be accelerated by mild heat. Following times and temperatures will result in a full cure:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 14 days at 23 ± 2 °C</li> <li>▪ 2 hours at 65 ± 2 °C</li> <li>▪ 15 minutes at 100 ± 2 °C</li> </ul> <p><b>Note:</b> The curing temperature may have influence on the final product performance.</p>
Cleaning	<p>Excess uncured adhesive can be cleaned with ketone type solvents. After cure the adhesive can be removed mechanically. <b>Note:</b> When using solvents, extinguish all ignition sources, including pilot lights, and follow the manufacturer's precautions and instructions for use.</p>
Storage and Handling	<p>Store the product at room temperature. Shelf life is minimum 12 months from date of shipment in the original unopened containers. The specific expiry date is mentioned on the product label.</p>

**Important notice:** All statements, technical information and recommendations in this data sheet are based on tests 3M believes to be reliable, but the accuracy or completeness of those tests is not guaranteed. All technical data and information should be considered typical or representative only and should not be used for specification purposes. Given the variety of factors that affect the use and performance of a 3M product, some of which are uniquely within the user's knowledge and control, it is essential that the user evaluate the 3M product before use to determine the suitability of the 3M product for the intended use and method of application. All questions of liability relating to the 3M product are governed by the terms of the sale subject to, where applicable, the prevailing law.



Automotive and Aerospace Solutions Division  
 European Aerospace Laboratory  
[www.3m.eu/aerospace](http://www.3m.eu/aerospace) © 3M 2017. All rights reserved.  
 Reference: 222

Two Part Structural Adhesive Scotch-Weld™ EC-9323 B/A

Page 3 of 3

Attachment of LabWI-00002