



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

## NÁVRH SPOJOVACÍCH TYČÍ ZAVĚŠENÍ KOL Z KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ

COMPOSITE TRACK RODS DESIGN

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Petr Olišar

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Pavel Ramík

BRNO 2017

## Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav automobilního a dopravního inženýrství  
Student: **Petr Olišar**  
Studijní program: Strojírenství  
Studijní obor: Základy strojírenství  
Vedoucí práce: **Ing. Pavel Ramík**  
Akademický rok: 2016/17

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.1111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

### Návrh spojovacích tyčí zavěšení kol z kompozitních materiálů

#### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Nápní práce je vytvořit návrh spojovacích tyčí zavěšení kol vozidla Formule Student z kompozitních materiálů, zhotovit funkční vzorky a provést s nimi dostupné zkoušky a vyhodnotit vhodnost navržených prvků pro použití u nové generace vozidla.

#### Cíle bakalářské práce:

Provést rešerši současného stavu konstrukčního provedení spojovacích tyčí zavěšení kol (Track-Rods), se zaměřením zejména na prvky z kompozitních materiálů a používané vložky úchytů klouby (tzv. inserts).

Vytvořit konstrukční návrh kompozitních tyčí náprav vozidla Formule Student včetně případné volby polotovarů. Navrhnout způsob upevnění vložek úchytů kloubů, soustředte se především na jejich vhodný tvar a délku, případně i na další důležité parametry.

Zrealizovat výrobu zkušebních vzorků navržených pro odzkoušení, zejména různých vložek (insertů). Navrhnout dostupné zkoušky vyrobených vzorků a provést vybrané experimenty. Výsledky experimentů porovnat a vyhodnotit.

Zhodnotiti navrženou konstrukci kompozitních spojovacích tyčí a vyslovit se k vhodnosti jejího použití u nové generace vozidla Formule Student.

#### Seznam literatury:

GILLESPIE, Thomas. D. *Fundamentals of Vehicle Dynamics*. Warrendale: Society of Automotive Engineers, 1992. 519 s. ISBN 1-56091-199-9.

CHAWLA, Krisham Kumar. *Composite Materials*. New York: Springer New York, 2012. 542 s. ISBN 978-0-387-74365-3.

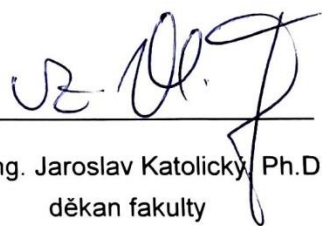
MILLIKEN, William a MILLIKEN, Douglas. Race Car Vehicle Dynamics. 1st edition. Warrendale: SAE, 1995. 857 s. ISBN 1-56091-526-9.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17.

V Brně, dne 20. 10. 2016



prof. Ing. Václav Píštěk, DrSc.  
ředitel ústavu



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

## ABSTRAKT

Práce se zabývá konstrukcí spojovacích tyčí zavěšení kol Formule Student. Cílem práce je navrhnout lepený spoj mezi karbonovou trubkou a hliníkovou vložkou pro novou generaci vozu Dragon týmu TU Brno Racing.

Praktická část se zaměřuje na výzkum lepeného spoje a vhodných vlastností lepeného úchytu s optimálními pevnostními a hmotnostními parametry. Obsahuje pevnostní zkoušky při statickém zatížení a konstrukční návrh insertu.

### KLÍČOVÁ SLOVA

Lepený spoj, zavěšení, podvozek, uhlíková vlákna, pevnostní zkoušky, Formule Student, TU Brno Racing

## ABSTRACT

This thesis deals with trackrods of Formula Student car. Aim of this thesis is to create glue joint between CFRP tube and aluminium insert for a new generation Dragon suspension by the TU Brno Racing.

Practical part is focused on adhesive static shear strength testing and appropriate insert design.

### KEYWORDS

Glue joint, suspension, carbon fibre reinforced plastic, strength tests, Formula Student, TU Brno Racing

## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

OLIŠAR, P. *Návrh spojovacích tyčí zavěšení kol z kompozitních materiálů*. Brno, 2017. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství. 50 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Pavel Ramík.



## ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Pavla Ramíka a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 26. května 2017

.....

Petr Olišar

## PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval svým rodičům a přátelům za obrovskou podporu při studiu. Také děkuji Ing. Pavlu Ramíkovi za vedení mé práce a přínosné podněty. Rovněž děkuji týmu TU Brno Racing, který mi umožnil výrobu vzorků pro zkoušky.

## OBSAH

Úvod .....	10
1    Formula SAE/Formula Student .....	11
1.1    Statické disciplíny .....	11
1.2    Dynamické disciplíny .....	12
1.3    Základní pravidla soutěže Formule Student .....	13
1.4    Pravidla týkající se podvozku .....	13
2    Zavěšení se suvnými tyčemi .....	14
2.1    Pull Rod zavěšení .....	14
2.2    Push rod zavěšení .....	14
3    Spojovací tyče na Formuli Student .....	16
3.1    Elbflorace TU Dresden - KatE .....	17
3.2    University of Auckland Formula SAE Team .....	17
3.3    Materiály a typy zavěšení používané na FS .....	18
4    Lepení .....	19
4.1    Přednosti lepeného spoje .....	19
4.2    Nedostatky lepeného spoje .....	20
4.3    Rozdělení lepidel .....	20
4.4    Typy poruch lepených spojů .....	20
5    Návrh a zkoušky .....	22
5.1    Zkoušky lepených spojů .....	22
5.2    Statická zkouška tahem .....	22
5.2.1    Použité trubky .....	23
5.2.2    Použité lepidlo .....	23
5.2.3    Použitá vložka .....	23
5.2.4    Postup výroby zkušebních vzorků .....	24
5.2.5    Zkušební stroj .....	24
5.2.6    Zkoušené vlastnosti lepeného spoje .....	24
5.2.7    Metodika vyhodnocení .....	25
6    Praktické zkouška – naměřené hodnoty a vyhodnocení .....	26
6.1    Vzorek A .....	26
6.2    Vzorek B .....	27
6.3    Vzorek C .....	28
6.4    Vzorek D .....	29
6.5    Vzorek E .....	30
6.6    Vzorek F .....	31

---

7	Vyhodnocení zkoušek .....	32
7.1	Vliv délky .....	32
7.2	Vliv drsnosti povrchu vložky.....	32
7.3	Vliv hloubky lepidla .....	33
7.4	Vliv tvaru .....	34
8	Konstrukční návrh spojovacích tyčí .....	35
8.1	Zatěžující síly.....	35
8.2	Volba použité trubky .....	35
8.2.1	Zatížení v tahu .....	35
8.2.2	Zatížení v tlaku .....	37
8.3	Výpočet délky lepeného spoje .....	38
9	Porovnání hmotností .....	39
	Závěr.....	41
	Seznam použitých zkratk a symbolů .....	46
	Seznam příloh.....	48

## ÚVOD

Jedním z důležitých parametrů každé součástky a každého stroje je jejich hmotnost. Již od nepaměti je snahou inženýrů zkonstruovat stroj s co možná nejlepším poměrem hmotnosti k vykonávané práci.

Hmotnost zásadním způsobem ovlivňuje výkonnost a efektivitu, resp. spotřebu paliva stroje, což je zejména v dnešní době, kdy neustále narůstá politicko-spoločenský tlak na snižování emisní stopy v dopravě, jež nutí výrobce k radikálním změnám konstrukce jejich strojů, element, který nelze zanedbat. V posledních letech tak můžeme vidět postupné zavádění exotických materiálů dříve vyhrazených jen pro úzce specifikované stroje do velkosériové výroby. Mezi takovéto materiály patří vysoko-pevnostní oceli, titanové, hliníkové a hořčíkové slitiny a také kompozity na bázi uhlíkových vláken, jež mají při nižší hustotě stejné či lepší mechanické vlastnosti. S postupným snižováním ceny těchto materiálů, které dříve nacházely uplatnění předně v oblasti letectví, kosmonautiky, motorsportu nebo vojenství, však dochází i k aplikaci v oblastech spotřebního využití.

Při návrhu každé součásti je nutné brát do úvahy mnoho faktorů - charakter zatěžování, požadavky na bezpečnost a spolehlivost a v neposlední řadě náklady na výrobu. Nejen vhodný výběr materiálů a jejich použití na správných místech však vede ke snížení hmotnosti, ale také vhodný technologický postup. Od druhé poloviny 20. století dochází zejména v automobilovém a leteckém průmyslu k rozmachu lepených spojů, které s sebou přinášejí celou řadu unikátních vlastností.

Nízká hmotnost, zejména pak neodpružených součástí zavěšení, je v soutěži Formule Student klíčovým parametrem úspěchu v dynamických disciplínách. Snížení hmotnosti vede ke zlepšení akcelerace vozu, zkrácení brzdové dráhy, vyšší agilitě v zatáčkách a nižší spotřebě paliva. Uplatnění tak zde nalézají nejrůznější kompozity jako například CFRP materiály a lepené spoje.

.

# 1 FORMULA SAE/FORMULA STUDENT

Formula SAE je celosvětová soutěž určená pro studenty technických vysokých škol. Pravidla soutěže říkají, že studenti musí vyvinout, vyrobit a následně předvést vlastní monopost pro amatérského víkendového jezdce. Avšak nejedná se o čistě motoristickou soutěž, Formule Student je předně komplexní vzdělávací projekt, který nabízí studentům možnost získat skvělé reálné zkušenosti již během studia.

Soutěž byla založena v roce 1981 na University of Texas ve Spojených státech Amerických jako Formula SAE pod záštitou společnosti Society of Automotive Engineering a po téměř dvaceti letech se dostala do Evropy. Dnes je po celém světě na šest set univerzitních týmů a každoročně se koná kolem dvaceti závodů. [1]

V roce 1997 se do soutěže zapojil první evropský tým a to z university v britském Leedsu. O rok později byla v Anglii založena evropská divize soutěže pod názvem Formula Student organizovaná společností IMeche (Institution of Mechanical Engineers). Svou vlastní odnož Formule Student mají od roku 2000 také Australané (Formula SAE-A) a Japonci (Formule Japan). [1]

V roce 2010 vznikla samostatná kategorie Formula Student Electric, ve které jsou vozy poháněny nikoli spalovacím motorem (FSC), nýbrž elektromotorem napájeným bateriemi. O sedm let později byla pro nadcházející ročník Formule Student Germany (FSG) vyhlášena nová kategorie Formula Student Driverless (FSD) pro autonomní vozidla. [2]



Obr. 1 Formula Student Germany 2016 [3]

Patrony soutěže jsou významné osobnosti ze světa motorsportu jako například Pat Symonds, James Allison, Paddy Lowe nebo Ross Brown.

*„Jediné dvě inovativní formy motorsportu jsou Formule 1 a Formule Student.“* Ross Brown.

## 1.1 STATICKÉ DISCIPLÍNY

Poté, co vůz projde technickou přejímkou, přichází na řadu statické disciplíny. V design prezentaci je úkolem týmu připravit dokument shrnující stavbu vozu a následně obhájit použitá technická řešení před porotci z řad inženýrů z automobilového průmyslu.

Další disciplínou je nákladová studie nebo-li Cost report, jež se skládá z dokumentu, který obsahuje cenu každé součástky od nákupu polotovaru, obrobení na stroji, povrchovou úpravu až po montáž na auto při uvažované výrobě tisíce kusů ročně.

Poslední statickou disciplínou je Business prezentace, jejímž cílem je prezentovat tým jako fiktivní firmu a získat potenciální investory.

*Tab. 1 Bodové hodnocení statických disciplín na FSG 2017 [4]*

Design prezentace	150 bodů
Nákladová studie	100 bodů
Business prezentace	75 bodů

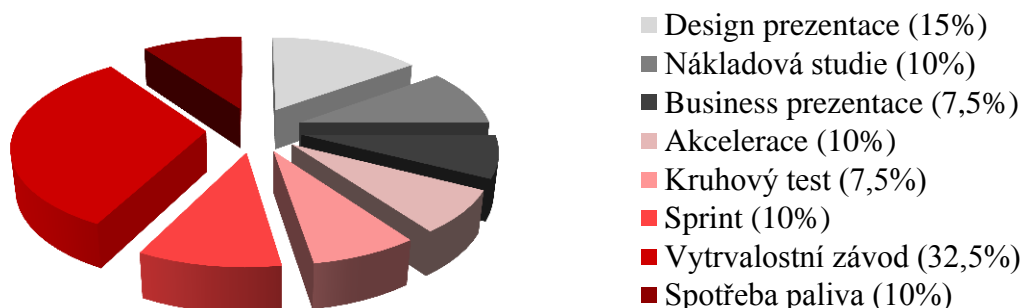
## 1.2 DYNAMICKÉ DISCIPLÍNY

Po statických disciplínách následují dynamické konající se ve dvou dnech. Jedná se o akceleraci, kruhový test, sprint na jeden kilometr a vytrvalostní závod. Akcelerace se jede na pětasedmdesát metrů dlouhé trati s pevným startem. Nejlepší týmy se s časem dostanou pod čtyři sekundy. Kruhový test na dráze ve tvaru osmičky ukáže kvality podvozku. Disciplína Autokros složená z jednoho kola na okruhu vytyčeném kuželkami slouží také jako kvalifikace do hlavního závodu. Vytrvalostní závod se jede na dvaadvacet kilometrů, v půli se řidiči povinně střídají, hodnotí se zde také spotřeba vozu.

*Tab. 2 Bodové hodnocení dynamických disciplína FSG 2017 [4]*

Akcelerace	75 bodů
Kruhový test	75 bodů
Autokros	100 bodů
Vytrvalostní závod	325 bodů
Spotřeba paliva	100 bodů

*Graf 1 Bodové hodnocení kategorie Combustion FS Germany [4]*



### 1.3 ZÁKLADNÍ PRAVIDLA SOUTĚŽE FORMULE STUDENT

Pravidla vyžadují jednomístné vozidlo s nezakrytými koly formulového typu. Restrikce jsou zaměřeny primárně na bezpečnost jezdce, nicméně cíleně ponechávají dostatek prostoru pro kreativitu konstruktérů. Zásadním rozdílem od de facto všech ostatních motoristických soutěží je fakt, že ve Formuli Student neexistuje pravidlo pro minimální hmotnost vozu. Od sezony 2017 už například na FSG neplatí ani omezení maximálního objemu motoru. [4]

### 1.4 PRAVIDLA TÝKAJÍCÍ SE PODVOZKU

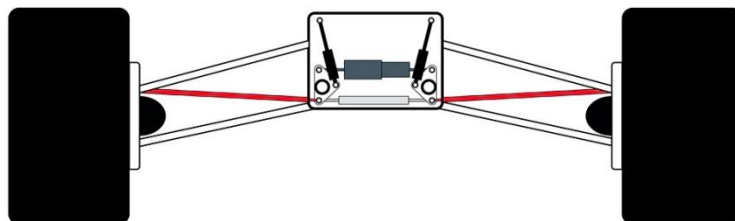
Část pravidel evropské soutěže Formule Student týkající se podvozku a zavěšení vozidla je poměrně strohá. Minimální rozvor vozidla je stanoven na 1525mm, rozchod užší nápravy musí dosahovat alespoň 75% rozchodu té širší. Vozidlo musí být vybaveno tlumiči a minimální vertikální dráha, ve které se může kolo pohybovat, je 50 mm, přičemž alespoň 25mm musí připadat na propad a 25 mm na stlačení (vztahuje se k situaci, kdy řidič sedí ve voze). Aktivní zavěšení podvozku není zakázáno. [4]

## 2 ZAVĚŠENÍ SE SUVNÝMI TYČEMI

Velká část závodních vozů má tlumiče a pružiny umístěny uvnitř karoserie mimo nápravy, kdy zavěšení využívá surné tyče k přenosu síly mezi těhlicí a tlumičem. Tento druh zavěšení používají zejména formulová vozidla. Rozlišujeme dva základní typy takového odpružení – push rod a pull rod. Oba typy jsou z kinematického pohledu shodné a teoreticky by měly poskytovat identické vlastnosti. [5][6]

### 2.1 PULL ROD ZAVĚŠENÍ

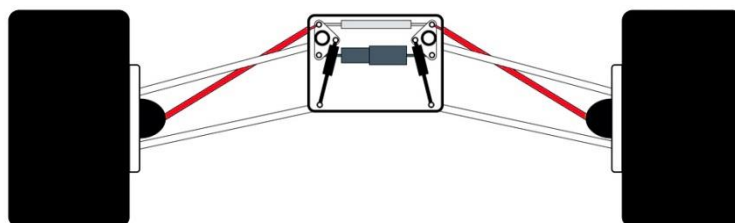
V případě zavěšení typu pull rod dochází při přejezdu nerovností, resp. při pohybu kola vzhůru, k silovému namáhání mezi těhlicí kola a vahadlem, při kterém je spojovací tyč zatěžována tahem. Spojovací tyč je spojena s horním bodem těhlice, případně ramene, a s vahadlem, jež je umístěno ve spodní části rámu.



Obr. 2 Schéma pull rod zavěšení [7]

### 2.2 PUSH ROD ZAVĚŠENÍ

U zavěšení push rod je tomu naopak. Vahadlo je umístěno výše než bod uchycení surné tyče na těhlicí a je namáháno na tlak a na vzpěr. Teoreticky tedy tyč push rodu musí být robustnější než tyč pull. Mezi výhody systému push rod patří většinou snazší servisovatelnost a jednodušší nastavování z důvodu lepšího přístupu k součástkám. Výrazným negativem je avšak vyšší poloha těžiště, nicméně tento fakt může být vykompenzován lepší aerodynamickou účinností v interakci s jinými prvky zavěšení



Obr. 3 Schéma push rod zavěšení [7]

V současné době se na přední nápravě závodních monopostů (Formule 1, speciály LMP1, LMP2, a další) téměř výhradně užívá odpružení typu push rod, zatímco na zadní typu pull rod.

Nelze jednoznačně říci, které řešení je lepší. Při konstrukci je vždy nutné pohlížet na vozidlo jako na komplexní celek a volit takové řešení, jež je pro nás nejlepší. Společnými vlastnostmi

obou řešení je snížení neodpružené hmotnosti, snížení aerodynamického odporu vozidla (suvné tyče na rozdíl od tlumičů umístěných přímo na nápravách méně narušují aerodynamické proudění a obtékání vzduchu kolem nich je "čistší"), zvýšení celkové hmotnosti sestavy z důvodů většího počtu elementů v konstrukci a možnost nastavení ramene otáčení mezi tlumičem a vahadlem. [8][9]

### 3 SPOJOVACÍ TYČE NA FORMULI STUDENT

Spojovací tyče na vozech Formule Student můžeme rozdělit na dva základní typy – ocelové se svařovanými inserty a kompozitní z uhlíkových vláken s vlepenými hliníkovými inserty. Oboje mají své výhody a nevýhody a na to, pro které z nich se tým rozhodne, má vliv celá řada faktorů.

U kompozitních spojovacích tyčí můžeme rozlišit dva hlavní druhy – se šroubovými koncovkami s kulovou hlavou (rodend) a s oky s vlisovaným sférickým ložiskem. Užití lepené vložky a do ní umístěného rodendů s sebou přináší podstatně vyšší riziko fatálního selhání – lomu v oblasti šroubení rodendů, jelikož tato část je, ostatně jako jakékoli jiné šroubové spojení, velmi citlivá na stříh, ke kterému může dojít, jestliže závit není umístěn



*Obr. 4 Typy spojovacích tyčí – nahoře ocelová trubka se svařovaným insertem a rodendy, uprostřed kompozitní trubka s vlepenou vložkou a rodendy, dole kompozitní trubka s oky se sférickými ložisky a šroubem s pravolevým závitem*

přesně v ose trubky. Naproti tomu konstrukce s okem a ložiskem si vynucuje přidání do konstrukce dalších součástí (nejčastěji šroubu s pravolevým závitem) nutných pro možnost nastavení celkové délky spojovací tyče.

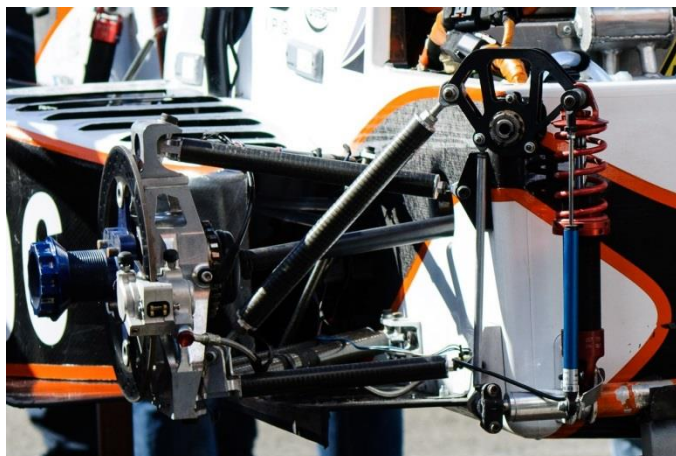
Ocelové spojovací tyče obecně nalézáme spíše u týmů, jež upřednostňují trubkový svařovaný rám. V absolutních číslech použití trackrods z uhlíkových kompozitů nepřináší zásadní úsporu (méně než jedno procento hmotnosti vozu), nicméně je technologicky náročnější, a tak jej preferují spíše týmy z přední části světového žebříčku. Ocelová varianta je levná a rychlá na výrobu.

O tom, jaký materiál tým zvolí, rozhoduje mnoho faktorů. Přední týmy většinou upřednostňují konstrukci z kompozitních dílů, nicméně není to pravidlem. Týmy, jež používají monokok z uhlíkových vláken, téměř vždy mají také ramena a spojovací tyče z kompozitních materiálů (Rennteam Uni Stuttgart e.V., TU Graz Racing Team, CAT-Racing). Naproti tomu týmy, které jezdí s trubkovým prostorovým rámem, povětšinou sahají ke svařované konstrukci z oceli (Nagoya University Formula Team FEM, Curtin Motorsport Team, NSU Formula SAE).

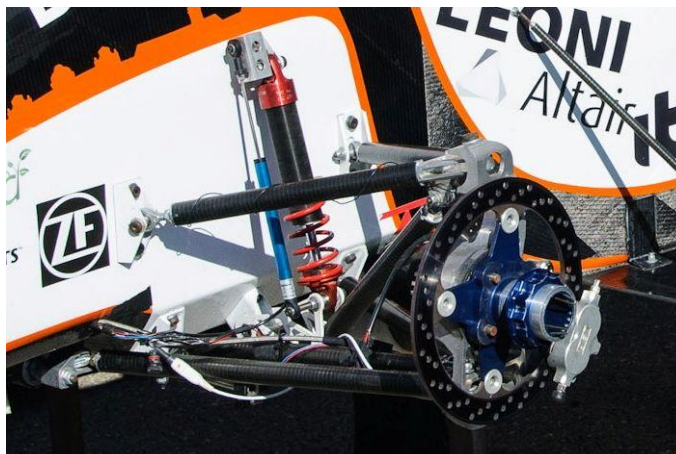
Avšak ne všechny týmy, které mají na svém voze prvky z kompozitních materiálů, je používají všude. Studenti University of Florida z týmu Gator Motorsport zvolili jako materiál na ramena svého monopostu uhlíková vlákna, nicméně u spojovacích tyčí (trackrods) dali přednost oceli.

### 3.1 ELBFLORACE TU DRESDEN - KATE

Tým z Drážďan na své formuli KatE v roce 2013 vozil zavěšení z uhlíkových vláken a to jak na ramenou, tak i spojovacích tyčích. Přední zavěšení je typu pull rod s vertikálně umístěnými tlumiči. Toto vcelku netradiční řešení tým zvolil i na zadní nápravě, zde však v provedení push rod. Takovéto řešení se týmu osvědčilo, sezonu zakončil v první desítce celkového pořadí v kategorii Electric.



Obr. 5 Detail zadní nápravy formule KatE – push rod [10]



Obr. 6 Detail přední nápravy formule KatE- pull rod [11]

### 3.2 UNIVERSITY OF AUCKLAND FORMULA SAE TEAM

K netradičnímu řešení odpružení přední nápravy se uchýlili studenti z University of Auckland Formula SAE Team z Nového Zélandu, když se v roce 2015 rozhodli na svém voze M015 nepoužít zavěšení se suvnými tyčemi a přední tlumiče připojili přímo na masivní spodní ramena. Tým z Aucklandu se s tímto řešením v dané sezoně umístili v první dvacítku světového žebříčku a tento koncept si ponechal i pro následující sezonu.

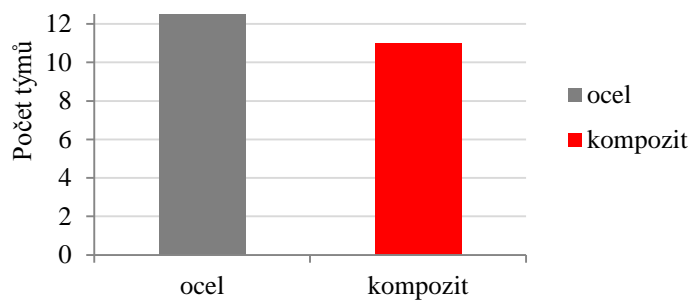


Obr. 7 Formule M015 [12]

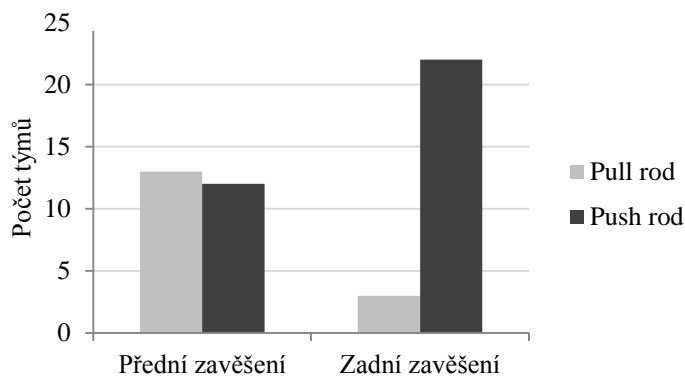
### 3.3 MATERIÁLY A TYPY ZAVĚŠENÍ POUŽÍVANÉ NA FS

Následující grafy přináší ukázkou četnosti použití různých typů spojovacích tyčí ve FS.

Graf 2 Materiály zavěšení používané na FS u předních 25 týmů kategorie Combustion



Graf 3 Typy zavěšení používané na FS u předních 25 týmů kategorie Combustion



## 4 LEPENÍ

Lepením se rozumí spojování součástí prostřednictvím působení nekovové látky – lepidla. Ke spojení dochází díky adhezi (přilnavosti lepidla k materiálu) mezi adherendy (materiály, jež mají být slepeny) a kohezí (mezimolekulárními přitažlivými silami uvnitř lepidla). [13]

V současné době se významně zvyšuje podíl lepení na spojování konstrukčních součástí. Hlavní předností lepení je možnost spojovat rozdílné materiály, jejichž spojení by jinak nebylo možné. Lepené spoje v určitých případech mohou zcela nahradit jiné způsoby mechanického spojování součástí (nýtování, svařování, šroubové spojení). [14]

Zásadní výhodou lepeného spoje ve srovnání s jinými druhy spojování je zvýšení celkové pevnosti daného spoje, jelikož na rozdíl od nýtování a šroubování nedochází ke zmenšení průřezu spojovaných součástí a vzniku koncentrátorů napětí, což umožňuje konstrukci menších a lehčích dílů. Zároveň je napětí ve spoji rozloženo téměř rovnoměrně. Správně dimenzovaný lepený spoj může přinést snížení celkové hmotnosti součástí, protože konstrukce může být jednodušší. [13] [18]

Mezi další klady použití lepených spojů patří také snížení výrobních nákladů, zejména pak u větších součástí, jelikož doba nutná pro vytvrzení lepidla je nezávislá na délce lepeného spoje. A také samotné nanášení lepidla je podstatně rychlejší v porovnání například se svařováním. Dále dochází ke snížení počtu výrobních operací (např. ve srovnání se šroubovými spoji odpadá nutnost vrtání děr, řezání závitů, apod.). [14]

Nicméně nelze říci, že by lepené spoje byly vždy pevnější. V mnoha případech, zejména pak při požadavku na spojení ocelí, je výhodnější užití svařovaného spoje. Při lepení je vždy nutné uvažovat spojovaný materiál. Lepení se uplatňuje předně u lehkých slitin a neželezných kovů. Lepením lze spojovat kovové i nekovové materiály.

Pro správnou funkci lepeného spoje je nutné přesně dodržet technologický postup. Nejlepších výsledků LS dosahuje při namáhání na smyk, naopak se nedoporučuje používání lepidel v případech, kdy hrozí nebezpečí odlupování. [13]

### 4.1 PŘEDNOSTI LEPENÉHO SPOJE

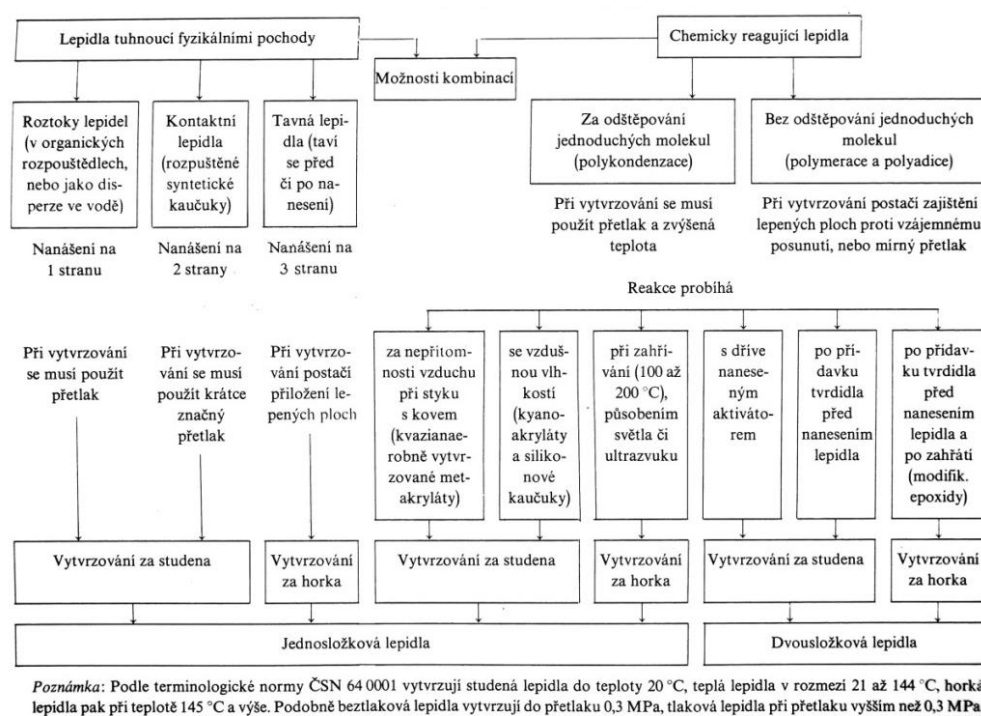
- Vysoká pevnost ve smyku
- Snížení hmotnosti jednotlivých dílů
- Snížení počtu součástí
- Nedochází k (tepelnému) ovlivnění vlastností materiálů při spojování (vzniku pnutí)
- Napětí je ve spoji rozloženo téměř rovnoměrně
- Nedochází ke vzniku koncentrátorů napětí (na rozdíl např. od šroubového nebo nýtovaného spoje)
- Zvýšení únavové životnosti
- Zvýšení korozní odolnosti
- Utěsnění spoje
- Tlumení vibrací a hluku (u polymerních lepidel)
- Lze lepit i velmi křehké, tenké, malé součásti, jež by jinak nešlo spojit jiným způsobem
- Nenarušují vzhled součástí
- Snížení výrobních nákladů

## 4.2 NEDOSTATKY LEPEŇHO SPOJE

- Vysoké požadavky na kvalitu lepeného povrchu (rovinnost, drsnost, čistota)
- Obtížná rozebíratelnost spoje
- Dlouhá doba nabytí plné pevnosti spoje
- Náchylnost ke creepu
- Malá odolnost proti zvýšení teploty a odlupování
- U některých lepidel nutnost tepelného vytvrzení
- Citlivost na tlak (u lepidel s nízkým modulem pružnosti)
- Změna vlastností vlivem tepelného působení
- Degradace vlastností lepeného spoje vlivem stárnutí lepidla
- Obtížné odhalení porušení spoje
- Nutnost přesně dodržovat technologický postup

## 4.3 ROZDĚLENÍ LEPIDEL

Existuje bezpočet druhů lepidel a jejich dělení. Popis jednotlivých druhů je nad rámec této práce.



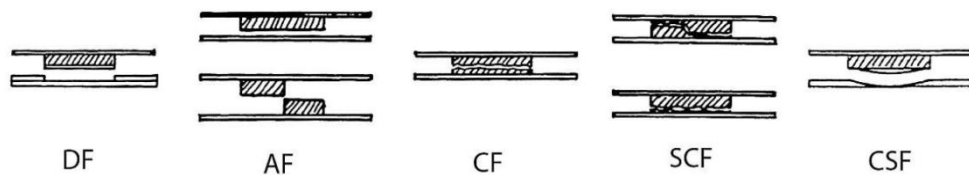
Obr. 8 Rozdělení lepidel podle R. Kohlera [15]

## 4.4 TYPY PORUCH LEPEŇÝCH SPOJŮ

Lepené spoje se hodnotí nejen podle maximální dosažené pevnosti ve smyku, ale také podle typu poruchy, která stojí za selháním spoje. Typy poruch LS popisuje norma ČSN EN ISO 10365. Poruchy lepených spojů po mechanických zkouškách můžeme rozdělit na několik základních typů. [16]

- DF – delaminace substrátu

- AF – adhezivní lom
- CF – kohezivní lom
- SCF – kohezivní lom na hranici substrátu
- CSF – porušení jednoho adherendu



Obr. 9 Typy poruch lepených spojů [16]

## 5 NÁVRH A ZKOUŠKY

Materiály a jejich vzájemná spojení se liší různými fyzikálními, chemickými a mechanickými vlastnostmi. Materiálové zkoušky slouží ke zjištění těchto vlastností. Zkoušky jako takové můžeme rozdělit do dvou hlavních skupin - statické a dynamické.

Zkoušky materiálu, jež se uskutečňují při krátkodobém působení síly, jsou prováděny v tahu, tlaku, ohybu, krutu, nebo stříhu. K dlouhodobým statickým zkouškám řadíme zkoušky tečení materiálu (creep) a relaxace materiálu. [14]

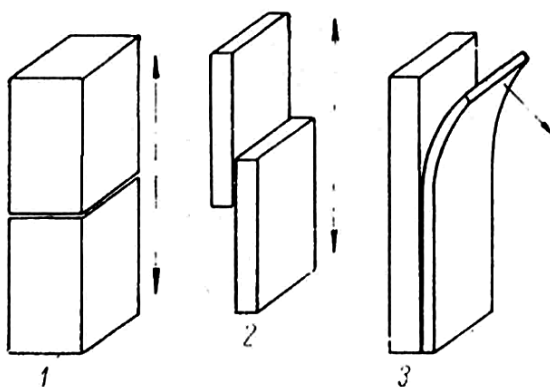
Dynamické zkoušky zkoumají chování materiálu při dlouhotrvajícím cyklickém zatížení, při kterém se dynamicky mění zatěžující síla.

Zkoušky kovových materiálů definuje norma ČSN EN 10002.

### 5.1 ZKOUŠKY LEPENÝCH SPOJŮ

Lepené spoje se testují na tyto druhy namáhání: [17]

- Pevnost v tahu
- Pevnost ve smyku
- Pevnost v odlupování
- Pevnost při rázu
- Únavová zkouška
- Zkouška soudržnosti
- Zkouška lámavosti



Obr. 10 Zkoušky LSI – pevnost v tahu, 2 – pevnost ve smyku, 3 – pevnost v odlupování [17]

### 5.2 STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

Za základní mechanickou zkoušku je považována statická zkouška, při které se zjišťuje chování vzorku při působení konstantního či pomalu lineárně rostoucího silového zatížení, jež vyvolává jednoosou tahovou napjatost.

### 5.2.1 POUŽITÉ TRUBKY

Pro testování byly použity trubky od německé firmy Carbon Composites o vnějším průměru 20 mm a tloušťce stěny 2 mm. Vnitřní skladba tkaniny v této trubce je  $0^\circ$  ve směru vláken (v ose trubky), vnější pak  $0/90^\circ$  ve směru vláken.

Tab. 3 Vlastnosti CFRP trubky od fy. Carbon Composites [19]

Mez pevnosti v tahu $R_{mTR}$	1800 MPa
Mez pevnosti v tlaku $R_{mcTR}$	1350 MPa
Mez pevnosti v ohybu $R_{mbTR}$	1650 MPa
Modul pružnosti v tahu $E_{tTR}$	135 GPa
Modul pružnosti v ohybu $E_{bTR}$	110 GPa

### 5.2.2 POUŽITÉ LEPIDLO

Všechny zkoušky byly provedeny s lepidlem Loctite 9514 Hysol. Jedná se o teplem vytvrzované jednosložkové epoxidové lepidlo na syntetické bázi o střední hustotě. Vyznačuje se vysokou pevností ve smyku, odolností vůči odlupování, rázům, vysokým teplotám a chemickému působení.

Tab. 4 Vlastnosti lepidla Loctite 9514 [20]

Provozní teplota	-55 °C až 180 °C
Doba zpracovatelnosti (při 22 °C)	5 min
Doba fixace (při 150 °C)	30 min
Pevnost ve smyku	46 N/mm <sup>2</sup>
Odolnost vůči loupání	9,5 N/mm
Barva	Šedá

### 5.2.3 POUŽITÁ VLOŽKA

Bylo vyrobeno větší množství polotovarů vložek z hliníkové slitiny, jež byly následně na soustruhu obrobena na požadovaný tvar.

Tab. 5 Vlastnosti materiálu použitého pro výrobu insertů [18]

Materiál	Hliníková slitina legovaná zinkem
Mezinárodní označení	EN AW 7075
Chemický symbol	AlZn5,5MgCu
Stav	T6 (vytvrzená za tepla)
Mez pevnosti $R_{mVL}$	510 až 540 MPa
Mez kluzu $R_{p0,2VL}$	430 až 480 MPa
Tažnost $A_5$	8%
Tvrдость dle Brinella $HBW_{2,5/62,5}$	145

#### 5.2.4 POSTUP VÝROBY ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ

Trubky byly nařezány na cca 10 cm kusy a jejich vnitřní povrch byl obroušen smirkovým papírem o hrubosti 80. Důsledné zdrsňení vnitřního povrchu trubky je zásadní pro dosažení maximální pevnosti spoje. Nedostatečné zbroušení povrchu může vest k poklesu meze pevnosti spoje až o 90%.

Na každé straně trubky byly vyvrtány čtyři díry o průměru 2 mm v místě lepené plochy. Jak vložka, tak i vnitřní povrch trubky byly krátce před lepením důkladně odmaštěny prostředkem Loctite 7063. Všechny vzorky byly označeny.

Následně bylo nanášeno lepidlo do drážky na vložce a vložka vsunuta do trubky. Lepidlo bylo navíc dovnitř doplněno pomocí injekční stříkačky předem vyvrtanými otvory.

Vzorky byly poté tepelně vytvrzeny v peci na Leteckém ústavu při teplotě 150°C po dobu 80 minut.

Pro každý zkoušený parametr byly vyrobeny tři kusy vzorku.

#### 5.2.5 ZKUŠEBNÍ STROJ

Zkoušky proběhly v laboratořích Leteckého Ústavu Fakulty Strojního inženýrství VUT v Brně na stroji LabTech LabTest 6.500 pod dohledem Ing. Jana Šplíchala, Ph.D. Vzorky byly do stroje upnuty pomocí dvojice šroubů M8 12.9. a zajištěny kontramaticí.

#### 5.2.6 ZKOUŠENÉ VLASTNOSTI LEPENÉHO SPOJE

Cílem zkoušek bylo zjistit vliv různých parametrů na pevnost lepeného spoje. Těmito parametry byly:

- délka LS
- drsnost povrchu LS
- hloubka lepidla
- tvar drážky

Z důvodu úspory materiálu a finanční a časové náročnosti výroby byly parametry jednotlivých sérií vyhodnocovány mezi sebou. Rozdílné parametry vzájemně porovnávaných vzorků jsou znázorněny tečkou.

Tab. 6 Zkoumané parametry

Série	Zkoumané parametry			
	Délka LS	Drsnost povrchu LS	Hloubka lepidla	Tvar drážky
A	•	•	•	
B	•			
C	•			•
D		•		
E			•	
F				•

### 5.2.7 METODIKA VYHODNOCENÍ

Hlavním zkoumaným parametrem bylo smykové napětí v lepeném spoji, při kterém dojde k porušení. Tato hodnota byla definována jako mez pevnosti daného vzorku. Data z měření byla exportována ve formátu .txt a následně zpracována v programu Matlab a Microsoft Excel. Napětí při porušení každého vzorku bylo vypočteno dle:

$$\sigma_P = \frac{F_P}{S_{LP}} \quad (1)$$

kde

$\sigma_P$	[MPa]	napětí ve spoji při porušení,
$F_P$	[N]	síla, při které došlo k porušení,
$S_{LP}$	[mm <sup>2</sup> ]	obsah povrchu lepené plochy,

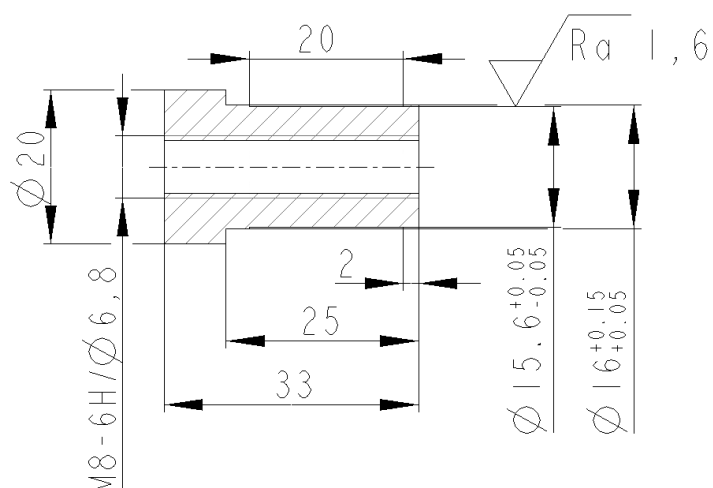
$$S_{LP} = \pi d l_{LP} \quad (2)$$

kde

$d$	[mm]	vnitřní průměr trubky,
$l_{LP}$	[mm]	délka lepené plochy.

## 6 PRAKTICKÉ ZKOUŠKA – NAMĚŘENÉ HODNOTY A VYHODNOCENÍ

### 6.1 VZOREK A



Obr. 11 Insert A – délka LS 20 mm, hladký povrch, hl. lepidla 0,2 mm

Vzorky série A vykázaly přijatelné výsledky. Lepidlo u vzorku A1 a A2 přilnulo relativně dobře, jak k povrchu insertu, tak k povrchu trubky. Přibližně stejný díl připadá na adhezivní a kohezivní poruchu, asi 20 % plochy tvořil kohezivní lom na hranici substrátu. Na vzorku A3 bylo neúmyslně aplikováno nedostatečné množství lepidla a na zhruba třetině plochy tak nedošlo k adhezi mezi adherendy vůbec. Nenastala kritická destrukce trubky, nicméně u všech vzorků došlo k částečnému poškození trubky na úrovni první vrstvy tkaniny a vytržení malého množství vláken.

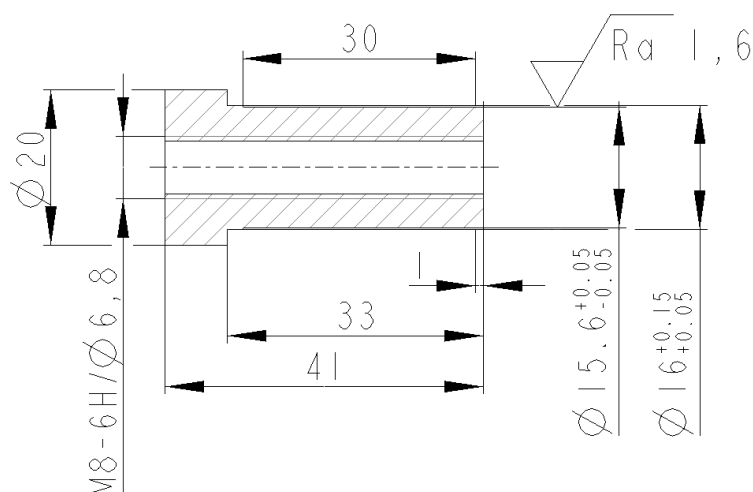
Tab. 7 Výsledky tahové zkoušky u vzorků A

Vzorek	Síla při porušení [N]	Napětí při porušení [MPa]
A1	30,3	30,9
A2	33,2	33,9
A3	23,8	24,3



Obr. 12 Vzhled LP vzorku A3

## 6.2 VZOREK B



Obr. 13 Insert B – délka LP 30 mm, hladký povrch, hl. lepidla 0,2 mm

Vzorky B měly oproti předchozím vzorkům o polovinu delší LP. Charakter poškození lepeného spoje se zásadně změnil. Na majoritní části LP plochy došlo k delaminaci substrátu a vytržení velkého množství vláken. Kohezní lom tvořil cca 15 % plochy a to zejména u horní části insertu. U vzorku B3 se objevila podélná prasklina trubky v délce asi tři centimetrů rozevírající se od vnější strany. Síla při porušení ve srovnání se vzorky A vzrostla v průměru o 46 %, napětí, při kterém došlo k selhání, spoje mírně pokleslo. To může být způsobeno několika příčinami - destrukcí vnitřních vrstev trubky, či přiblížení se bodu, za kterým už neroste síla nutná na porušení.

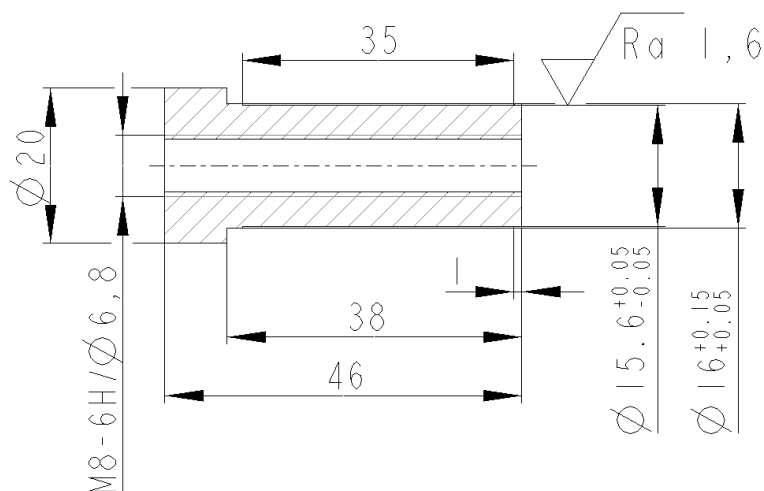
Tab. 8 Výsledky tahové zkoušky u vzorků B

Vzorek	Síla při porušení [N]	Napětí při porušení [MPa]
B1	41,2	28,0
B2	43,5	29,6
B3	43,0	29,3



Obr. 14 Vzhled LP vzorku B3, rýha v insertu vznikla při rozebírání spoje

### 6.3 VZOREK C



Obr. 15 Inset C, délka LP 35 mm, hladký povrch, hl. lepidla 0,2 mm

Vzorky C dosáhly nejlepších výsledků co do velikosti výsledné síly, při které došlo k porušení. Hodnota meze pevnosti spoje přesáhla 50 000 N u všech vzorků, velikost napětí se přibližně rovnala hodnotám dosaženým ve zkoušce předchozí.

U této zkoušky došlo ke značné destrukci trubky u všech vzorků. Přebývající lepidlo, jež během vytvrzování v peci vteklo do navrtaných otvorů, vedlo k destrukci trubky a vytržení všech vrstev tkaniny v podélném směru k okraji trubky. Druhy lomu – DF(60 %), SCF (20 %), CSF (20%).

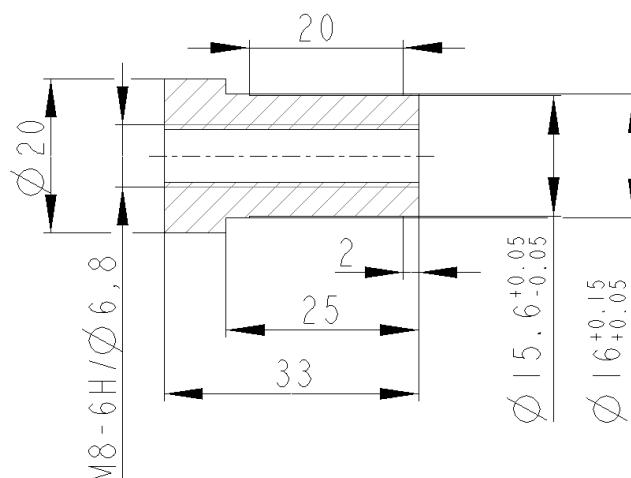
Tab. 9 Výsledky tahové zkoušky u vzorků C

Vzorek	Síla při porušení [N]	Napětí při porušení [MPa]
C1	<b>50,2</b>	29,3
C2	<b>50,5</b>	29,5
C3	<b>50,8</b>	29,6



Obr. 16 Prasklina na vzorku C1

## 6.4 VZOREK D



Obr. 17 Insert D – délka LP 20 mm, hrubý povrch, hl. lepidla 0,2 mm

Vzorek D se od vzorku A lišil úpravou povrchu lepené plochy, a sice jejím zbrúšením smirkovým papírem o hrubosti 80, ostatní parametry zůstaly stejné. Zdrsnění vedlo ke zvýšení smykového napětí při porušení o 29 %. Vzorek D3 dosáhl nejvyššího absolutního napětí ze všech testovaných vzorků a to 39 MPa. Tato úprava povrchu se tedy ukázala jako velmi výhodná.

Převládá CSF lom, kdy docházelo k vytrhávání prvních vrstev tkaniny trubky zhruba na 70 % jejího obvodu.

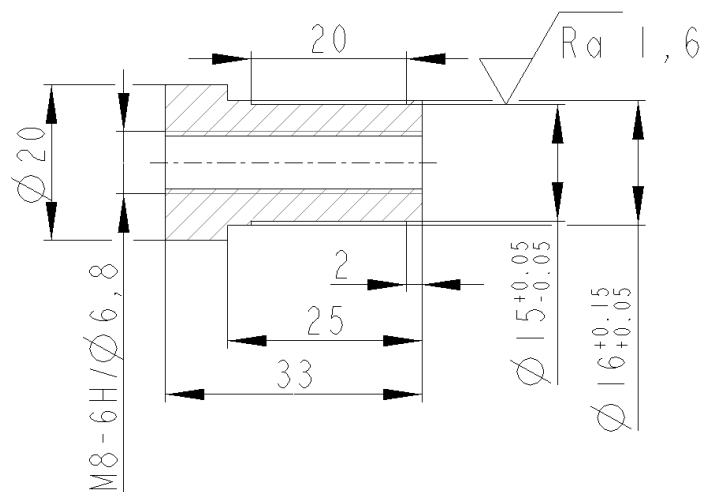
Tab. 10 Výsledky tahové zkoušky u vzorků D

Vzorek	Síla při porušení [N]	Napětí při porušení [MPa]
D1	37,8	<b>38,6</b>
D2	36,6	<b>37,4</b>
D3	38,2	<b>39,0</b>



Obr. 18 Vzhled LP vzorku D3

## 6.5 VZOREK E



Obr. 19 Insert D – délka LP 20 mm, hladký povrch, hl. lepidla 0,5 mm

Vzorek E se od vzorku A lišil hloubkou lepeného spoje. Zkouška prokázala, že se zvětšující se tloušťkou vrstvy lepidla neroste dosažené napětí ve spoji. Druhem lomu, který převládal, bylo adhezivní a zejména pak kohezivní porušení. K poškození trubky nedošlo.

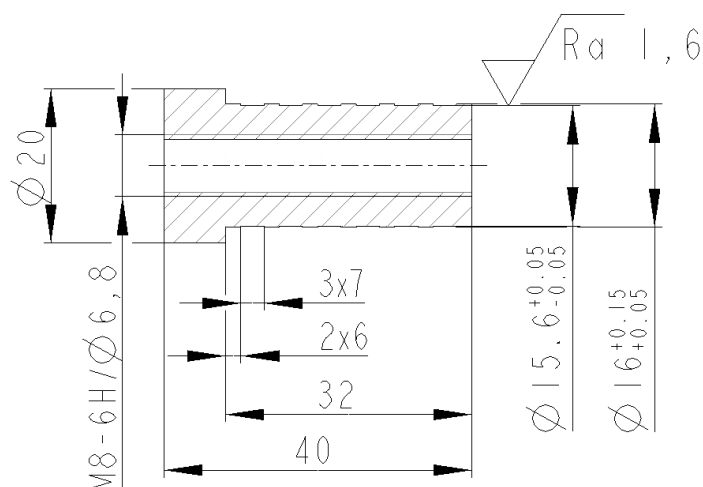
Tab. 11 Výsledky tahové zkoušky u vzorků E

Vzorek	Síla při porušení [N]	Napětí při porušení [MPa]
E1	20,7	22,0
E2	18,9	20,1
E3	19,7	20,9



Obr. 20 Vzhled LP vzorku E2

## 6.6 VZOREK F



Obr. 21 Insert F – vroubkovaný tvar, hladký povrch, hl. lepidla 0,2 mm

Poslední série vzorků se od předchozích odlišovala svým tvarem. Vroubkovaný tvar však zamýšlené snížení CF a SCF lomu nezpůsobil a tudíž zlepšení výsledků nepřinesl. Nejvyšší dosažené smykové napětí bylo výrazně menší než u všech předchozích vzorků. Tvar vložky neumožnil nanesení dostatečného množství lepidla. Převládá adhezivní lom. Vzorek F2 nebyl do stroje uložen přesně v ose, došlo k prasklině trubky a vylomení insertu.

Tab. 12 Výsledky tahové zkoušky u vzorků F

Vzorek	Síla při porušení [N]	Napětí při porušení [MPa]
F1	37,4	21,8
F2	22,1	12,9
F3	41,8	24,4



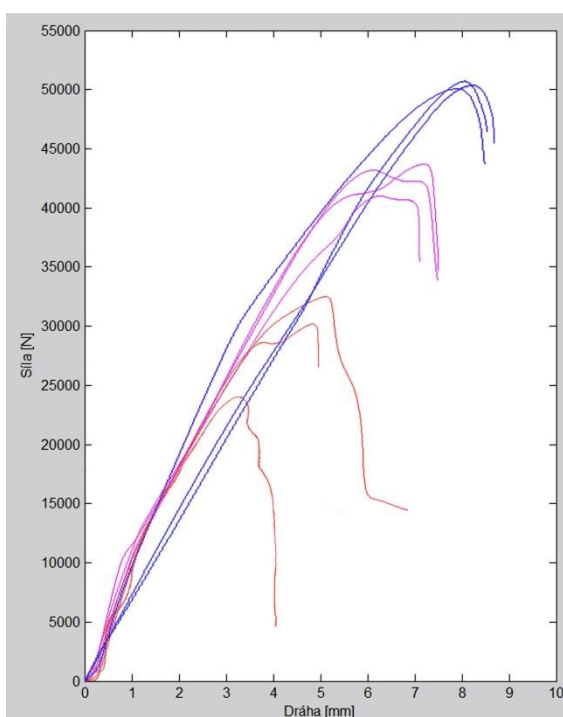
Obr. 22 Vzhled LP vzorku F3

## 7 VYHODNOCENÍ ZKOUŠEK

### 7.1 VLIV DÉLKY

První zkouška prokázala jasný vliv délky lepeného spoje na jeho pevnost. Teorie říká, že lineární závislost platí jen v určité oblasti délky lepeného spoje a od jisté velikosti nevede další prodlužování spoje k nárůstu pevnosti. Zkoušené vzorky se pohybují (těsně) pod touto hranicí.

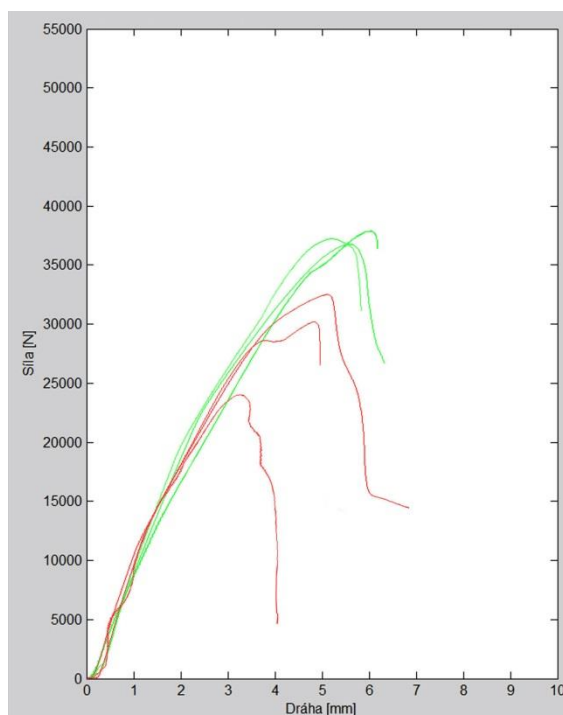
U zkoušených vzorků platí téměř přímá úměra mezi pevností a délkou lepeného spoje. Avšak další zvětšování lepené plochy nad délku cca 35 mm už nemá smysl a to z důvodu poškození CFRP trubky.



*Obr. 23 Pracovní diagram  
vzorků A (červená), B (fialová),  
C (modrá)*

### 7.2 VLIV DRSNOSTI POVRCHU VLOŽKY

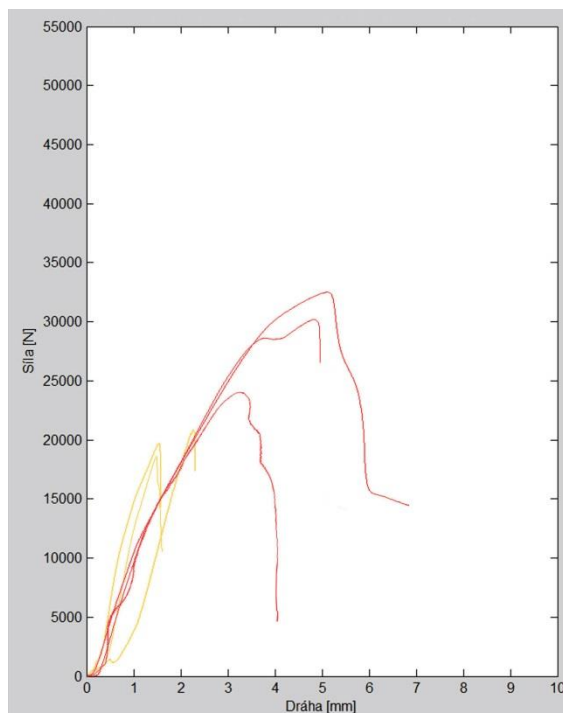
Potvrdilo se, že drsnost povrchu je dalším významným faktorem podílejícím se na pevnosti spoje. Provedené testy ukázaly, že broušený povrch zlepšuje přilnavost lepidla a omezuje adhezivní porušení.



*Obr. 24 Pracovní diagram vzorků A (červená) a D (zelená)*

### 7.3 VLIV HLOUBKY LEPIDLA

Zkoušky dále prokázaly, že také hloubka lepidla značným způsobem ovlivňuje pevnost LS. Z testů je zřejmé, že lepších výsledků dosáhly inserty s hloubkou LS 0,2 mm. U vyšších

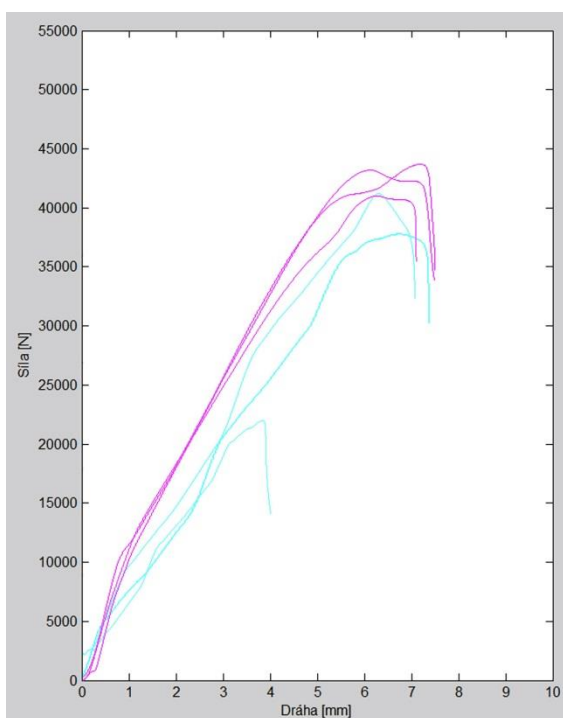


*Obr. 25 Pracovní diagram vzorků A (červená) a E (oranžová)*

vrstev lepidla ve větší míře vzniká kohezivní porucha, jež nepříznivě ovlivňuje smykové napětí, které spoj vydrží.

## 7.4 VLIV TVARU

Změna profilu drážky nezabránila odtrhávání lepidla od povrchu vložky a nevedla tak ke zvýšení únosnosti spoje. Jako výhodnější tvar insertu se proto jednoznačně jeví jednoduchý válcový povrch bez drážek.



Obr. 26 Pracovní diagram vzorků B (fialová) a F (sv. modrá)

## 8 KONSTRUKČNÍ NÁVRH SPOJOVACÍCH TYČÍ

### 8.1 ZATĚŽUJÍCÍ SÍLY

Dle kinematického modelu vozu v programu ADAMS byly Bc. Martinem Hlaváčem stanoveny síly působící na prvky zavěšení formule Dragon 7.

Tab. 13 Maximální síly působící při jízdě na spojovací tyče

	Zatěžující síla v tahu [N]	Zatěžující síla v tlaku [N]
Steering rod	2 000	2 000
Přední pull rod	2 200	<500
Zadní pull rod	2 200	<500
Toe rod	1 500	1 500

### 8.2 VOLBA POUŽITÉ TRUBKY

Byla vytvořena rozsáhlá tabulka se všemi relevantními trubkami od fy. Carbon Composites pro něž byly následně vypočteny hodnoty bezpečnosti při daných zatěžujících stavech. Z této tabulky pak byly vybrány trubky, jež dosahovaly optimálních hodnot bezpečnosti.

Tab. 14 Délka trubky a zvolený rozměr

	Délka trubky [mm]	Zvolený rozměr trubky
Steering rod	272	20x2
Přední pull rod	262	15x1,5
Zadní pull rod	305	15x1,5
Toe rod	323	15x1,5

#### 8.2.1 ZATÍŽENÍ V TAHU

Tab. 15 Zatížení v tahu

	Průřez [mm <sup>2</sup> ]	Napětí [MPa]	Bezpečnost
Steering rod	113,11	17,68	102
Přední pull rod	63,63	34,58	52
Zadní pull rod	63,63	34,58	52
Toe rod	63,63	23,58	76

Průřez trubky byl vypočítán ze vztahu:

$$S_t = \frac{\pi D^2}{4} - \frac{\pi d^2}{4} \quad (3)$$

kde

$S_t$	[mm <sup>2</sup> ]	průřez trubky,
$D$	[mm]	vnější průměr trubky,
$d$	[mm]	vnitřní průměr trubky.

Jak plyne z knihy [14], napětí v trubce při zatížení maximální silou v tahu je rovno:

$$\sigma_t = \frac{F_{zat}}{S_t} \quad (4)$$

kde

$\sigma_t$	[MPa]	napětí v trubce,
$F_{zat}$	[N]	zatěžující síla.

Bezpečnost trubky vůči meznímu stavu pevnosti získáme ze vztahu:

$$k_{tah} = \frac{R_{mTR}}{\sigma_t} \quad (5)$$

kde

$k_{tah}$		bezpečnost trubky vůči meznímu stavu pevnosti,
$R_{mTR}$	[MPa]	mez pevnosti trubky v tahu.

## 8.2.2 ZATÍŽENÍ V TLAKU

Tab. 16 Zatížení v tlaku

	Kvadr. mom. [mm <sup>4</sup> ]	Kritická síla [N]	Bezpečnost
Steering rod	4 611	83 063	42
Přední pull rod	1 459	28 326	57
Zadní pull rod	1 459	20 902	42
Toe rod	1 459	18 637	12

Kvadratický moment průřezu se rovná vztahu:

$$J_y = \frac{\pi(D^4 - d^4)}{64} \quad (6)$$

kde

$J_y$  [mm<sup>4</sup>] kvadratický moment průřezu.

Uvažuje uložení v rotačních vazbách, kritická síla nutná pro vzpěr dle [14] odpovídá:

$$F_{krit} = \frac{\pi^2 E J_y}{l^2} \quad (7)$$

kde

$F_{krit}$  [N] kritická síla nutná pro vzpěr trubky,

$E_{cTR}$  [MPa] Youngův modul pružnosti kompozitní trubky v tahu,

$l$  [mm] délka trubky.

Bezpečnost vůči meznímu stavu vzpěrné stability je rovna:

$$k_{vz} = \frac{F_{vz}}{F_{krit}} \quad (8)$$

kde

$k_{vz}$  bezpečnost trubky vůči MS vzpěrné stability

### 8.3 VÝPOČET DÉLKY LEPENÉHO SPOJE

Délka lepeného spoje byla volena s cílem dosáhnout minimálně bezpečnosti 15 vůči meznímu stavu pevnosti nebo větší. Pro výpočty bylo uvažováno maximální smykové napětí, jež bude lepený spoj schopen přenést, rovné 38,3 MPa, což je průměrná hodnota u vzorku D.

Úpravou rovnic (1) a (2) získáme výraz:

$$l_{min} = \frac{F_{zat}}{\pi d \sigma_{38,3}} \quad (9)$$

kde

$l_{min}$	[mm]	minimální délka lepeného spoje
$\sigma_{38,3}$	[MPa]	maximální uvažované smykové napětí

Tab. 17 Zvolená délka lepeného spoje

	Délka LP [mm]
Steering rod	25
Přední pull rod	30
Zadní pull rod	30
Toe rod	20

Tab. 18 Bezpečnost lepeného spoje

	Lepená plocha [mm <sup>2</sup> ]	Napětí v LS [MPa]	Bezpečnost
Steering rod	1 178	1,70	23
Přední pull rod	1 036	2,12	18
Zadní pull rod	1 036	2,12	18
Toe rod	691	2,17	18

## 9 POROVNÁNÍ HMOTNOSTÍ

Úspora hmotnosti sestavy trackrodů byla primárním cílem nové konstrukce. Ve srovnání s dříve používanou konstrukcí z trubek z chrom-molybdenové oceli o vnějším průměru 12 mm a tloušťce stěny 1 mm u pullrodů a toe rodu, resp. 14mm a 2 mm u steering rodu se svařovanými inserty došlo k významnému poklesu hmotnosti celé sestavy. Z níže uvedeného vyplývá, že použitím tyčí z uhlíkových kompozitů s vlepenými hliníkovými úchyty dojde ke snížení celkové hmotnosti sestavy o 498 gramů, resp. o 41,3%.

Tab. 16 Srovnání hmotností TR z ocelových a CFRP trubek

	<b>Kompozitní</b>	<b>Ocelová</b>
<b>Sestava</b>	<b>708 g</b>	<b>1 206 g</b>

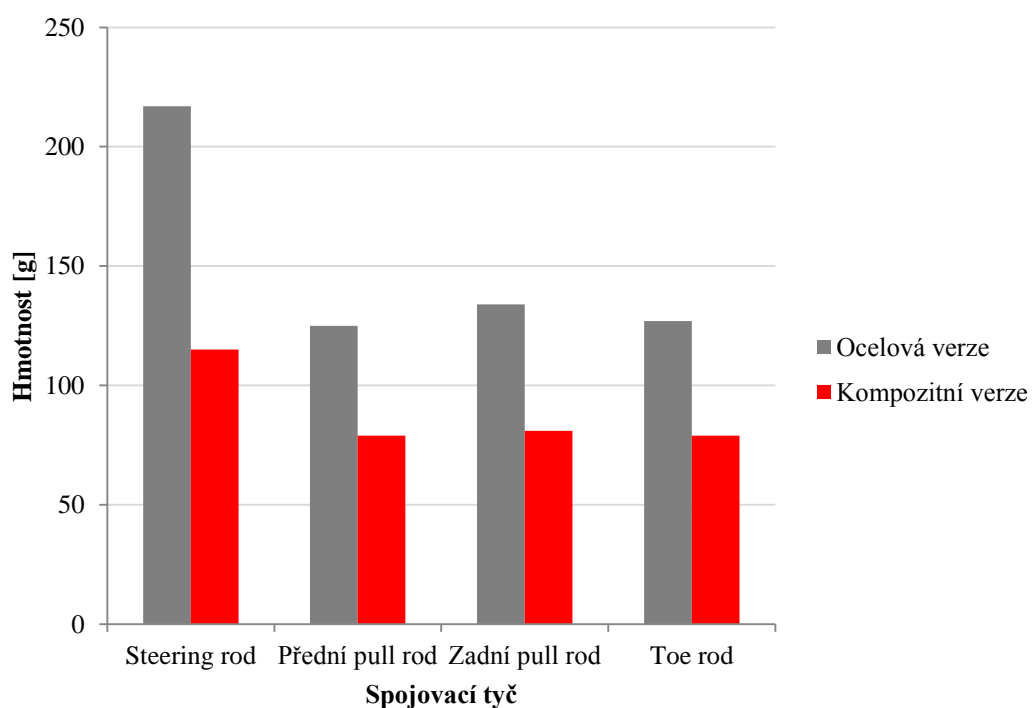
Steering rod	115 g	217 g
Trubka steering rodu	52 g	152 g
Levý insert steering rodu	10 g	11 g
Pravý insert steering rodu	11 g	12 g
Matice M6	2x2 g	2x2 g
Rodend M6	2x19 g	2x19 g

Přední Pull rod	79 g	125 g
Trubka předního pull rodu	29 g	81 g
Insert pull rodu	5 g	2x8 g
Matice M5	2x1 g	2x1 g
Rodend M5	-	2x13 g
Šroub	14 g	-
Vnitřní oko	11 g	-
Vnější oko	12 g	-
Ložisko	6 g	-

Zadní Pull rod	81 g	134 g
Trubka zadního pull rodu	33 g	90 g
Insert pull rodu	5 g	2x8 g
Matice M5	2x1 g	2x1 g
Rodend M5	-	2x13 g
Šroub	14 g	-
Vnitřní oko	9 g	-
Vnější oko	12 g	-
Ložisko	6 g	-

Toe rod	79 g	127 g
Trubka toe rodu	35 g	83 g
Levý insert toe rodu	6 g	8 g
Pravý insert toe rodu	7 g	8 g
Vložka insertu	3 g	-
Maticе M5	2x1 g	2x1 g
Rodend M5	2x13 g	2x13 g

Graf 4 Porovnání hmotnosti spojovacích tyčí



## ZÁVĚR

Z provedených zkoušek vyplývá, že nejlepší úpravou povrchu insertu pro dosažení maximální pevnosti lepeného spoje je jeho co možná největší zdrsnění, jež vede k omezení vzniku adhezivního lomu mezi lepidlem a vložkou.

Největšího smykového napětí při porušení bylo dosaženo právě u vložky se zbrošeným povrchem a to 39,0 MPa. Ukázalo se, že lepších výsledků dosáhly vzorky s hloubkou lepené plochy 0,2 mm a jednoduchým válcovým tvarem. Ze zkoušek rovněž plyne, že u trubek použitých pro testy není vhodné použít vložky s délkou lepené plochy větší než cca 35 mm, poněvadž v takovémto případě dochází k destrukci trubky dříve než k porušení lepeného spoje. Pečlivé dodržení technologického postupu při výrobě vzorků vedlo jen k velmi malému rozptylu výsledků zkoušek jednotlivých vzorků.

Hlavní důraz při návrhu konstrukce spojovacích tyčí byl kladen na snížení hmotnosti sestavy při zachování nebo zvýšení tuhosti. Přestože je specifický modul pružnosti u kompozitních materiálů z uhlíkových vláken (CFRP) nižší než u ocelových slitin, díky použití trubek s větším vnějším průměrem je navržená konstrukce tužší ve všech režimech namáhání a zároveň lehčí o 498 g.

S ohledem na požadavek maximální bezpečnosti a spolehlivosti je navržené řešení velmi konzervativní a konstrukce nabízí značný prostor pro další odlehčení v nové generaci vozu Dragon. Další úsporu hmotnosti může přinést zejména zkrácení insertů, příp. snížení průměrů použitých trubek. Zmenšení tloušťky stěny trubek nelze doporučit z důvodu následné větší náchylnosti trubky ke vzniku lomu v oblasti lepeného spoje.



*Obr. 27 Navržené spojovací tyče na skeletonu podvozku formule Dragon 7*

U obou pull rodů byla zvolena koncepce s nalisovaným sférickým ložiskem SKF namísto použití rodendů a to z důvodu podstatně vyššího namáhání těchto součástí.

Byla provedena MKP analýza v programu ANSYS simulující zatížení oka. Maximální hodnota redukovaného napětí při použití podmínky HMM dosáhla 142,7 MPa na hraně uložení sférického ložiska. Nejvyšší hodnota napětí mimo hranu dosáhla hodnoty 95 MPa. Očka jsou vyrobeny z hliníkové slitiny EN AW 7075 T6, jejíž mez kluzu je 430 až 480 MPa. Přestože při jízdě může krátkodobě dojít i k nárůstu napětí nad hodnoty zjištěné simulací, vypočítané redukovaného napětí 95 MPa lze hodnotit jako přiměřenou hodnotu a další odběr materiálu není žádoucí. Celková deformace oka se pohybovala v jednotkách setin milimetrů.

Výhodou daného návrhu je podstatné snížení neodpružených hmot náprav. Negativem je cena výroby, která je přibližně desetinásobná ve srovnání s dříve používaným řešením z chrom-molybdenových trubek a dále pak nutnost přesně dodržet technologický postup výroby.

Dosažené výsledky u statických zkoušek vysoce překročily nejvyšší axiální statické namáhání spojovacích tyčí náprav na formuli Dragon 7. Nicméně, před použitím na vozidle je více než vhodné provést dynamické testování, resp. únavovou zkoušku, s cílem ověřit chování navržené konstrukce při cyklickém namáhání.

## POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] CASE, Dean. *Formula SAE: History of Formula SAE* [online]. [cit. 2017-02-08]. Dostupné z: <https://www.fsaeonline.com/page.aspx?pageid=c4c5195a-60c0-46aa-acbf-2958ef545b72>
- [2] *Formula Student Germany: Autonomous Driving at Formula Student Germany 2017* [online]. [cit. 2017-02-10]. Dostupné z: <https://www.formulastudent.de/pr/news/details/article/autonomous-driving-at-formula-student-germany-2017/>
- [3] *Formula Student Germany: Hockenheim 2016* [online]. [cit. 2017-04-06]. Dostupné z: <http://media.formulastudent.de/FSG16/Hockenheim-2016/Panoramic-Picture/i-TXwsH7m/A>
- [4] *Formula Student Germany: Rules 2017 v1.0* [online]. [cit. 2017-02-10]. Dostupné z: <https://www.formulastudent.de/pr/news/details/article/rules-2017-v10/>
- [5] ČERNOCH, Oldřich. *Statická pevnost spoje kov – kompozit*. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta technologická, 2016. 91 s. Vedoucí práce Ing. Alexander Čapka
- [6] *Sportskeeda: Pullrod vs Pushrod suspension: Which is preferred?* [online]. [cit. 2017-02-19]. Dostupné z: <https://www.sportskeeda.com/f1/pullrod-vs-pushrod-suspension-which-is-preferred>
- [7] *Formula 1 World Forum* [online]. [cit. 2017-02-19]. Dostupné z: <http://formula1.forumfree.it/?t=53748302&st=15>
- [8] *F1technical* [online]. [cit. 2017-02-19]. Dostupné z: <http://www.f1technical.net/forum/viewtopic.php?t=16681>
- [9] MILLIKEN, William F. a Douglas L. MILLIKEN. *Race car vehicle dynamics*. Warrendale, PA, U.S.A.: SAE International, c1995. 857 s. ISBN 1560915269.
- [10] *FSTotal: KatE – Elbflorace TU Dresden* [online]. [cit. 2017-03-18] Dostupné z: [http://www.fstotal.com/wp-content/uploads/2014/01/05\\_SU\\_1.jpg](http://www.fstotal.com/wp-content/uploads/2014/01/05_SU_1.jpg)
- [11] *FSTotal: KatE – Elbflorace TU Dresden* [online]. [cit. 2017-03-18]. Dostupné z: [http://www.fstotal.com/wp-content/uploads/2014/01/06\\_SU\\_2.jpg/](http://www.fstotal.com/wp-content/uploads/2014/01/06_SU_2.jpg/)
- [12] *F:SAE:47 University of Auckland: The M015* [online]. [cit. 2017-03-10]. Dostupné z: <http://www.fsae.co.nz/our-cars/2015/>
- [13] PETERKA, Jindřich. *Lepení konstrukčních materiálů ve strojírenství*. Praha: SNTL, 1980.
- [14] SHIGLEY, Joseph Edward, Charles R. MISCHKE a Richard G. BUDYNAS, VLK, Miloš (ed.). *Konstruování strojních součástí*. Překlad Martin Hartl. V Brně: VUTIUM, 2010. Překlady vysokoškolských učebnic. ISBN 978-80-214-2629-0.

- [15] PETERKA, Jindřich. *Lepení konstrukčních materiálů ve strojírenství*. Praha: SNTL, 1980, s. 71.
- [16] ČSN ISO 10365. *Lepidla. Označení hlavních typů porušení lepeného spoje*. Pardubice: Technická normalizační komise: TNK 52 Plasty, 1995.
- [17] OSTEN, Miloš. *Práce s lepidly a tmely*. Vyd. 3. upravené. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1986, 285 s.
- [18] TRHOŇ, Vojtěch. *Vliv povrchu na pevnost lepeného spoje*. Brno, 2011. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Jaroslav Kubíček.
- [19] DLÁPAL, Václav. *Návrh ramen zavěšení kol s vlepenými úchyty kloubů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 50 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Pavel Ramík.
- [20] *Loctite: Loctite EA 9514* [online]. [cit. 2017-04-15]. Dostupné z: <http://www.loctite.cz/Loctite-6700.htm?nodeid=8802629386241>
- [21] *Alunet: EN AW-7075 T6 (AlZnMgCu1,5)* [online]. [cit. 2017-04-15]. Dostupné z: <http://www.alunet.cz/ENAW-7075>
- [22] *RennTeam Uni Stuttgart* [online]. [cit. 2017-03-08]. Dostupné z: <http://www.rennteam-stuttgart.de/f0711-11/>
- [23] *TUG Racing* [online]. [cit. 2017-03-08]. Dostupné z: <https://racing.tugraz.at/boliden/>
- [24] *CAT-Racing: C-16 Karakal* [online]. [cit. 2017-03-08]. Dostupné z: <http://www.cat-racing.de/fahrzeuge/c-16-karakal.html>
- [25] *Joanneum Racing: JR16* [online]. [cit. 2017-03-08]. Dostupné z: <http://www.joanneum-racing.at/fahrzeuge/der-jr16/>
- [26] *Team Bath Racing: TBR16* [online]. [cit. 2017-03-08]. Dostupné z: <http://teambathracing.com/our-story/our-cars/TBR16/>
- [27] *Gator Motor Sports: TBR16* [online]. [cit. 2017-03-08]. Dostupné z: <http://gatormotorsports.com/>
- [28] *Grandelfino* [online]. [cit. 2017-03-08]. Dostupné z: [http://www.grandelfino.net/sae/about\\_sae.html](http://www.grandelfino.net/sae/about_sae.html)
- [29] *Rennstall Esslingen* [online]. [cit. 2017-03-08]. Dostupné z: <http://www.rennstall-esslingen.de/>
- [30] *Nagoya University Formula Team FEM* [online]. [cit. 2017-03-09]. Dostupné z: <http://nagoya.fem.jp/>

- [31] *Escola de Engenharia de Sao Carlos da Universidade de Sao Paulo* [online]. [cit. 2017-03-09]. Dostupné z: <http://www3.eesc.usp.br/formula/>
- [32] *Ka-Raceing* [online]. [cit. 2017-03-11]. Dostupné z: <https://www.ka-raceing.de/neues/archiv/saison-2017.html>
- [33] *Curtin Motorsport Team* [online]. [cit. 2017-03-11]. Dostupné z: <http://www.curtinmotorsport.com/the-team/>
- [34] *Hawks Racing: Garage* [online]. [cit. 2017-03-11]. Dostupné z: <https://hawksracing.de/index.php?page=garage>
- [35] *Global Formula Racing* [online]. [cit. 2017-03-14]. Dostupné z: <http://www.global-formula-racing.com/our-cars>
- [36] *High-Octane Motorsport e.V.: Die Rennwagen des High-Octane Motorsports* [online]. [cit. 2017-05-24]. Dostupné z: <http://www.high-octane-motorsports.de/index.php?id=8>
- [37] *MSU Formula Racing Team* [online]. [cit. 2017-03-14]. Dostupné z: <http://www.egr.msu.edu/fsae/>
- [38] *CTU CarTech: FS.07* [online]. [cit. 2017-03-14]. Dostupné z: <http://cartech.cvut.cz/fs-07/>
- [39] *Formula Student Team Weingarten: Stinger 17* [online]. [cit. 2017-03-11]. Dostupné z: <http://www.fsteamweingarten.de/stinger17/>
- [40] *NUS Formula SAE* [online]. [cit. 2017-03-14]. Dostupné z: <http://www.eng.nus.edu.sg/edic/project-detail-fsae.html>
- [41] *UCM Motorsport: Cars* [online]. [cit. 2017-03-14]. Dostupné z: <http://www.ucmotorsport.com/cars.php>
- [42] *Firenze Race Team: FR-16T* [online]. [cit. 2017-03-14]. Dostupné z: <http://www.firenzerace.it/it/fr-16t/>
- [43] *Formula SAE, UConn: Michigan 2016* [online]. [cit. 2017-03-14]. Dostupné z: <https://uconntact.uconn.edu/organization/uconnfsae/gallery/album/101852>
- [44] *Monash Motorsport: The M16* [online]. [cit. 2017-03-14]. Dostupné z: <https://www.monashmotorsport.com/the-car/>
- [45] *Cerber Motorsport: Cars* [online]. [cit. 2017-03-15]. Dostupné z: <http://www.cerbermotorsport.pb.edu.pl/en/cars/>

**SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ**

$R_{mTR}$	[MPa]	mez pevnosti kompozitní trubky v tahu
$R_{mcTR}$	[MPa]	mez pevnosti kompozitní trubky v tlaku
$R_{mbTR}$	[MPa]	mez pevnosti kompozitní trubky v ohybu
$E_{tTR}$	[GPa]	Youngův modul pružnosti kompozitní trubky v tahu
$E_{bTR}$	[GPa]	modul pružnosti kompozitní trubky v ohybu
$R_{mVL}$	[MPa]	mez pevnosti hliníkové vložky
$R_{p0,2VL}$	[MPa]	mez kluzu hliníkové vložky
$\sigma_P$	[MPa]	napětí ve spoji při porušení
$\sigma_t$	[MPa]	napětí v trubce
$F_P$	[N]	síla, při které došlo k porušení
$S_{LP}$	[mm <sup>2</sup> ]	obsah povrchu lepené plochy
$D$	[mm]	vnější průměr trubky
$d$	[mm]	vnitřní průměr trubky
$l_{LP}$	[mm]	délka lepené plochy
$l$	[mm]	délka CFRP trubky
$F_{zat}$	[kN]	zatěžující síla
$F_{vz}$	[N]	síla nutná pro vzpěr CFRP trubky
$l_{min}$	[mm]	minimální délka lepeného spoje
$\sigma_{35}$	[MPa]	maximální smykové napětí
$k_{tah}$		bezpečnost trubky v tahu
$k_{tlak}$		bezpečnost trubky v tlaku
FS		Formula Student
FSG		Formula Student Germany
CFRP		Carbon Fibre Reinforced Plastic
LS		lepený spoj

LP lepená plocha

TR trackrods

---

## SEZNAM PŘÍLOH

Příloha I      Tabulka typů zavěšení u týmů FS

I

Tabulka typů zavěšení u předních týmů FS

Univerzita	Tým	Země	Materiál	Zavěšení vpředu	Zavěšení vzadu
Universität Stuttgart	Rennteam Uni Stuttgart e.V.	DE	kompozit	pull rod	push rod
Technische Universität Graz	TU Graz Racing Team	AT	kompozit	pull rod	push rod
Fachhochschule Coburg	CAT-Racing	DE	kompozit	pull rod	push rod
Fachhochschule Joanneum Graz	Joaneum Racing Graz	AT	kompozit	pull rod	Pull Rod
University of Bath	Team Bath Racing	GB	ocel	pull rod	push rod
University of Florida	Gator Motorsport	US	ocel	pull rod	Pull Rod
Kyoto Institute of Technology	Grandelfino	JP	ocel	push rod	push rod
Hochschule Esslingen	Rennstall Esslingen	DE	kompozit	push rod	push rod
University of Auckland	University of Auckland Formula SAE Team	NZ	ocel	push rod	push rod
Nagoya Institute of Technology	Nagoya University Formula Team FEM	JP	ocel	push rod	push rod
Escola de Engenharia de Sao Carlos da Universidade de Sao Paulo	EESC USP Formula SAE	BR	kompozit	push rod	push rod
Karlsruhe Institute of Technology	Ka-Raceing	DE	kompozit	pull rod	push rod
Curtin University	Curtin Motorsport Team	AU	ocel	pull rod	push rod
Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg	Hawks Racing	DE	kompozit	pull rod	push rod
GFR DHBW Ravensburg & Oregon State University	Global Formula Racing	DE/US	ocel	push rod	push rod
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg	High-Octane Motorsport e.V.	DE	kompozit	push rod	push rod
Michigan State University	MSU Formula Racing Team	US	kompozit	push rod	push rod
Czech Technical University in Prague	CTU CarTec	CZ	kompozit	push rod	push rod
University of Applied Sciences Ravensburg-Weingarten	Formula Student Team Weingarten	DE	ocel	pull rod	push rod
University of Singapore	NUS Formula SAE	SG	Ocel	pull rod	push rod

---

University of Canterbury	UCM Motorsport	UK	ocel	pull rod	push rod
Università degli Studi di Firenze	Firenzerace	IT	ocel	push rod	push rod
University of Connecticut	Uconn	US	ocel	pull rod	pull rod
Monash University	Monash Motorsport	AU	ocel	pull rod	push rod
Białystok University of Tech.	Cerber Motorsport	PL	ocel	pull rod	push rod

*[12], [22], [23], [24], [25], [26], [27], [28], [29], [30], [31], [32], [33], [34], [35], [36], [37], [38], [39], [40], [41], [42], [43], [44], [45]*