

Statická pevnost spoje kov - kompozit

Oldřich Černocho

Bakalářská práce
2016

 Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2015/2016

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Oldřich Černocho**
Osobní číslo: **T13059**
Studijní program: **B3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Technologická zařízení**
Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Statická pevnost spoje kov – kompozit**

Zásady pro vypracování:

1. I. Teoretická část
2. **Kovové a kompozitní (polymerní) materiály používané ve stavbě závodních automobilů**
3. **Konstrukce a technologie spojů kov – kompozit**
4. **Popis závodního vozu Formule Student**
5. **Analýza namáhání podvozku závodního automobilu**
6. **Statické zkoušky materiálů**
7. II. Praktická část
8. **Cíl bakalářské práce**
9. **Navržení a výroba přípravku pro statickou zkoušku tahem**
10. **Provedení zkoušek**
11. **Vyhodnocení zkoušek**

Rozsah bakalářské práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

1. Ehrenstein, G. W.: Polymerní kompozitní materiály, Scientia, Praha, 2009.
2. Bareš, R. A.: Kompozitní materiály, SNTL, Praha, 1988.
3. Pluhař, J.: Strojírenské materiály, SNTL, Praha, 1981.
4. Harper, C. A: Handbook of Plastics, Elastomers, and Composites, McGraw-Hill, New York, 2002.
5. Trzesniowski, M.: Rennwagentechnik, GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden, 2008.

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Alexander Čapka

Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání bakalářské práce:

8. ledna 2016

Termín odevzdání bakalářské práce:

20. května 2016

Ve Zlíně dne 3. února 2016

doc. Ing. František Buňka, Ph.D.

děkan



prof. Ing. Berenika Hausnerová, Ph.D.

ředitel ústavu

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby ¹⁾;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3 ²⁾;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 2 a 3 mohu užit své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Ve Zlíně 15. 5. 2016



¹⁾ zákon č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, § 47 Zveřejňování závěrečných prací:

(1) Vysoká škola nevydělečně zveřejňuje disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce, u kterých proběhla obhajoba, včetně posudků oponentů a výsledku obhajoby prostřednictvím databáze kvalifikačních prací, kterou spravuje. Způsob zveřejnění stanoví vnitřní předpis vysoké školy.

(2) Disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce odevzdané uchazečem k obhajobě musí být též nejméně pět pracovních dnů před konáním obhajoby zveřejněny k nahlížení veřejnosti v místě určeném vnitřním předpisem vysoké školy nebo není-li tak určeno, v místě pracoviště vysoké školy, kde se má konat obhajoba práce. Každý si může ze zveřejněné práce pořizovat na své náklady výpisy, opisy nebo rozmnoženiny.

(3) Platí, že odevzdáním práce autor souhlasí se zveřejněním své práce podle tohoto zákona, bez ohledu na výsledek obhajoby.

²⁾ zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 35 odst. 3:

(3) Do práva autorského také nezasahuje škola nebo školské či vzdělávací zařízení, užije-li nikoli za účelem přímého nebo nepřímého hospodářského nebo obchodního prospěchu k výuce nebo k vlastní potřebě dílo vytvořené žákem nebo studentem ke splnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školskému či vzdělávacího zařízení (školní dílo).

³⁾ zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 60 Školní dílo:

(1) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení mají za obvyklých podmínek právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla (§ 35 odst. 3). Odpírá-li autor takového díla udělit svolení bez vážného důvodu, mohou se tyto osoby domáhat nahrazení chybějícího projevu jeho vůle u soudu. Ustanovení § 35 odst. 3 zůstává nedotčeno.

(2) Není-li sjednáno jinak, může autor školního díla své dílo užít či poskytnout jinému licenci, není-li to v rozporu s oprávněnými zájmy školy nebo školského či vzdělávacího zařízení.

(3) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení jsou oprávněny požadovat, aby jim autor školního díla z výdělku jím dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence podle odstavce 2 přiměřeně přispěl na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložily, a to podle okolností až do jejich skutečné výše; přitom se přihlédne k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

ABSTRAKT

Cílem této bakalářské práce je navrhnout spojení ramena zavěšení kola závodního vozidla Formule Student a jeho koncovky tak, aby spojení mezi kompozitovým tělem ramena a kovovou koncovkou přeneslo požadovanou statickou osovou sílu působící na toto rameno při jízdě vozidla.

Teoretická část je zaměřena na popis a použití kovových a kompozitních materiálů pro stavbu závodních vozidel, konstrukci spojů mezi kovem a kompozitním materiálem, charakteristiku závodních vozidel a soutěží Formule Student a problematiku lepených spojů a jejich zkoušení.

Praktická část obsahuje zkoušky pevnosti zvolených druhů lepidel, návrhy konstrukce koncovky a zkoušení pevnosti v tahu jejího spojení s uhlíkovou kompozitní a porovnání vhodnosti jednotlivých konstrukčních řešení ramena pro jeho praktickou aplikaci na závodní vozidlo.

Klíčová slova: Formule Student, kompozit, lepení, pevnost ve smyku.

ABSTRACT

This thesis aims to design an adhesive bond of Formula Student carbon fibre suspension rod and its steel rod-end. The joint is meant to hold an axial tensile stress which affects the rods during a formula car race.

The first part deals with a description of metal and composite materials and their application for racing car construction. There are alternatives of joint design between a metal and a composite part given, the Formula Student racing cars and the racing events description and adhesive bonds issues.

The second part describes adhesive shear strength testing, the rod-ends design and the bonded rod-ends axial tensile stress testing.

Keywords: Formula Student, composite material, adhesive bonding, shear strength.

Tímto chci poděkovat vedoucímu mé bakalářské práce, panu Ing. Alexandru Čapkovi, za jeho odbornou pomoc, čas, rady a vynaložené úsilí, jež mi poskytl při zpracování této bakalářské práce.

Také chci tímto poděkovat panu Ing. Milanu Žaludkovi, Ph.D. za odbornou pomoc při provádění mechanických zkoušek.

Prohlašuji, že odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

OBSAH

ÚVOD	11
I TEORETICKÁ ČÁST	12
1 KOVOVÉ A KOMPOZITNÍ (POLYMERŇ) MATERIÁLY POUŽÍVANÉ VE STAVBĚ ZÁVODNÍCH AUTOMOBILŮ	13
1.1 FAKTOR HMOTNOSTI VOZIDLA	13
1.2 KONSTRUKČNÍ MATERIÁLY	13
1.3 KOVOVÉ MATERIÁLY	14
1.3.1 Obecné charakteristiky	14
1.3.2 Trubkový ocelový rám	15
1.3.3 Ramena zavěšení náprav	15
1.3.4 Těhlice	16
1.4 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY	17
1.4.1 Obecné charakteristiky	17
1.4.2 Struktura kompozitních materiálů	17
1.4.3 Porušení dlouhovláknových kompozitů	18
1.4.4 Vlastnosti kompozitů pro technickou praxi	18
1.4.5 Využití kompozitů v konstrukci závodních automobilů	19
1.4.6 Uhlíkový monokok	21
1.4.7 Sendvičový monokok	23
1.4.8 Kapotáž ze skelného laminátu	23
1.4.9 Uhlíková přitlačná křídla	24
1.4.10 Sendvičový deformační člen	25
1.4.11 Uhlíkové disky kol	25
1.4.12 Uhlíkové tyče zavěšení náprav	26
1.4.13 Ostatní použití kompozitních materiálů	27
2 KONSTRUKCE A TECHNOLOGIE SPOJŮ KOV-KOMPOZIT	29
2.1 MECHANICKÁ SPOJENÍ.....	29
2.2 ZALAMINOVÁNÍ KOVOVÉHO DÍLCE.....	29
2.3 LEPENÍ	30
2.3.1 Obecné charakteristiky	30
2.3.2 Výběr lepidla	31
2.3.3 Konstrukce lepených spojů	32
2.3.4 Přeplátované spoje	32
2.3.5 Násuvné (trubkové) spoje	33
2.3.6 Vlastní provedení lepení	34
2.3.7 Vliv tloušťky lepidla na pevnost lepeného spoje	36
2.3.8 Destruktivní zkoušení lepených spojů	37
2.3.9 Druhy lomů lepených spojů	37
2.3.10 Výpočet pevnosti lepeného spoje.....	38
3 POPIS ZÁVODNÍHO VOZU FORMULE STUDENT	40
3.1 SOUTĚŽE FORMULA STUDENT	40
3.1.1 Charakteristiky soutěží	40
3.1.2 Statické disciplíny	41
3.1.3 Dynamické disciplíny.....	42

3.2	VOZIDLO FORMULE STUDENT FS.03	43
3.2.1	Výsledky závodů	43
3.2.2	Technické údaje	44
4	ANALÝZA NAMÁHÁNÍ PODVOZKU ZÁVODNÍHO AUTOMOBILU	45
4.1	ZAVĚŠENÍ A TLUMENÍ ODPRUŽENÍ ZÁVODNÍCH VOZIDEL	45
4.1.1	Úloha a konstrukce nápravy	45
4.1.2	Lichoběžníkové zavěšení	45
4.1.3	System odpružení pushrod – pullrod.....	46
4.2	NAMÁHÁNÍ RAMEN ZAVĚŠENÍ KOL	47
4.2.1	Případy namáhání ramen.....	47
4.2.2	Kvantifikace maximální zatěžující síly	47
5	STATICKE ZKOUŠKY MATERIÁLŮ	49
5.1	CHARAKTERISTIKA ZKOUŠEK MATERIÁLŮ.....	49
5.2	STATICÁ ZKOUŠKA TAHEM.....	49
5.2.1	Charakteristika zkoušky	49
5.2.2	Zkušební stroj.....	50
5.3	STATICÁ ZKOUŠKA SMYKEM	50
5.3.1	Charakteristika zkoušky	50
5.4	STATISTICKÉ VYHODNOCENÍ ZKOUŠEK.....	51
5.4.1	Aritmetický průměr	51
5.4.2	Směrodatná odchylka výběru	52
5.4.3	Medián.....	52
5.4.4	Variační rozpětí	52
II	PRAKTICKÁ ČÁST	53
6	CÍL BAKALÁŘSKÉ PRÁCE	54
6.1	ROZVRŽENÍ EXPERIMENTU	54
6.2	NÁVRH DRUHU SPOJENÍ.....	54
6.3	MĚŘENÍ VNITŘNÍHO PRŮMĚRU TRUBEK	55
6.4	DRUHY LEPIDEL	55
6.4.1	Cyberbond Epoxy Steel.....	56
6.4.2	Crestabond M1-05.....	56
6.4.3	Elan-tech AS 95/AW 95.....	56
6.4.4	HF MARKET A 5050	56
6.4.5	Epoxidová pryskyřice L 285	56
6.5	DRUHY MATERIÁLŮ PRO ZHOTOVENÍ ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ.....	57
6.5.1	Ocel 11 321	57
6.5.2	Ocel 11 600	57
6.5.3	Uhlíkový laminát.....	57
6.5.4	Uhlíková trubka.....	57
6.6	ZKOUŠENÍ PEVNOSTI LEPIDEL.....	57
6.6.1	Úvod.....	57
6.6.2	Příprava zkušebních vzorků	58

6.7	NÁVRH TYPŮ KONCOVEK	61
6.8	PŘÍPRAVA ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ TRUBEK S VLEPENOU KONCOVKOU	62
6.8.1	Odmaštění dříků	62
6.8.2	Odmaštění a zdrsnění vnitřního povrchu trubek	63
6.8.3	Nanesení lepidla na dříky koncovek	63
7	NAVRŽENÍ A VÝROBA PŘÍPRAVKU PRO STATICOU ZKOUŠKU TAHEM.....	64
7.1	ÚVOD	64
7.2	ÚPRAVA KONCOVKY	64
7.3	ÚPRAVA TRUBKY	64
8	PROVEDENÍ ZKOUŠEK	66
8.1	ZKOUŠKY LEPIDEL.....	66
8.2	ZKOUŠKY VLEPENÝCH TYPŮ KONCOVEK	67
9	VYHODNOCENÍ ZKOUŠEK	68
9.1	VYHODNOCENÍ PEVNOSTI LEPIDEL	68
9.1.1	Charakteristika výsledků zkoušek.....	68
9.1.2	Výsledky zkoušek	68
9.1.3	Závěr zkoušek	69
9.2	VYHODNOCENÍ PEVNOSTI VLEPENÝCH TYPŮ KONCOVEK.....	69
9.2.1	Charakteristika výsledků zkoušek.....	69
9.2.2	Výsledky zkoušek	70
9.2.3	Závěr zkoušek	73
	ZÁVĚR	74
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	75
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	80
	SEZNAM OBRÁZKŮ	82
	SEZNAM GRAFŮ	85
	SEZNAM PŘÍLOH.....	86

ÚVOD

Při konstrukci užitkových strojů se vyznačuje snaha o nejlepší možný poměr hmotnosti stroje k jeho výkonu a k jeho užitným vlastnostem. Z toho důvodu se postupně kovové a slitinové komponenty nahrazují kompozitovými, jejichž mechanické vlastnosti se rovnají vlastnostem ocelí a jiných slitin, nebo je převyšují a zároveň mají několikanásobně nižší hmotnost.

Zvláště v oblasti letectví, kosmonautiky, automobilismu a sportu se od počátku 20. století klade důraz na co nejnižší hmotnost stroje či vybavení při maximalizaci pevnosti konstrukce v kombinaci s minimalizací nákladů na jejich výrobu. Splnění těchto podmínek předurčuje stále rozšiřující se použití kompozitů jako konstrukčních materiálů.

U závodního vozidla Formule Student je kladen důraz na co nejnižší hmotnost a vysokou pevnost celé konstrukce, a proto je mnoho dílů vyrobeno z kompozitních materiálů, včetně ramen zavěšení přední a zadní nápravy.

Tato kompozitová ramena jsou ukončena ocelovými koncovkami a přenášejí statická a dynamická zatížení při jízdě vozidla.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 KOVOVÉ A KOMPOZITNÍ (POLYMERNÍ) MATERIÁLY POUŽÍVANÉ VE STAVBĚ ZÁVODNÍCH AUTOMOBILŮ

1.1 Faktor hmotnosti vozidla

U závodních vozidel je kladen důraz na co nejnižší hmotnost celé konstrukce a z toho důvodu zde vedle tradičních konstrukčních materiálů progresivně nachází uplatnění rozličné druhy kompozitních materiálů, které mají při své nízké hmotnosti srovnatelné či lepší mechanické vlastnosti než tradiční konstrukční materiály (ocel, kovy, slitiny).

Čím větší je poměr hmotnosti odpružených částí vozu k hmotnosti částí neodpružených, tím lepší je trakce pneumatik k závodní dráze a tím i lepší ovladatelnost a chování vozidla při jízdě. Snížení hmotnosti vozidla se pozitivně projeví na snížení spotřeby paliva, lepší akceleraci, deceleraci a díky snížení bodu těžiště vozidla jsou také pozitivně ovlivněny reakce vozidla na změny jeho směru. [1]

Na studii z roku 2001 (Tab. 1) je patrné snížení hmotnosti konstrukce vozidla a snížení spotřeby paliva při využití různých druhů konstrukčních materiálů. Použití uhlíkového kompozitu pro nosnou konstrukci vozidla tedy může výrazně snížit jeho hmotnost a to téměř o polovinu.

Tab. 1. Vliv materiálu nosné konstrukce vozidla na jeho hmotnost a spotřebu paliva. [2]

Materiál nosné konstrukce	Hmotnost konstrukce [kg]	Spotřeba paliva [l/100 km]	Zlepšení spotřeby [%]
Tradiční (ocel, hliník, slitiny)	500	10,00	0,0
Vysokopevnostní ocel	350	9,58	4,2
Uhlíkový kompozit	270	9,31	7,0

1.2 Konstrukční materiály

Při konstrukci závodních vozidel je použita velká škála druhů materiálů a jejich kombinací. Již při vývoji vozidla se bere v úvahu druh použitého materiálu pro danou součást, která je pak podle daných mechanických vlastností zvoleného materiálu dimenzována z hlediska dynamického a statického zatížení, opotřebení, pevnosti a bezpečnostních požadavků.

Formule Student (či jiné závodní vozidlo) je stavena z velkého množství dílů. Každý vývojový tým (výrobce) volí pro konstrukční díly vlastní materiál dle svých finančních možností, konstrukčních požadavků a dle svých vlastních předchozích zkušeností. Výčet druhů materiálu je tedy velký, individuální a pro každý konstrukční tým specifický.

Závodní vozidlo typu Formule Student je z největší části tvořeno svařovaným trubkovým ocelovým rámem, kompozitovou či plechovou karoserií a funkčními kompozitovými prvky jako jsou např. přitlačná křídla. Další, menší část objemu použitých materiálů, tvoří polymery a najdeme zde i např. keramiku (brzdové destičky).

Tato kapitola je z toho důvodu pojata jako výčet nejdůležitějších konstrukčních částí závodního vozidla a jejich variant či inovací vyrobených z kompozitních a kovových materiálů. Kapitola o kompozitních materiálech je vzata více dopodrobna, jelikož kompozitní materiály jsou v současnosti stále více do automobilů používány a vyznačují se unikátními vlastnosti, které jsou v automobilovém průmyslu s výhodami využívány.

1.3 KOVOVÉ MATERIÁLY

1.3.1 Obecné charakteristiky

Kovy a jejich slitiny patří mezi největší skupinu konstrukčních materiálů pro automobilový průmysl. V osobních automobilech nalézá nejširší uplatnění ocel ve formě plechů, trubek, profilů, výkovek a odlitků. Dalším nejrozšířenějším materiálem je hliník, který se vyznačuje nižší hmotností ve srovnání s ocelí a ve formě plechu je stále častěji využíván pro prvky karoserie, kde nahrazuje plechy ocelové a dále pro výztuhy nárazníků a dveří. U sportovních a závodních vozidel se výhodně využívá jako primární materiál pro výrobu karoserie. Novým a progresivním materiálem jsou kovové pěny pro výrobu kovových kompozitních dílců. Tento porézní materiál má vysokou schopnost pohlcování kinetické energie nárazu a má anti vibrační a protihlukové vlastnosti. Tato pěna je nejčastěji vyráběna z hliníku a tvoří výplň profilů deformačních zón automobilu.

Poznatky a aplikace materiálů ze stavby osobních automobilů jsou často použity i na stavbu závodních vozidel, ovšem v modifikacích, které vyžadují vyšší konstrukční, pevnostní a bezpečnostní nároky. Kovové materiály jsou v závodních vozidlech často nahrazovány kompozitními, které jsou schopny žádané vlastnosti kovů nahradit nebo je převýšit a často se vyznačují i jinými výhodnými vlastnostmi, díky nimž je daný kompozit použit jako náhrada kovového materiálu.

1.3.2 Trubkový ocelový rám

Nejčastěji používaným typem rámu pro Formuli Student je svařovaný trubkový rám z oceli o obsahu uhlíku min. 0,1% a minimálním průměru trubky 1 palec (25,4 mm) dle předpisů soutěže Formula Student [3]. Tato příhradová konstrukce je používána zejména začínajícími týmy pro její jednoduchou konstrukci, snadnou výrobu, vysokou pevnost, snadnou modifikovatelnost, nízké výrobní náklady a z důvodu velkého výběru materiálů trubek a profilů dostupných na trhu. Jednoduše také lze zjistit napětovou analýzu a torzní tuhost rámu. Tento typ rámu ale některé týmy opouští z důvodu jeho vysoké hmotnosti a soustředí se na vývoj alternativních rámu, například z uhlíkového kompozitu.

Například konstrukční tým CTU CarTech ČVUT v Praze použil této konstrukce rámu na svém vozu FS.03. Byly použity trubky z vysokopevnostní oceli 15CDV6 a svařeny metodou TIG. Hmotnost tohoto rámu činila 34 kg. [4] [5]

Jakožto materiál trubek přijatelný pro svařovanou konstrukci rámu lze použít i běžné oceli, např. ocel ČSN 41 5230. [6]



Obr. 1. Svařovaný rám Formule Student konstrukčního týmu univerzity v Oulu, Finsko. [7]

1.3.3 Ramena zavěšení náprav

Ramena zavěšení náprav patří k neodpruženým hmotám vozidla. Konstrukce zavěšení u závodních vozidel typu formule je řešena rameny uchycenými na trubkový rám či monokok a spojena s těhlicí.

Nejpoužívanějším materiálem ramen je vysokopevnostní ocel. Ocelové trubky jsou ukončeny kulovou hlavicí, která slouží pro upevnění ramen na těhlici a na rám vozidla. Vnitřní částí hlavice je kulové ložisko, které umožňuje vymezený pohyb hlavice na čepu a zajištění geometrie nápravy. Tato hlavice je do ramena našroubována vlastním dřikem nebo připevněna svařováním v případě použití ramen z oceli či slitin.



Obr. 2. Detail uchycení ocelových ramen k těhlici vozidla Formule Student. [8]



Obr. 3. Ocelová kulová hlavice ramena zavěšení nápravy. [9]

Tato konstrukce pomocí trubkových či tyčových ramen poskytuje dostatečnou tuhost podvozku a schopnost tlumení rázů při jízdě vozidla, kdy jsou ramena staticky a dynamicky namáhána.

Z důvodu zlepšení aerodynamických vlastností jsou též používána ramena zploštělá.

1.3.4 Těhlice

Těhlice patří k neodpruženým hmotám vozidla. Je to část nápravy automobilu, v níž je uložen náboj kola, a jsou k ní připevněna ramena nápravy, pružící a tlumící prvky nápravy, brzdové prvky a tyče řízení. Těhlice přenáší veškeré silové a momentové působení při jízdě vozidla mezi jím a vozovkou. Nejčastějším konstrukčním materiálem je vysokopevnostní ocel a hliníkové slitiny a může být vyrobena obráběním, odléváním či svařováním. [10]



Obr. 4. Těhlice vozidla Formule Student vyrobená obráběním z hliníkové slitiny. [10]

1.4 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY

1.4.1 Obecné charakteristiky

Kompozit je z obecného hlediska každý materiálový systém, který je složen z více (nejméně dvou) fází, z nichž alespoň jedna je pevná, s makroskopicky rozeznatelným rozhraním mezi fázemi, a který dosahuje vlastností, které nemohou být dosaženy kteroukoliv složkou (fází) samostatně, ani prostou sumací. [11]

Účelem vyrobení kompozitních materiálů je potlačit nedostatky jednotlivých konstrukčních složek a naopak vyzvednout a účelně využít jejich přednosti podle potřeb navrhované konstrukce.

Aplikaci svých výhodných vlastností kompozity naleznou ve specializované malovýrobě, např. při konstrukci speciálních a závodních vozidel, při výrobě malých sportovních lodí a ultralehkých letadel, ve výrobě sportovních potřeb a v kosmonautice.

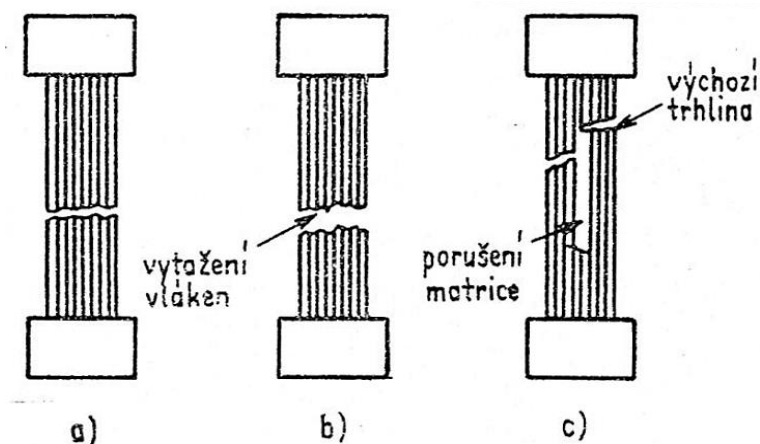
1.4.2 Struktura kompozitních materiálů

Kompozitní materiály se skládají z matrice a vyztužujících prvků (částice nebo vlákna). Mohou být typu kov-kov, keramika-kov, keramika-polymer, keramika-keramika a polymer-polymer. Největšího průmyslového využití dosáhly kompozity na bázi organických pryskyřic vyztužených různými typy keramických nebo anorganických vláken.

1.4.3 Porušení dlouhvláknových kompozitů

Při podélném tahovém namáhání dlouhvláknového jednosměrného kompozitního materiálu vznikají tři druhy porušení, které závisí na vlastnostech materiálu výztužných vláken, materiálu matrice a také na technologii výroby kompozitu. Druhy porušení v tomto případě jsou:

- křehké porušení,
- křehké porušení s vytažením vláken,
- křehké porušení s oddělením složek nebo porušením matrice



Obr. 5. Mechanismy porušení dlouhvláknových kompozitů při podélném tahovém namáhání. [12]

1.4.4 Vlastnosti kompozitů pro technickou praxi

V Tab. 2 jsou uvedeny vlastnosti druhů kompozitů podle použití vyztužujících vláken z hlediska potřeb technické praxe. Při výběru vhodného typu vyztužujícího vlákna hrají tyto vlastnosti důležitou roli společně s pořizovací cenou vláken (Tab. 3). Ta se liší podle suroviny a jejího zpracování při výrobě vláken a běžně se pohybuje od 2 € do 300 € za 1 kg vláken. [13] Cenové údaje pochází z roku 2005 a již nejsou aktuální, nicméně mohou posloužit jako představa o rozdílech cen jednotlivých typů výztužných vláken.

Tab. 2. Srovnání vlastností vybraných druhů kompozitů (+ příznivé, ++ velmi příznivé, - nepříznivé). [13]

Vlastnosti	Kompozity		
	vyztužené sklem	aramidové	uhlíkové
Hustota	+ -	++	+
Mez pevnosti v tahu	+	+	+
E-modul	-	+	++
Mez pevnosti v tlaku	+	-	+
Rázová houževnatost	+	+	-
Tlumení vibrací	-	+	-
Chování při statickém a dynamickém namáhání	+	+	++
Dielektrické vlastnosti	++	++	-
Adheze	++	-	+
Nasákavost	+	-	+
Cena	++	+ -	-

Tab. 3. Srovnání cen materiálů vyztužujících vláken, údaje z roku 2005. [13]

Materiál vlákna	Cena [€/ 1 kg]
Sklo	2 ÷ 3
Aramid	20 ÷ 30
Uhlík standardní typ (HT, IM)	20 ÷ 80
Uhlík vysokopevnostní typ (HM)	100 ÷ 500
Uhlík speciální typ (HT, UHM)	100 ÷ 1000

1.4.5 Využití kompozitů v konstrukci závodních automobilů

Při aplikaci kompozitních dílů v automobilovém průmyslu je třeba rozlišit jejich použití pro interiér a pro exteriér. V interiéru takové díly nejsou výrazně mechanicky namáhány a slouží jen jako designový doplněk či alternativa běžně používaných materiálů za účelem snížení hmotnosti. Výroba takových kompozitních dílů nevyžaduje předchozí mechanické výpočty či simulace namáhání a také samotná výroba nemusí být příliš důkladná a nemusí být použito složitých vyztužovacích vrstev. Cena těchto dílů bývá z důvodu výše

uvedených skutečností poměrně nízká a tyto díly jsou rozšířeny i do osobních sportovních automobilů.

Při použití kompozitních materiálů v exteriéru coby konstrukčních prvků jsou od těchto vyžadovány určité mechanické vlastnosti, kterých lze dosáhnout cílenou výrobou kompozitu.

V závodním automobilovém průmyslu je v dnešní době nejvíce používáno kompozitů s polyesterovou, vinylesterovou a nejčastěji epoxidovou matricí vyztuženou skleněným nebo častěji uhlíkovým vláknem. Z praktického hlediska s ohledem na co nejlepší mechanické vlastnosti kompozitních dílů se vyztužující vlákna vrství do laminátů. V této podobě nalézají v závodních automobilech nejširší uplatnění.



Obr. 6. Formule Dragon 4 univerzitního týmu TU Brno Racing s uhlíkovým monokokem a uhlíkovými přitlačnými křídly. [14]

Ve speciálních sportovních vozidlech určených veřejnosti nalézají skleněné a častěji karbonové kompozity své uplatnění jako materiál pro pohledové součásti interiéru, přitlačná křídla, nárazníky, části karoserie či celé samonosné karoserie (monokok).

Aplikaci kompozitů do závodních vozidel předurčuje jejich unikátní kombinace vlastností, kterou nenajdeme u žádného jiného konvekčně používaného materiálu. Například v porovnání s ocelí poskytuje kompozit z uhlíkového vlákna dvojnásobnou pevnost při pětinové hmotnosti. [15]

Uhlíkové kompozity jsou také schopny absorbovat mnohem větší množství energie ve srovnání s ocelí, jelikož se při nárazu lámou na velké množství malých úlomků na rozdíl od ocelí a jiných kovů, které zůstávají kompaktní a pohlcenou energii obtížně přemění na mechanickou deformaci hmoty. [15]

Kompozity se výrazně nedeformují, mají vysokou mez únavy a jsou do jisté míry ohnivzdorné. U kompozitů s epoxidovou matricí může být nevýhodou citlivost matrice na ředidla. Jiné běžné chemikálie jako vazelína, oleje, rozpouštědla, barvy či ropa kompozity nepoškozují. Kromě vynikajících mechanických a pevnostních vlastností mají kompozitní materiály absolutní odolnost proti korozi i v agresivním prostředí, včetně UV záření a výborné tepelně izolační vlastnosti. [16]

1.4.6 Uhlíkový monokok

Jelikož monokok zaujímá ve vozidle největší z celého objemu vozidla, bude snížení jeho hmotnosti znamenat výrazné snížení hmotnosti celé konstrukce. Tradiční rám závodního vozidla z ocelových trubek lze nahradit uhlíkovým monokokem, jehož hmotnost může být téměř poloviční. [2] Samonosná karoserie (monokok) plně přejímá funkci nosného rámu a je na ni upevněno zavěšení předních a zadních náprav, mechanismus řízení, přední a zadní přítlačné křídlo a pohonné ústrojí. V místech upevnění těchto komponent má skořepina vhodná zpevnění výztuhami.

Například tým CTU CarTech ČVUT v Praze využil tento typ monokoku na svých závodních formulích FS.06 a FS.07. Nejnovější model jejich samonosného rámu použitého ve formuli FS.07 má hmotnost 26 kg, což je o 55% méně než hmotnost jejich prvního typu rámu použitého u formule FS.01 ze svařované příhradové konstrukce z ocelových trubek, která měla hmotnost 58 kg. [17]

Od roku 1988 je monokok na bázi uhlíkových vláken povinnou součástí závodních vozidel Formule 1 kvůli jeho vysoké pevnosti a bezpečnosti při nárazu. Prototypy skořepin musí projít náročnými zatěžkávacími zkouškami, mj. zkouškou čelního a bočního nárazu za daných podmínek, kdy může nastat jen předepsaná dovolená deformace sledovaných částí vozidla. Pokud monokok neobstojí v zatěžkávacích a bezpečnostních zkouškách, není celému vozidlu udělena homologace a není tak způsobilé pro závody Formule 1. [18]

Trend ve využívání uhlíkového laminátu coby konstrukčního materiálu monokoku závodních vozů se stále více rozšiřuje a je využíván i známými výrobci automobilů pro své závodní speciály.



Obr. 7. Závodní automobil Pagani Zonda R s uhlíkovotitanovým monokokem a karoserií. [19]

Při konstrukci vozidel Formule Student používají univerzitní týmy po vzoru Formule 1 laminátový uhlíkový monokok jako alternativu ke svařovanému trubkovému rámu či k monokoku z hliníkového plechu nebo hliníkového sendviče. Varianta provedení samonosného rámu z uhlíkového laminátu je velmi populární pro své unikátní vlastnosti jako je nízká hmotnost, vysoká pevnost a vysoká torzní tuhost, která převyšuje tuhost trubkových či sendvičových rámu. Pro výrobu skořepin jsou použity uhlíkové prepregy nebo uhlíková tkanina spojená epoxidovou pryskyřicí. Velmi namáhané oblasti jsou vyztuženy voštinovým nebo pěnovým jádrem.

Provedení šasi z kompozitového monokoku má nicméně i své nevýhody. Případné mechanické poškození lze jen obtížně opravit a toto místo již po opravě nebude mít svoji původní pevnost a jiné mechanické vlastnosti. Také pozdější modifikovatelnost konstrukce je složitá. [20] Výroba tohoto typu rámu je poměrně nákladná, a jelikož se nejedná o izotropní materiál, je náročné sestavit výpočtový model konstrukce.

Tohoto typu konstrukce monokoku v současnosti využívá např. závodní tým TU Brno Racing, závodní tým CTU CarTech ČVUT v Praze, tým University Racing Eindhoven, Rennteam univerzity ve Stuttgartu a mnoho dalších.

1.4.7 Sendvičový monokok

Výhodou hliníkového sendviče je nízká hmotnost, vysoká tuhost, korozivzdornost a dobré pohlcení kinetické energie nárazu. Nicméně tento sendvičový materiál špatně snáší bodové zatížení [21] a výroba monokoku z něj je finančně nákladnější.

Potahové plechy sendvičů mohou být hliníkové, ocelové, niklové nebo jsou použity lamináty z aramidové, skelné či uhlíkové tkaniny spojené pryskyřicí. Voštiny se vyrábí z tenkého plechu či papíru podobnému materiálu z aramidových vláken („Nomex“) nebo skelných vláken spojených fenolovou pryskyřicí. Nejvíce používaná kombinace materiálů pro monokok Formule Student je sendvičový panel z hliníkového potahového plechu či uhlíkové tkaniny a hliníkového voštinového jádra. Samonosná karoserie je vyrobena spojováním dílčích kusů nýtováním, lepením či šroubováním.



Obr. 8. Výroba hybridního monokoku z hliníkových sendvičových desek pro formuli Emma MT7 konstrukčního týmu Edith Cowan University Racing. [22]

1.4.8 Kapotáž ze skelného laminátu

Dalším materiálem pro výrobu trupu závodního monopostu je skelné vlákno spojené epoxidovou pryskyřicí. Tato skořepina tvoří pouze vnější kapotáž formule a není nosná. Nosný rám při tomto druhu provedení trupu je svařovaný z ocelových trubek a kapotáž ze skelného laminátu zde slouží především k zajištění dobrých aerodynamických vlastností. Tato konstrukce je alternativou ke kapotáži z uhlíkové tkaniny z důvodu nižších výrobních nákladů a jednodušší výroby.



Obr 9. Sklolaminátová kapotáž závodního vozu Dragon 1 týmu TU Brno Racing. [23]

1.4.9 Uhlíková přitlačná křídla

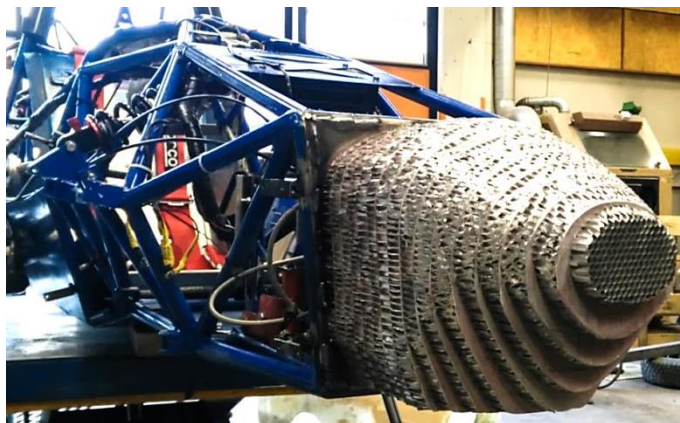
Úkolem zadního a předního přitlačného křídla u závodního automobilu je zlepšit jeho jízdní vlastnosti prostřednictvím přeměny dynamického proudění vzduchu na sílu, která působí na vozidlo a přitlačuje jej k povrchu vozovky. Jelikož se zadní přitlačné křídlo nachází poměrně vysoko nad vozovkou, je zájmem snížit jeho hmotnost na minimum, aby umístění masy křídla nezvyšovalo těžiště celého vozidla. Přední i zadní křídlo je nejčastěji vyráběno z uhlíkové tkaniny, která poskytuje dostatečnou tuhost a odolnost proti vibracím při její nízké hmotnosti. Například přední přitlačné křídlo u formule FS.07 týmu CTU CarTech ČVUT v Praze má hmotnost 3 kg a zadní křídlo 3,5 kg. [24] Tento materiál bývá často použit i na přitlačná křídla vozidel Formule 1.



Obr. 10. Přední přitlačné křídlo vozidla Formule 1 značky McLaren MP4-31 vyrobené z uhlíkového kompozitu. [25]

1.4.10 Sendvičový deformační člen

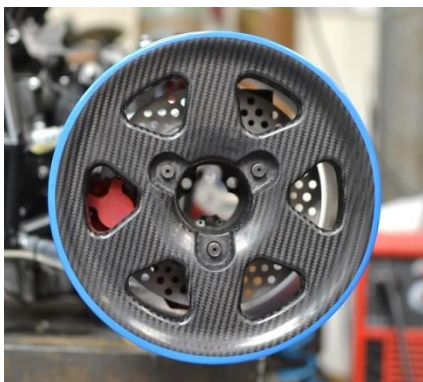
Deformační člen je povinnou výbavou každého vozidla Formule Student. Jedno z mnoha provedení je uvedeno na Obr. 11, kde je člen vyroben z hliníkového voštinového sendvičového materiálu. Tento materiál je pro konstrukci deformačního členu často používán z důvodu jeho poměrně nízké hmotnosti, nízkým výrobním nákladům a dobrého tlumicího účinku čelního nárazu.



Obr. 11. Deformační člen Formule Student z hliníkových voštinových desek týmu univerzity v Oulu, Finsko. [7]

1.4.11 Uhlíkové disky kol

Tým CTU CarTech ČVUT v Praze využil u svých formulí FS.06 a FS.07 uhlíkový sendvičový materiál pro výrobu disků kol. Na celém vozidle činí úspora hmotnosti přibližně 11 kg. Nový typ disku má hmotnost 1320 g, plastové nosné jádro, voštinovou výplň a povrch z uhlíkového laminátu. [26]



Obr. 12. Uhlíkovo-sendvičový disk kola formule FS.06. [26]



Obr. 13. Pohled na vnitřní strukturu uhlíkovo-sendvičového disku. [26]

1.4.12 Uhlíkové tyče zavěšení náprav

Formulová vozidla vyšších kategorií (Formule 1) používají primárně jako materiál ramen zavěšení náprav kompozitní materiály, nejčastěji na bázi uhlíkových vláken z důvodu snížení hmotnosti neodpružených hmot. Tento model je ovšem náročnější na zvládnutí problematiky spojení kompozitu a ocelové koncovky tak, aby ramena vydržela dynamická a cyklická zatížení na ně působící při jízdě vozidla. Kompozitní ramena kruhového průřezu jsou ukončena vlepenou kovovou koncovkou či kulovou hlavicí.



Obr. 14. Uhlíkové tyče náprav s ocelovými koncovkami. [8]



Obr. 15. Grafika uhlíkových ramen náprav se dvěma druhy kovových koncovek. [8]

Tvar průřezu ramen lze modifikovat pro lepší aerodynamické vlastnosti. Ukončení tohoto druhu zploštělých ramen je řešeno pružnými ocelovými břity, ve své podstatě listovými pružinami, které zajišťují spojení ramena s karoserií.



Obr. 16. Aerodynamická ramena nápravy zakončená pružnými ocelovými břity. [9]

1.4.13 Ostatní použití kompozitních materiálů

Možností volby materiálů pro jednotlivé díly Formule Student je nepřehledné a každý konstrukční tým používá rozličné druhy materiálů s ohledem na své zkušenosti se stavbou závodních vozidel a dle svých finančních a konstrukčních možností. Neustálým trendem je vylepšování vlastností konstrukce vozidla a snižování hmotnosti jednotlivých dílů. Týmy z toho důvodu pro své nové verze formulí hledají nové materiály a jejich kombinace. Úspora hmotnosti na každém dílu je přínosem pro celkovou hmotnost vozidla a proto i méně důležité či malé prvky vozidla se vyrábí z kompozitu. Tyto prvky nejsou velmi zatěžovány a proto aplikace kompozitů jako konstrukčního materiálu je výhodná zejména z hlediska úspory hmotnosti.

Kompozitní materiály lze využít i v kokpitu formule, např. kompozitová skořepinová sedačka ve formuli FS.02 týmu CTU CarTech má hmotnost 1,5 kg oproti sedačce o hmotnosti 4 kg s kovovým rámem použité ve formuli FS.01. [5] Sedačku lze vyrobit také ze skelného laminátu. Tato konstrukce nabídne nízkou hmotnost při nízkých výrobních nákladech.

Z uhlíkové tkaniny se ve Formulích 1 vyrábí také tělo multifunkčního volantu. Tato aplikace má čistě za úkol snížit jeho hmotnost.

2 KONSTRUKCE A TECHNOLOGIE SPOJŮ KOV-KOMPOZIT

Spoj mezi kovovým a kompozitovým materiálem lze uskutečnit několika způsoby. Budeme uvažovat pouze kompozity s polymerní matricí a možnosti vytvoření jejich spojení s kovovým materiálem.

2.1 Mechanická spojení

Spoj mezi kovovým a kompozitním materiálem lze provést tradičními mechanickými způsoby spojování materiálů. Lze sem zařadit spojování šrouby, nýty a čepy.

K vytvoření tohoto spoje je nutné vytvoření otvorů do jednoho či do všech spojovaných dílců a následné vložení spojovacího elementu. Výraznou nevýhodou je skutečnost, že vyvrtáním otvoru do materiálu oslabíme jeho místní pevnost, což může zvláště u vláknového kompozitu znamenat výrazné snížení pevnosti celého dílce či případnou delaminaci.

Výhody mechanických spojů:

- Rychlá, snadná a levná metoda.
- Snadné mechanické výpočty namáhání spoje.
- Není potřeba specifické přípravy materiálu.
- Rozebíratelné spoje (kromě nýtování).

Nevýhody mechanických spojů:

- Podstatné zvýšení hmotnosti celku přidáním spojovacích elementů.
- Nutnost vytvoření otvorů do spojovaných materiálů – zmenšení nosného průřezu materiálu a vznik koncentrace napětí v okolí otvorů.
- Přečnívající matice či hlavy šroubů, nýtů a čepů.
- Malý prostor pro dilataci spojů.
- Tekutinová netěsnost spojů.

2.2 Zalaminování kovového dílce

Spoj kovového a kompozitního materiálu lze vytvořit přímo při výrobě kompozitního dílce zalaminováním kovového dílce do objemu kompozitu. Ve své podstatě se jedná o druh lepení, jelikož kovový materiál je v celku připevněn polymerem (matricí) se schopností adheze a koheze. Kovový dílec se v podstatě stane součástí kompozitního dílu a je matricí

spojen s vyztužujícími elementy. V případě namáhání spoje je nutné vhodně upravit povrch kovového dílce pro lepší adhezi matrice ke kovu a tím zvýšení pevnosti spoje mezi materiály. Tímto způsobem jsou vytvářeny tzv. inserty, díly zakomponované do matrice kompozitu pro místní zpevnění dílce. Pevnost spoje mezi kovovým dílem (insertem) a kompozitem je v případě neupravení geometrie vyztužujících prvků kompozitu vzhledem k insertu daná pouze adhezními a kohezními schopnostmi materiálu matrice.

2.3 Lepení

2.3.1 Obecné charakteristiky

Lepení je technologie spojování dílů pomocí lepidla. Lepidlo je látka, která je schopná svou soudržností (kohezí) a přilnavostí (adhezí) vytvořit spoj mezi povrchy. Pomocí vhodného lepidla lze spojovat dílce z nejrůznějších materiálů o libovolné tloušťce. Lepit lze kovy, polymery, kompozity, sklo, keramiku, přírodní materiály a jejich kombinace.

Oproti jiným technologiím spojování materiálů (např. svařování) není při lepení ovlivněn spojovaný materiál. Jelikož má každý lepený materiál specifické vlastnosti (nasákavost, absorpce plynů, struktura povrchu...), neexistuje univerzální lepidlo. Následně podle druhu spojovaného materiálu je zvoleno vhodné lepidlo za účelem vytvoření kvalitního a pevného spoje.

Výhody lepení: [28]

- Neovlivnění spojovaného materiálu a absence koncentrací napětí v něm.
- Lze lepit všechny běžné pevné materiály bez ohledu na jejich tloušťku.
- Tekutinová nepropustnost spoje.
- Výrazné nezvýšení hmotnosti celku.
- Vysoká pevnost spoje ve smyku.
- Rovnoměrné rozložení napětí do plochy spoje.
- Při dynamickém namáhání spoj rovnoměrně rozvádí pnutí.

Nevýhody lepení: [28]

- Nutná příprava spojovaných povrchů před lepením.
- Požadavky na čistotu a rovinnost spojovaných dílů.
- Nerozebíratelný spoj.
- U některých typů lepidel ztráta původních vlastností spoje s postupem času.

- Časově náročná technologie.
- Většina druhů lepidel neodolává vysokým teplotám.

2.3.2 Výběr lepidla

Úlohou konstruktéra v oblasti technologie lepení je volba vhodného druhu lepidla pro danou aplikaci a pro dané materiály určené ke slepení. Současně s tímto je nutno zohlednit další aspekty doprovázející použití lepidla (potřebná úprava povrchů, chování lepidla během lepení, způsob nanášení, technologické podmínky).

Druh zvoleného lepidla se řídí dle následujících kritérií:

a) Materiál adherendu

Základem je zjistit materiál spojovaného dílce a to z hlediska jeho struktury, složení, smáčivosti, propustnosti plynů, rozpustnosti v organických rozpouštědlech, popř. jeho tepelná roztažnost. Tyto vlastnosti adherendu jsou důležité pro samotné uskutečnění spoje lepením a pro výslednou kvalitu adheze, koheze a tuhnutí spoje.

b) Požadované vlastnosti spoje

Výběrem druhu lepidla lze určit vlastnosti, které bude spoj vykazovat. Jedná se o mechanické vlastnosti, teplotní odolnost, odolnost proti propustnosti kapalin a plynů, popř. chemická odolnost.

c) Mechanické vlastnosti spoje

Lepený spoj může být zatěžován staticky či dynamicky (např. trvalým chvěním, opakovanými rázy, kroucením).

Jeho statická pevnost je dána minimální pevností lepidla ve smyku, v tahu a v odlupování naměřenými na normovaných zkušebních tělesech připravených z materiálů budoucích adherendů, povrchově upravených předpokládanými metodami (zdrsnění, odmaštění...) a slepených vybraným lepidlem.

Hodnocení dynamicky namáhaných spojů je obtížnější, jelikož toto namáhání je obtížně definovatelné. Jedná se zejména o amplitudově a časově proměnná zatížení a nahrazení tohoto druhu namáhání zkušební metodou je značně komplikované. Díly takto zatěžované lze nalézt v aplikacích v automobilovém a v leteckém průmyslu.

Druhy lepidla dle způsobu tuhnutí:

- Lepidla vytvrzovaná chemickou reakcí,
- Lepidla vytvrzovaná dodáním energie (UV záření, teplo),
- Lepidla vytvrzovaná okolní vlhkostí,
- Lepidla vytvrzovaná v důsledku vsáknutí a odpařením rozpouštědla,
- Lepidla tavná,
- Lepidla stále lepivá.

2.3.3 Konstrukce lepených spojů

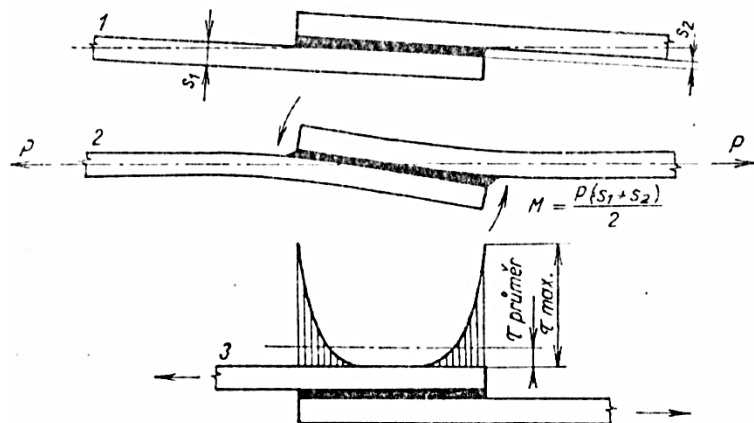
Lepené spoje mohou být namáhány v tahu, tlaku, ve smyku, v odlupování, v rázové pevnosti, v kroucení apod. Chování lepeného spoje v každém z těchto případů namáhání je velmi specifické a jeho pevnost se bude dle druhu zatížení lišit.

Konstrukce musí být upraveny tak, aby spoj byl co nejméně namáhán v odlupování a v krutu, na něž je většina druhů lepidel náchylná. V těchto případech se namáhání soustřeďuje pouze do určitých míst spoje, což vede k lokálnímu přetížení a následnému poškození filmu lepidla. Vhodná konstrukce spoje by měla zajišťovat pouze namáhání spoje na smyk, jelikož právě v tomto případě vykazuje většina druhů lepidel nejvyšší pevnost. [28]

2.3.4 Přeplátované spoje

Spoje jednostranně přeplátované patří mezi plošné spoje a využívají se zejména při lepení tenkých materiálů (folie, plechy, profily, tkaniny, papír...). V těchto případech lze zanedbat vliv ohybového momentu vznikajícího následkem excentricky zatíženého spoje jako tomu je u souboru tlustších adherendů. U jednostranně přeplátovaných spojů se tahové napětí soustřeďuje především na obou koncích přeplátování a působí zde jako síla podporující odlupování. Při zvyšujícím se zatížení se na obou koncích přeplátování zvětšuje napětí až do kritického momentu, kdy se spoj směrem od konců přeplátování ke středu spáry naruší a roztrhne.

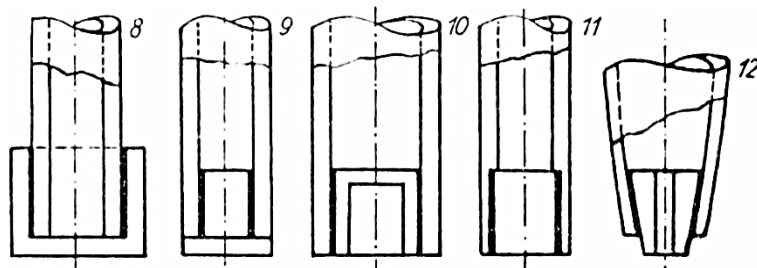
Největší hodnoty pevnosti většina lepidel vykazuje při namáhání ve smyku. Při tomto druhu namáhání vzniká napětí v rovině spoje vyvolané vnější silou, která na tuto rovinu tečně působí. Tečné (smykové) namáhání spoje lze vypočítat na lepených spojkách plošných a rotačních (trubkové, válcové) při jejich namáhání na tah, tlak či krut.



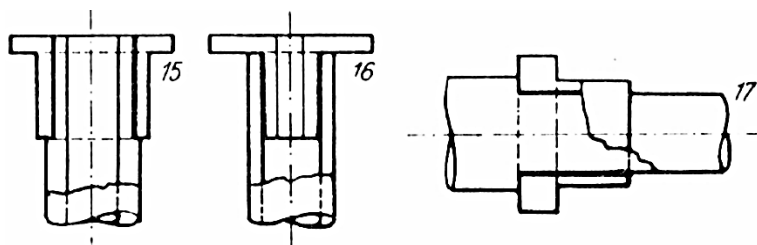
Obr. 18. Deformace jednostranně přelátovaného spoje v důsledku excentrického působení sil; rozdělení napětí po délce přelátovaného spoje. [28]

2.3.5 Násuvné (trubkové) spoje

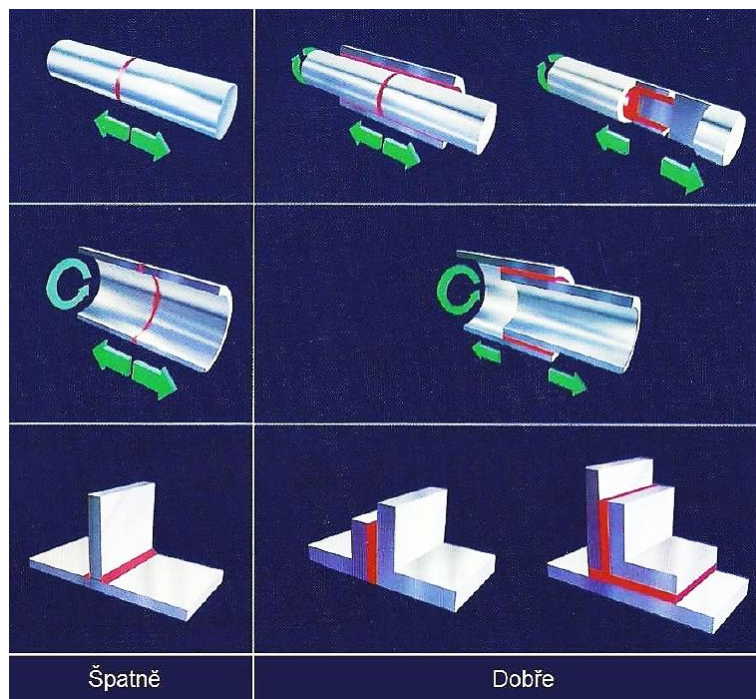
Obdobou přelátovaných plochých spojů a spojů s příložkami jsou lepené násuvné spoje. Tento druh lepených spojů se uplatňuje v případě spojování trubek, lepení přírub na trubky a vlepování koncovek do nich.



Obr. 19. Způsoby vlepení koncovek a zásepky do trubek. [28]



Obr. 20. Způsoby přilepení příruby na trubku. [28]



Obr. 21. Vhodné a nevhodné konstrukce koutových lepených spojů a lepených spojů trubek. [29]

2.3.6 Vlastní provedení lepení

Postup výroby lepeného spoje má základní fáze:

- Příprava spojovaného materiálu (adherendu),
- Příprava lepidla,
- Nanesení lepidla,
- Montáž spoje.

Příprava spojovaného materiálu

Úpravy lepených povrchů jsou pro dosažení maximální pevnosti spoje velmi důležité. Patří zde vyrovnání povrchu, odstranění nečistot a zvýšení adhezních vlastností. K těmto úpravám náleží také úprava vlhkosti nasákavých materiálů.

Způsob mechanického opracování ploch závisí na vlastnostech lepených částí, např. tloušťce stěn, tepelné odolnosti, tuhosti materiálu, na konstrukci spoje a také na prostředcích, kterými disponujeme. V průmyslu se kontaktní plochy upravují frézováním, soustružením, obrušováním či otryskáváním pro odstranění mechanických nečistot na povrchu adherendu, např. oxidů. Při těchto úpravách by měl být materiál co nejméně

mechanicky a tepelně namáhán či aby nedošlo k vnitřnímu pnutí. Povrch se nezdrsňuje u materiálů vláknitých nebo u výrobků s pěnovou strukturou.

Proces odmaštění povrchu adherendu následuje po jeho mechanickém opracování a předchází moření. K odmaštění lze použít rozpouštědla, která nenaruší spojovaný materiál a beze zbytku se odpaří. Úkolem rozpouštědla je odstranit z povrchu lepeného materiálu mastnotu, prach a jiné znečištění. Jako odmašťovací prostředek lze použít organická rozpouštědla (aceton, toluen, benzín, alkoholy). Poslední dvě jmenovaná rozpouštědla jsou vhodná k odmašťování termoplastů a pryže. K odmašťování kovů se používají zejména chlorované uhlovodíky. Povrchovou úpravu adherendů s dobrými adhezními vlastnosti (např. kovy) je možno omezit na broušení a odmaštění. [28]

Mořením chemickými činidly lze podstatně zlepšit adhezní vlastnosti kovů, skla, porcelánu a některých polymerů. Provádí se většinou agresivními kyselinami nebo zásadami podle druhu materiálu adherendu. Mořením je povrch adherendu jednak vyleptáván za vzniku tvarově výhodných nerovností mikropovrchu a také chemicky upravován. Leptáním povrchu je na mikroskopické úrovni zvětšována jeho plocha a vznikají malé dutinky, což má za následek větší adhezi lepidla k povrchu. Tento způsob je však ekonomicky nákladný z důvodu náročné manipulace s mořidly.

Kvalitu přípravy povrchu pro lepení je možno ověřit testem smáčivosti měřením dotykového úhlu vodní kapky či pomocí tzv. stupnicového testu. Jako rychlá metoda může posloužit pozorování vodního filmu na zešikmeném povrchu materiálu po jeho vyjmutí z vodní lázně. Jestliže film na materiálu zůstává v souvislé vrstvě, lze předpokládat dobré ulpění lepidla na povrchu. [28]

Nanesení lepidla

Při této operaci je vytvořen souvislý film lepidla na povrch adherendu o určité tloušťce. Množství naneseného lepidla se udává v $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ a závisí na druhu lepidla, porézności a rovinnosti lepených povrchů. Nános lepidla může být buď jednostranný (lepidla fenolická, epoxidová, močovinoformaldehydová, tavná a citlivá na tlak) či oboustranný (lepidla na bázi rozpouštědla a disperzní). Více se využívá oboustranný nános lepidla z důvodu zajištění rovnoměrného a jednolitého filmu na obou lepených površích. Jednostranný nános filmu se využívá z úsporných důvodů a v případech, kdy je oboustranný nános technicky obtížný (např. lepení folií). Lepidlo může být ručně nanášeno pomocí štětců, pístovými přípravky, nástřikem či různými způsoby strojově.

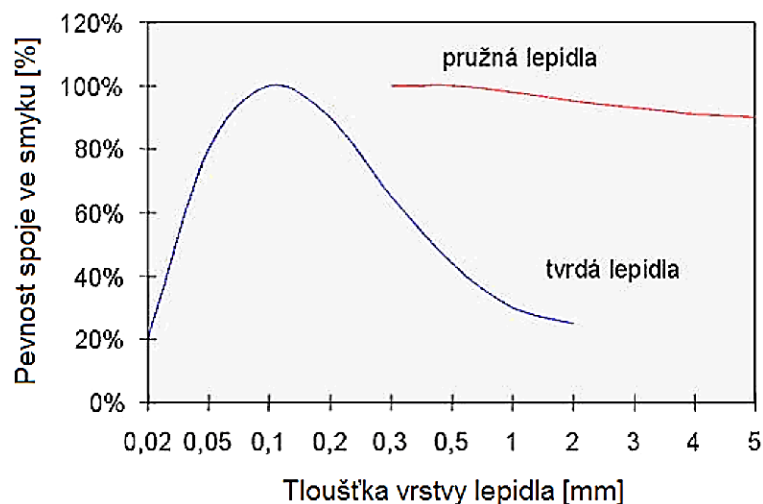
Montáž spoje

Lepené díly se pomocí vhodných přípravků vzájemně zafixují a pod předepsaným tlakem dojde k vytvrzení lepidla předepsanými technologickými podmínkami (zvýšená teplota, odpaření rozpouštědla, dodání záření), čímž dojde k vytvoření adhezního a kohezního spojení.

2.3.7 Vliv tloušťky lepidla na pevnost lepeného spoje

Nezanedbatelný faktor ovlivňující pevnost lepeného spoje je tloušťka nanesené vrstvy lepidla. Teoreticky lze stanovit optimální tloušťku filmu na 0,05 až 0,25 mm. Příliš tlustá vrstva má malou pevnost a příliš tenká vrstva je zase náchylná na dynamické zatěžování a podléhá únavě.

V praxi ovšem nelze jednoznačně určit optimální tloušťku vrstvy lepidla pro všechny jejich druhy, jelikož každý druh lepidla má svou maximální pevnost při různých tloušťkách filmu. Doporučená tloušťka vrstvy lepidla je dána jeho výrobcem.

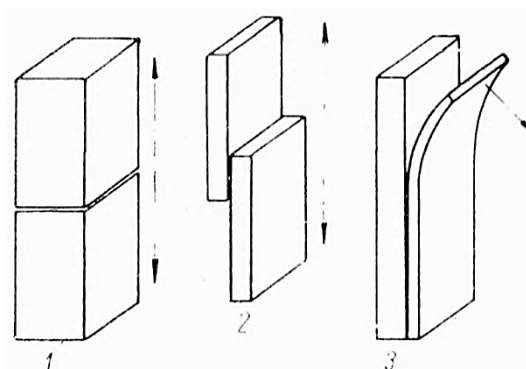


Obr. 22. Vliv pevnosti lepeného spoje na jeho tloušťce. [30]

2.3.8 Destruktivní zkoušení lepených spojů

Lepený spoj lze testovat na následující druhy namáhání: [28]

- Pevnost v tahu a ve smyku.
- Pevnost v odlupování.
- Rázová pevnost.
- Zkouška lámavosti.
- Zkouška soudržnosti.
- Zkouška časové pevnosti (únavová zkouška).

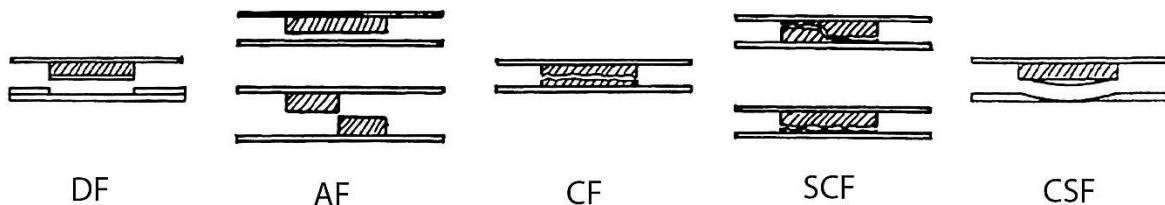


Obr. 23. Schéma zkoušek lepených spojů
(1 – pevnost v tahu, 2 – pevnost ve smyku,
3 – pevnost v odlupování). [28]

2.3.9 Druhy lomů lepených spojů

Při destruktivních zkouškách lepených spojů je vyhodnocována nejen jejich výsledná pevnost, ale také druh lomu spoje, který je pro praktickou aplikaci zvoleného lepidla rozhodující.

Druh lomu lepeného spoje je vyhodnocován dle normy ČSN ISO 10365. DF – delaminace substrátu, AF – adhezní lom, CF – kohezní lom, SCF – kohezní lom na hranici substrátu, CSF – porušení jednoho adherendu.



Obr. 24. Základní druhy porušení lepených spojů. [31]

2.3.10 Výpočet pevnosti lepeného spoje [30]

Stejně jako u jiných metod spojování materiálů, lze i u lepení vypočítat výslednou pevnost tohoto spoje. Napětí v přeplátovaném spoji namáhaným na smyk lze teoreticky vypočítat dle následujícího vztahu:

$$\tau_S = \frac{F}{A \cdot f_{ges}} \quad (1)$$

kde

τ_S – napětí lepeného spoje ve smyku [MPa],

F – silové zatížení spoje [N],

A – plocha spoje [mm²],

f_{ges} – celkový faktor vlivu [1].

Tzv. *celkový faktor vlivu* se skládá z dílčích faktorů vlivu pevnosti lepeného spoje, které jsou nutné pro teoretický výpočet pevnosti brát v úvahu:

$$f_{ges} = f_1 \cdot f_2 \cdot f_3 \cdot f_4 \cdot f_5 \cdot f_6 \cdot f_7 \cdot f_8 \quad (2)$$

kde

f_1 – faktor vlivu druhu adherendu [1],

f_2 – faktor vlivu tloušťky spáry [1],

f_3 – faktor vlivu drsnosti povrchu [1],

f_4 – faktor vlivu plochy spoje [1],

f_5 – faktor vlivu směru zatížení [1],

f_6 – faktor vlivu druhu zatížení [1],

f_7 – faktor vlivu provozní teploty [1],

f_8 – faktor vlivu druhu vytvrzení lepidla [1].

Při reálném zatěžování spoje již není zohledněn celkový faktor vlivu, jelikož reálná maximální silová únosnost spoje F_{MAX} je již celkovým faktorem ovlivněna.

Pro výpočet smluvní hodnoty pevnosti lepeného plošného přeplátovaného spoje ve smyku při zatěžování lze tedy použít vztah:

$$R_{mS} = \frac{F_{MAX}}{b_0 \cdot l_0} \quad (3)$$

kde

R_{mS} – smluvní pevnost lepeného spoje ve smyku [MPa],

F_{MAX} – reálná maximální silová únosnost spoje [N],

b_0 – počáteční šířka spoje [mm],

l_0 – počáteční délka spoje [mm].

Ve vztahu (3) je nově zavedena veličina smluvní pevnost ve smyku R_{mS} , jelikož při tahové zkoušce se s rostoucí zatěžující silou mění plocha spoje a síla je v takovém případě vztažena na hodnotu původní plochy spoje.

Pro výpočet smluvní pevnosti lepeného spoje o průřezu mezikruží ve smyku lze použít modifikovaný vztah:

$$R_{mS} = \frac{F_{MAX}}{\pi \cdot d_0 \cdot l_0} \quad (4)$$

kde

d_0 – hodnota počátečního středního průměru mezikruží spoje [mm],

l_0 – počáteční délka spoje [mm].

3 POPIS ZÁVODNÍHO VOZU FORMULE STUDENT

3.1 Soutěže Formula Student

3.1.1 Charakteristiky soutěží

Projekt „Formula Student“ vznikl roku 1998 jako evropská verze soutěže Formula SAE, kterou od roku 1981 pořádá společnost Society of Automotive Engineers („SAE“) ve Spojených státech Amerických. V Evropě projekt Formula Student pořádá společnost Institution of Mechanical Engineers („IMechE“) se sídlem ve Velké Británii.

Soutěže Formule Student jsou určeny pro týmy studentů technických vysokých škol, jejichž úkolem je podle soutěžních pravidel navrhnout, vyrobit a otestovat malý závodní vůz typu formule určený pro jízdu na závodním okruhu. Studentské týmy se musí zaměřit na konstrukci formule a její technická řešení, ale současně také na ekonomickou stránku projektu, fungování soutěžního týmu, jeho marketingové strategie a Public relations.

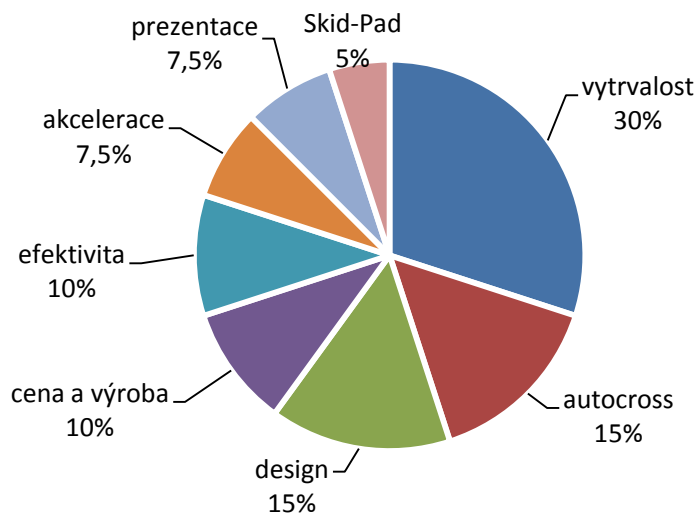
Vývoj a výroba vozu jsou brány jako podnikatelský plán pro fiktivní scénář - výroba formulového vozu s motorem o objemu do 610 cm³ pro amatérského závodníka holdující autokrosu nebo sprintu v roční výrobní sérii 1000 kusů. Vůz proto musí disponovat velkým výkonem ve smyslu co nejlepší akcelerace, brzdění a ovladatelnosti. Musí být levný, spolehlivý, údržba musí být snadná a musí být konkurenceschopný. Měl by být také esteticky na úrovni a maximálně využívat běžně dostupné součásti.

Každoročně se koná několik soutěží na závodních okruzích v Evropě i jinde ve světě. V Evropě např. v Německu (Hockenheimring), ve Velké Británii (Silverstone), v Itálii, ve Španělsku a od roku 2013 také v České republice na autodromu Most, kde soutěž pořádá společnost *Formula Student Czech Republic, s.r.o.* pod záštitou České automobilové společnosti.



Obr. 25. Logo společnosti Formula Student Czech Republic. [32]

Jsou stanoveny dvě kategorie vozů – formule se spalovacím motorem a elektroformule. Soutěž probíhá ve třech krocích: technická přejímka, statické disciplíny a dynamické disciplíny. Výsledné pořadí závodních týmů je dáno konečným součtem bodů z jednotlivých disciplín, kterými musí každé vozidlo projít.



Graf 1. Procentuální zastoupení podílu bodů ze soutěžních disciplín na celkovém hodnocení soutěžních týmů. [3]

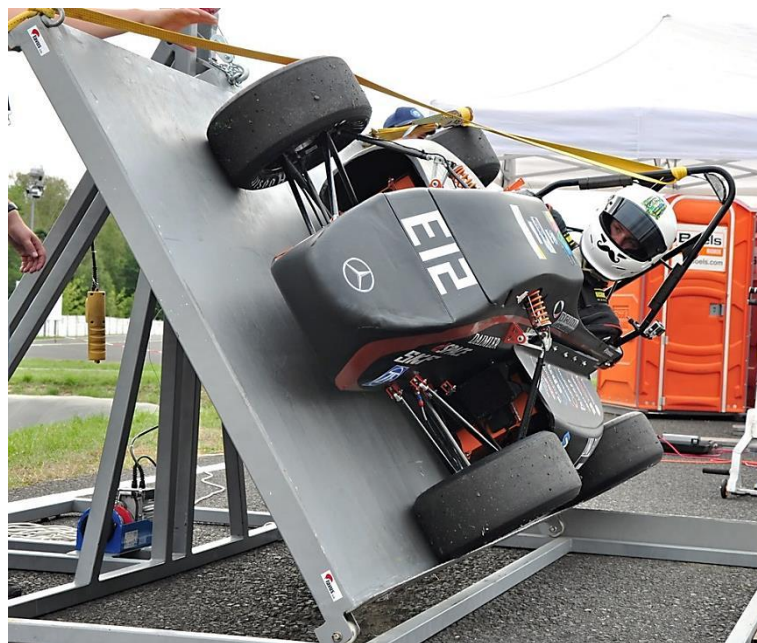
3.1.2 Statické disciplíny

Statické disciplíny jsou zaměřeny na vývoj vozu a jsou prezentovány soutěžními týmy odborné porotě. Týmy zde předloží zpracovaný katalog všech použitých dílů a jejich cenový rozpočet a prezentují svůj fiktivní podnikatelský záměr. Porota je brána jakožto vedení fiktivní výrobní společnosti a soutěžící mají za úkol porotu přesvědčit o kvalitách svého výrobního záměru, který spojuje výzkum, vývoj, finanční plánování a marketing daného projektu.

Nejvíce bodovanou statickou disciplínou je část Design (myšleno ve smyslu „návrh,“ nikoliv „vzhled“). V ní soutěžní týmy diskutují s porotou o technických řešeních použitých u svých závodních vozů a o vospělosti své konstrukce. Zde musí obhájit použité konstrukční a designová řešení částí vozu, popř. prezentovat své vlastní inovace konstrukce a tyto obhájit. Technická řešení musí doložit výpočty a simulacemi.

3.1.3 Dynamické disciplíny

Před započítím testovacích dynamických (jízdních) zkoušek závodních vozidel jsou tyto prohlédnuta a posouzena odbornými technikami, zda splňují soutěžní pravidla z hlediska konstrukce, použití předepsaných bezpečnostních prvků, výstroje řidiče a je otestována jejich funkčnost a bezpečnost při zkouškách brzdového systému, zkouškách náklonem a měřením úrovně hluku vozidel. Splnění těchto podmínek bezpečnosti a úspěšné absolvování testů je podmínkou pro vstup vozidla do dynamických disciplín.



Obr. 26. Zkouška vozidla náklonem. [33]

Dynamické disciplíny zahrnují:

- Akcelerace – zrychlení vozu na trati dlouhé 75 m s pevným startem.
- Jízda v osmičce („Skid-Pad“) – jízda na trati ve tvaru osmičky konstantní rychlostí pro otestování kvalit podvozku, hodnotí se čas průjezdu.
- Autocross – jízda na testovací trati cca 1 km pro zhodnocení akcelerace, decelerace a ovladatelnosti vozu.
- Vytrvalost – vytrvalostní závod na 22 km pro komplexní otestování všech systémů vozu při závodě na okruhu. V polovině ujeté vzdálenosti se musí vyměnit piloti a je sledována spotřeba paliva.
- Efektivita – celková spotřeba paliva ve vytrvalostním závodě vztažená na dosažený čas.

3.2 Vozidlo Formule Student FS.03

(Převzato z [4]).

Závodní vozidlo FS.03 konstrukčního týmu CTU CarTech ČVUT v Praze vyrobené v roce 2011 jako jeho třetí vývojový stupeň Formule Student.



Obr. 27. Vozidlo FS.03 CTU CarTech. [4]

3.2.1 Výsledky závodů

- Formula Student UK – 7. místo.
- Formula ATA Italy – 6. místo.
- Formula Student Spain – 2. místo.

Pořadí ve světovém žebříčku po sezoně 2011: 39. místo ze 481 závodních týmů.



Obr. 28. Formule FS.03 při závodě. [4]

3.2.2 Technické údaje

Tab. 4. Technické údaje vozidla FS.03.

Rám:	Prostorový trubkový rám z vysokopevnostní oceli (15CDV6), svařovaný metodou TIG, vybaven sendvičovou podlahou
Rozvor:	1610 mm
Rozchod (vpředu/vzadu):	1260/1180 mm
Hmotnost vozu (bez pilota):	225 kg
Rozložení hmotnosti (vpředu:vzadu):	45 : 55%
Zavěšení kol:	Nezávislé zavěšení všech kol, dvojitá A-ramena, nestejně délky na obou nápravách
Odpružení:	Typ pushrod na obou nápravách, tlumiče Penske
Pneumatiky:	Hoosier 20,5×7-13 R25B
Motor:	Yamaha YZF-R6 2007, řadový 4válec
Vrtání:	67 mm
Zdvih:	43 mm
Zdvihový objem:	599 ccm
Kompresní poměr:	12,8:1
Palivo:	RON 98
Maximální výkon:	63 kW při 12 500 min ⁻¹
Maximální točivý moment:	55 Nm při 10 500 min ⁻¹

4 ANALÝZA NAMÁHÁNÍ PODVOZKU ZÁVODNÍHO AUTOMOBILU

4.1 Zavěšení a tlumení odpružení závodních vozidel

4.1.1 Úloha a konstrukce nápravy

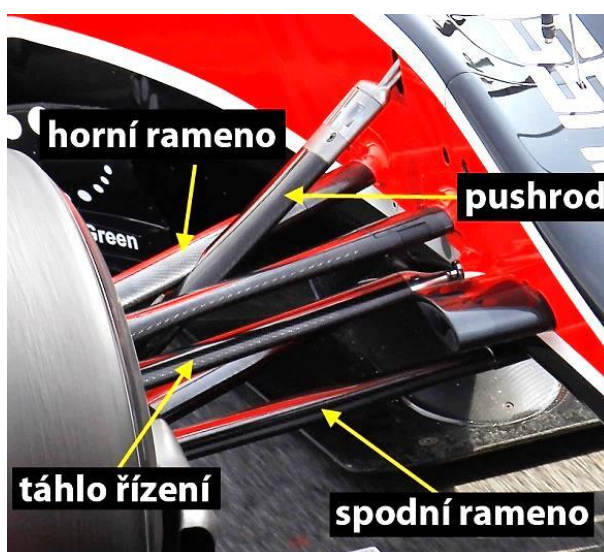
Konstrukce zavěšení nápravy kol automobilu má několik funkcí:

- Zajistit přilnavost pneumatik vozidla k povrchu vozovky.
- Umožnit odpružení jeho karoserie, zachycení rázů.
- Přenášet silové a momentové působení (síly hnací, brzdné, odstředivé, setrvačné a síly svíslé, které jsou důsledkem samotné tíhy vozidla) mezi karoserií a kolem.
- Zajistit vedení a správnou geometrii kol, ovladatelnost vozidla.

Ramena zavěšení společně s těhlicí, tlumiči, brzdovými, hnacími a ovládacími prvky tvoří nápravu vozidla.

4.1.2 Lichoběžníkové zavěšení

U závodních vozidel typu formule je využíván tento druh zavěšení. Jedná se o tzv. nezávislé zavěšení, kdy každé kolo vozidla má samostatné zavěšení a pohyby každého z kol jsou zcela nezávislé vůči ostatním. Dle pravidel Formule Student [3] je nutno použít výhradně nezávislé zavěšení kol.



Obr. 29. Schéma zavěšení předního kola Formule Student. Původní fotografie převzata z [34].

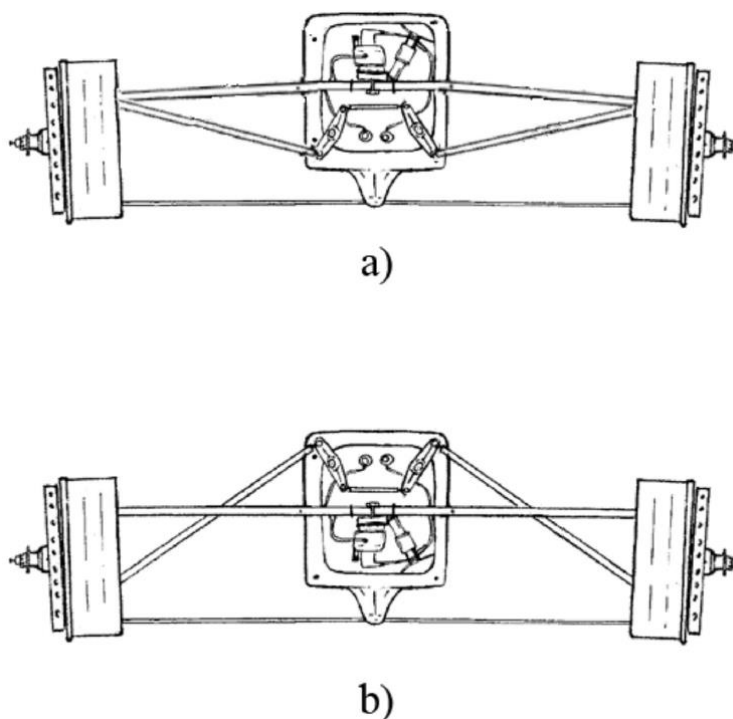
Lichoběžníkový závěs kol je typický pro vozidla typu formule a sestává ze dvou trojúhelníkových ramen (horní a spodní rameno), tyče řízení a tyče odpružení.

4.1.3 Systém odpružení pushrod – pullrod

Odpružení nápravy u lichoběžníkového systému zavěšení je realizováno pomocí tlačné („pushrod“) či tažné („pullrod“) tyče, která přes vahadlo připevněné k rámu vozidla přenáší na tlumič vertikální silové působení zavěšeného kola.

Oba systémy jsou si rovny z hlediska kinematiky a výsledných jízdních vlastností, liší se pouze konstrukčními výhodami, které umožňují. Výhoda pullrod tyčí spočívá v umístění komponent zavěšení poměrně nízko nad zemí, čímž se sníží těžiště systému.

Z mechanického hlediska je pullrod při zdvihu kola namáhán na tah, pushrod namáhán na vzpěr. Obvyklá aplikace pushrod systému je na předním zavěšení kol, na zadním zavěšení lze nalézt oba typy odpružení.



Obr. 30. Konstrukce odpružení typu a) pullrod a b) pushrod lichoběžníkového zavěšení kol. [35]

4.2 Namáhání ramen zavěšení kol

4.2.1 Případy namáhání ramen

Ramena zavěšení kol Formule Student jsou namáhána na axiální tah, axiální tlak, ohyb, vzpěr a rázově zatěžována v těchto případech:

- Vlastní tíha vozidla,
- Jízda konstantní rychlostí,
- Průjezd zatáčkou,
- Akcelerace,
- Decelerace,
- Přejezd nerovnosti.

Všechny tyto stavy silového zatížení tyčí zavěšení lze teoreticky vypočítat, známe-li technické parametry vozidla a geometrii jeho náprav.

Napětové stavy tyčí zavěšení kol lze také prakticky změřit pomocí tenzometrických snímačů umístěných na tyčích reálného vozidla při jeho jízdě ve výše uvedených jízdních režimech. Toto měření zatížení zavěšení je v praxi konstrukčními týmy často využíváno pro jeho reálné výsledky a lze při měření simulovat nejrůznější, až extrémní situace, kdy v takových případech by výpočet silového zatížení byl velmi komplikovaný či nepřesný.

4.2.2 Kvantifikace maximální zatěžující síly

V dokumentu [36] je jako maximální zatěžující síla ramena uvedena hodnota -3970 N.

Toto tlakové zatížení je největší statická axiální síla, kterou je zatíženo uhlíkové kompozitní rameno kruhového průřez vozidla Formule Student. Tento údaj je platný pro formuli FS.03 konstrukčního týmu CTU CarTech ČVUT v Praze.

Uvažujme absolutní hodnotu této síly jako obecnou referenční hodnotu maximálního axiálního zatížení tyče zavěšení kola standardního vozidla Formule Student.

Silová zatížení tyčí jednotlivých formulí různých konstrukčních týmů jsou rozdílná, vycházejme ovšem z předpokladu, že hmotnost této formule je obvyklá až vyšší ve srovnání s novými verzemi formule CTU CarTech a vozidly jiných konstrukčních týmů ([37], [38], [39]) a tudíž zatížení tyčí náprav jiných Formulí Student bude velmi podobné či nižší.

Pro porovnání výsledků únosnosti námi navrženého spojení bude použito procentuální vyjádření, kdy jako referenční únosnost trubky s koncovkou bude brána hodnota 3970 N:

$$Y_i = \frac{100 \cdot \tilde{F}_{iMAX}}{3970} \quad (5)$$

kde

Y_i – násobek referenční hodnoty silové únosnosti daného typu koncovky [%],

\tilde{F}_{iMAX} – medián silové únosnosti daného typu koncovky [N].

5 STATICKÉ ZKOUŠKY MATERIÁLŮ

5.1 Charakteristika zkoušek materiálů

Materiály se vyznačují nejrůznějšími vlastnostmi povahy fyzikální, chemické, mechanické a technologické. Z důvodu správného postupu zkoušky, interpretace zjištěných výsledků, reprodukovatelnosti a porovnatelnosti se konkrétní vlastnosti daného materiálu testují normovanými zkouškami na normovaných zkušebních tělesech.

Mechanickými zkouškami zjišťujeme chování daného materiálu při působení vnějších sil, tj. mechanické vlastnosti. Mechanické zkoušky dle charakteru působení sil na těleso lze rozdělit na statické a dynamické.

Statickými mechanickými zkouškami lze hodnotit chování materiálu působením stálého či pomalu a spojitě se měnícího silového zatížení a to z hlediska krátkodobého či dlouhodobého. Při krátkodobém statickém silovém působení se provádí zkoušky materiálu v tahu, tlaku, ohybu, krutu či střihu. Mezi dlouhodobé statické zkoušky patří zkoušky tečení a relaxace materiálu.

Výsledky statických zkoušek ovšem nedávají informace o chování materiálu při dynamickém zatížení, kterému jsou konstrukční součásti v praxi obvykle zatěžovány. Při něm často dochází k poruchám materiálu již při zlomkových hodnotách stejných mechanických vlastností zjištěných při statických zkouškách. Při dynamickém namáhání materiálu působí na těleso zatížení vnějšími silami skokově (namáhání rázové) či opakovaně proměnné (namáhání cyklické). [40]

5.2 Statická zkouška tahem

5.2.1 Charakteristika zkoušky

Statická zkouška tahem spočívá v deformaci zkušebního tělesa postupně se zvyšujícím tahovým zatížením malou předepsanou rychlostí, obvykle až do jeho mechanického porušení. Cílem zkoušky je stanovení napěťových a deformačních parametrů zkoušeného materiálu, které jsou potřebné pro mechanické výpočty při dimenzování dílců a volbu vhodného materiálu. Běžná zkouška tahem se provádí při teplotách okolí mezi 10 a 35 °C, dle potřeby lze ale materiály zkoušet při výrazně zvýšené či výrazně snížené teplotě. [40]

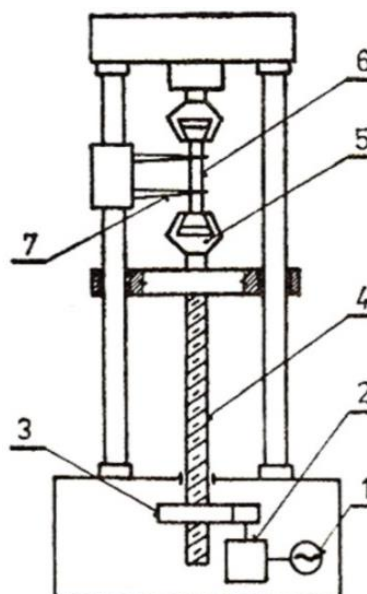
U kompaktních materiálů lze z průběhu napětí a vyvolané deformace zjistit charakteristické hodnoty meze úměrnosti, meze elasticity, meze kluzu a meze pevnosti.

U mechanických zkoušek spojů dílců lze zjistit hodnotu pevnosti testovaného spoje.

5.2.2 Zkušební stroj

Zkouška tahem je provedena na zkušebním stroji. Ten může být svým určením jednoúčelový či univerzální, na němž lze provádět několik druhů mechanických zkoušek.

Stroj je tvořen pevným rámem, upínacím ustrojím (5), do něž je upnuto zkušební těleso (6), a zatěžovacím ústrojím sestávajícím z pohybového šroubu (4), ozubeného kola s maticí (3), převodovky (2) a elektromotoru (1). Deformace zkušebního tělesa je zaznamenána snímačem prodloužení (7).

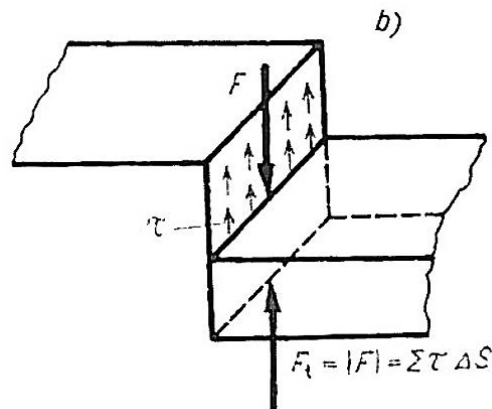


Obr. 31. Schéma mechanického univerzálního zkušebního stroje. [41]

5.3 Statická zkouška smykem

5.3.1 Charakteristika zkoušky

Zkouška prostým smykem je teoretický případ namáhání, kdy na zkušební průřez tělesa působí dvě síly opačného smyslu ležící na stejné nositelce, která prochází těžištěm průřezu.



Obr. 32. Příklad namáhání prostým smykem. [42]

Tento ideální případ namáhání se vyskytuje pouze u velmi přesného stříhání. V obecném případě zatěžující síly neleží na jedné nositelce a kromě posuvu ve směru nositelky sil dojde i k částečnému ohybu materiálu. V tomto případě hovoříme o smyku doprovázeným ohybem. V praxi můžeme použít výpočet smykového namáhání u zalícovaných kolíků a čepů, nýtových spojů a některých druhů svarů a spojů lepených, kde je rameno dvojice sil velmi nepatrné a spoj umožňuje pouze zanedbatelný ohyb.

Tento předpoklad upravuje rovnoměrné rozložení tečných (smykových) sil do celé plochy průřezu a pro výpočet pevnosti materiálu či spoje ve smyku lze použít vztah (3).

5.4 Statistické vyhodnocení zkoušek

Výsledky statických zkoušek prováděných na zkušebním stroji ZWICK 1456 byly z programu testXpert V7.11 exportovány do programu Microsoft Excel, kde bylo provedeno statistické vyhodnocení těchto naměřených dat. Pro vyhodnocení bylo využito následujících vztahů.

5.4.1 Aritmetický průměr

Aritmetický průměr výběrového souboru „ \bar{x} “ patří mezi míry centrální tendence naměřených hodnot a slouží k odhadu pravé hodnoty měřené veličiny a lze jej vypočítat jako sumu výsledků měření vydělenou počtem měření:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (6)$$

kde

n – počet měření,

x – hodnota měřené veličiny.

5.4.2 Směrodatná odchylka výběru

Směrodatná odchylka výběrového souboru „ s “ patří k charakteristikám variability zkoumaného souboru a slouží k odhadu statistické disperze naměřených hodnot základního souboru (indikuje vzájemné odlišnosti naměřených hodnot) a lze ji vypočítat:

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (7)$$

kde

n – počet měření,

x – hodnota měřené veličiny,

\bar{x} – aritmetický průměr výběrového souboru.

5.4.3 Medián

Medián řady hodnot statistického souboru „ \tilde{x} “ je míra centrální tendence souboru naměřených hodnot. V případě lichého počtu hodnot v řadě se jedná o prostřední hodnotu variační řady souboru uspořádané podle velikosti hodnot. Při sudém rozsahu hodnot souboru je medián definován jako aritmetický průměr dvou prostředních hodnot.

Medián není přímo ovlivněn výskytem extrémních hodnot ve zkoumaném souboru a v případě souboru s lichým počtem hodnot medián reprezentuje skutečnou změřenou hodnotu veličiny. Lze jej použít jako vhodnou charakteristiku středu souboru i v případě veličin s neznámým rozdělením.

5.4.4 Variační rozpětí

Variační rozpětí „ R “ řady hodnot patří k charakteristikám variability zkoumaného souboru a lze jej definovat jako rozdíl mezi největší a nejmenší hodnotou ve zkoumané variační řadě. Je ovšem ovlivněno hodnotami extrémů naměřených hodnot. Lze jej vypočítat:

$$R = x_{max} - x_{min} \quad (8)$$

II. PRAKTICKÁ ČÁST

6 CÍL BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Cílem této bakalářské práce je navrhnout několik druhů provedení kovové koncovky a tyto spojit lepením s kompozitovou trubkou z uhlíkového vlákna. Spleené vzorky provedení koncovek následně otestovat z hlediska přenosu statické axiální síly a na základě výsledků těchto zkoušek zvolit nejvhodnější typ úpravy koncovky z hlediska přenosu axiální síly.

Pokud bude síla přenesená spojením větší než hodnota maximální axiální síly, která na ramena nápravy vozidel Formule Student působí při jejich jízdě, je možná aplikace navrženého spojení v těchto závodních monopostech.

Pro praktické použití navrženého spojení koncovky s trubkou v závodním vozidle typu Formule Student by bylo v druhém kroku zapotřebí provést cyklické a dynamické zkoušky, při nichž by spoj byl namáhán cyklickými a rázovými zatíženími. Konstrukcí vozidla se při jízdě přenáší chvění a rázová silová namáhání způsobená nerovnostmi terénu, stylem jízdy (akcelerace, decelerace, náhlé vybočení) či vibracemi motoru a toto chvění a rázy se při jízdě přenáší na podvozek vozidla. Soubor těchto druhů namáhání je v praxi majoritním faktorem životnosti a pevnosti použitých materiálů a konstrukčních řešení v závodních vozidlech a několikanásobně převyšuje statické silové namáhání těchto dílů.

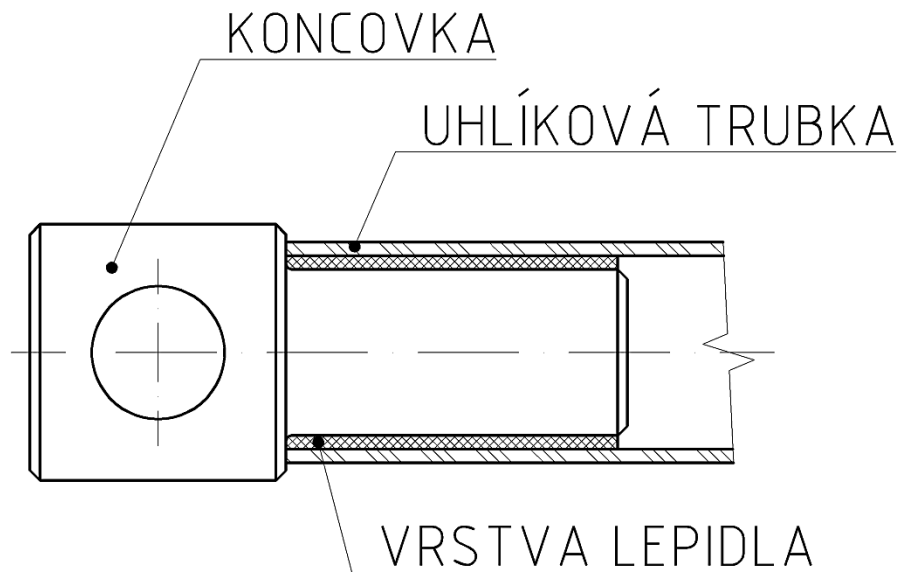
6.1 Rozvržení experimentu

Rozvržení průběhu experimentu je následující:

- 1) Návrh druhu spojení,
- 2) Změření vnitřního průměru trubek,
- 3) Výběr vhodného druhu lepidla,
- 4) Návrh druhů koncovek,
- 5) Výroba zkušebních vzorků,
- 6) Otestování pevnosti vlepených koncovek.

6.2 Návrh druhu spojení

Spojení kovové koncovky a uhlíkové trubky bylo zvoleno technologií lepení. Tento způsob spojení koncovek s rameny podvozku Formule Student je nejrozšířenější, je jednoduše proveditelný, mechanicky neoslabuje či jinak neovlivňuje rameno (trubku), vyznačuje se dostatečnou houževnatostí pro cyklické namáhání a výrazně nezvyšuje hmotnost podvozku.



Obr. 33. Schéma navrženého obecného spojení koncovky a trubky.
Bez měřítka.

6.3 Měření vnitřního průměru trubek

Pro experiment byly zvoleny dva kusy trubek „Trubka z uhlíkových vláken 20x18x1000 mm“. Tyto trubky byly rozřezány na 20 kusů, každý o délce 100 mm.

Pro navržení koncovek je nutno změřit vnitřní průměr zakoupených uhlíkových trubek. Jejich vnitřní průměr je výrobcem deklarován na 18 mm bez jakýchkoliv tolerancí rozměru a z důvodu přesného navržení průměru díků koncovek a od toho se odvíjející tloušťky lepeného spoje ($0,20 \div 0,25$ mm) je nutno vnitřní průměr trubek znát přesně.

Měření bylo provedeno posuvným měřidlem Uni-max 150 Digital 30 měřeními. Skutečný vnitřní průměr trubek byl změřen jako $d = 17,89 \pm 0,04$ mm.

Podrobné výsledky měření jsou uvedeny v příloze P I.

6.4 Druhy lepidel

S cílem nejvyšší možné pevnosti spojení kovové koncovky a uhlíkové trubky je potřeba vybrat lepidlo určené pro materiály spojovaných součástí s co možná nejvyšší smykovou pevností uváděnou výrobcem.

Jelikož je tato smyková pevnost ovlivněna řadou faktorů, zejména přilnavostí k adherendům, bylo přistoupeno k otestování několika druhů zvolených lepidel na

zkušebních panelech z materiálů budoucích adherendů koncovky a trubky s jejich budoucí povrchovou úpravou.

Výstupem těchto zkoušek bude volba typu lepidla, které je pro náš účel nejvhodnější a poskytne co možná nejvyšší pevnost spoje. Pro testy byla vybrána následující lepidla:

6.4.1 Cyberbond Epoxy Steel

Epoxidové dvousložkové lepidlo pro lepení ocelí, hliníku, litin. Pevnost lepidla v tahu 10 MPa. Konečná pevnost spoje po 24 hodinách.

6.4.2 Crestabond M1-05

Dvousložkové metakrylátové lepidlo pro lepení kompozitních a termoplastických materiálů a kovů. Pevnost lepidla v tahu 17 MPa. Konečná pevnost spoje po 24 hodinách.

6.4.3 Elan-tech AS 95/AW 95

Dvousložkové epoxidové lepidlo pro lepení kovů, oceli, skla, většiny plastů, keramiky a dalších. Pevnost spoje v tahu až 22 MPa. Konečná pevnost spoje po 24 hodinách.

6.4.4 HF MARKET A 5050

Dvousložkové metylmetakrylátové lepidlo pro lepení kovů, kompozitů, laminátů, skla, plastů, keramiky a dalších. Pevnost spoje v tahu až 39 MPa. Konečná pevnost spoje po 6 hodinách.

6.4.5 Epoxidová pryskyřice L 285

Laminační pryskyřice od dodavatele Havel Composites CZ pro výrobu laminátů z uhlíkových, skelných a polyamidových vláken. Použito tužidlo 285 od stejného dodavatele. Pevnost samotné pryskyřice v tahu 80 MPa. Konečná pevnost spoje po 24 hodinách.

Pozn.: Technické listy jednotlivých druhů lepidel jsou elektronickou přílohou práce.

6.5 Druhy materiálů pro zhotovení zkušebních vzorků

Pro výrobu zkušebních panelů a koncovek byly použity následující kovové materiály:

6.5.1 Ocel 11 321

Materiál panelů pro zkoušky pevnosti lepidel ve smyku. Jedná se o tažnou ocel pro výrobu tenkých plechů válcovaných za studena. Plechy jsou vhodné pro lakování, potiskování a pokovování. Obsah uhlíku max. 0,10 %. Pevnost v tahu 280 MPa.

6.5.2 Ocel 11 600

Materiál koncovek. Neušlechtilá konstrukční ocel pro výrobu strojních součástí namáhaných staticky i dynamicky. Polotovary: tyče, plechy, pruhy, dráty. Obsah uhlíku 0,5 % (nezaručeno normou). Pevnost v tahu 635 MPa.

6.5.3 Uhlíkový laminát

Kompozitní laminát z uhlíkové tkaniny KORDCARBON CC 280 T4 spojený epoxidovou pryskyřicí L 285 v kombinaci s tužidlem 285. Laminát byl vyroben ručním laminováním s použitím 5 vrstev tkaniny.

6.5.4 Uhlíková trubka

„Trubka z uhlíkových vláken 20x18x1000 mm“ vyrobená pultruzí výrobcem SECAR Technologie. Vyrobena z dlouhých uhlíkových vláken Tenax STS 5631 24K s jednosměrnou podélnou orientací spojených epoxy-vinylesterovou pryskyřicí.

Pozn.: Technické listy použitých materiálů jsou elektronickou přílohou práce.

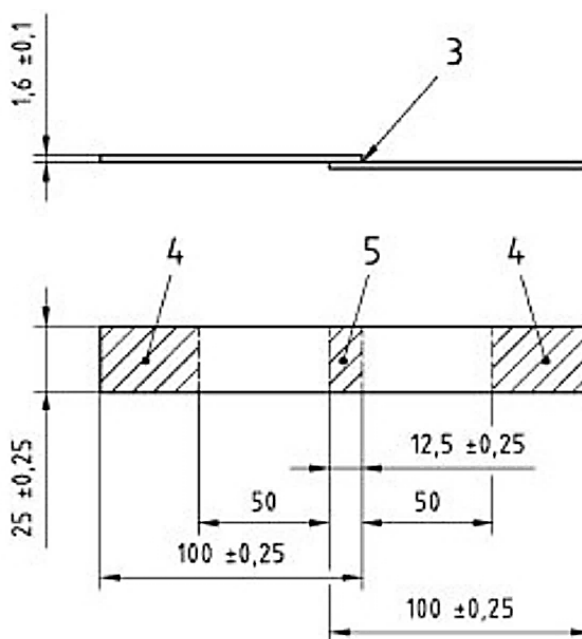
6.6 Zkoušení pevnosti lepidel

6.6.1 Úvod

U zvolených lepidel byla provedena zkouška pevnosti ve smyku lepeného spoje dle ČSN EN 1465.

Dle normy bylo stříháním vyrobeno 20 kusů zkušebních ocelových panelů a 20 kusů panelů z uhlíkového laminátu bylo nařezáno stolní kotoučovou pilou. Rozměry zkušebních těles byly dodrženy dle normy, pouze tloušťka panelů z uhlíkového laminátu byla výrobně dána na 2,3 mm.

Panely byly před lepením v místě budoucího přeplátování ošetřeny dle normy ČSN EN 13887. Jelikož zvolené druhy lepidel nevyžadují použití primeru či aktivaci povrchů adherendů, bylo přistoupeno k prostému odmaštění povrchů dřívků koncovek technickým lihem a odmaštění stejným způsobem vnitřních ploch trubek a jejich zdrsnění smirkovým papírem.



Obr. 34. Schéma sestavy zkušebních panelů dle normy ČSN EN 1465 (3 – vrstva lepidla, 4 – plocha pro čelisti zkušebního přístroje, 5 - plocha smyku). [43]

6.6.2 Příprava zkušebních vzorků

Pozn.: Fotografie přípravy zkušebních vzorků jsou uvedeny v příloze P II.

1) Odmaštění ploch panelů

Plochy zkušebních panelů byly odmaštěny v místě budoucího lepeného spoje technickým lihem naneseným na papírovou utěrku a plocha otřena třemi tahy ve směru orientace delší strany panelu. Lih se beze zbytku odpařil.

2) Vyměření délky přeplátování

Byla vyměřena vzdálenost 12,5 mm od kratší hrany panelu a odtud dále 50 mm směrem ke druhé kratší hraně panelu pro určení oblasti uchycení do čelistí zkušebního stroje.

3) Zdrsnění panelů smirkovým papírem

Plochy byly ručně zdrsněny třemi tahy smirkového papíru o zrnitosti 120 ve směru kolmém k ose budoucího namáhání spoje. Byla snaha o zachování konstantní přítláčné síly smirkového papíru k panelům v průběhu zdršňování všech kusů panelů.

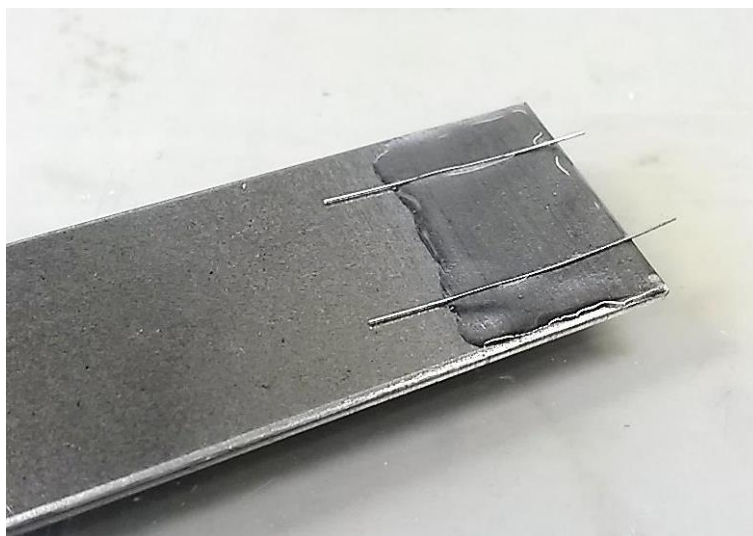
4) Aplikace lepidel

Zvolené druhy lepidel byly smíchány dle pokynů výrobce a okamžitě ručně nanесeny dřevěnou špachtlí na ocelový panel. Bylo vyrobeno pět kusů zkušebních vzorků od každého druhu lepidla. Vzorky byly očíslovány.

Tloušťka lepidla byla zajištěna dvěma ocelovými dráty vloženými do lepidla rovnoběžně s osou budoucího namáhání spoje. Tloušťka vrstvy lepidla byla dráty vymezena na 0,3 mm.

Tab. 5. Označení zkušebních vzorků dle použitého druhu lepidla.

Označení vzorku	Lepidlo
A	Cyberbond Epoxy Steel
B	Crestabond M1-05
C	Elan-tech AS 95/AW 95
D	HF MARKET A 5050
E	Epoxidová pryskyřice L 285



Obr. 35. Detail nanесení lepidla na panel a vložených vymezovacích drátků ve spoji.

5) Přilepení druhého panelu

Byl přiložen laminátový panel a ručně silou přitlačen k prvnímu panelu s vrstvou lepidla. Bylo otřeno přebytečné lepidlo a spoj zafixován pomocí kolíků na prádlo v předepsané velikosti přeplátování. Doba zaschnutí lepidel činila 25 hodin.

6) Odstranění přebytků lepidla

Zatuhnuté přebytky lepidel mimo vymezenou plochu přeplátování byly mechanicky odstraněny odlamovacím nožem. Bylo dbáno na co nejmenší mechanické ovlivnění budoucího testovaného spoje.



Obr. 36. Detail přeplátování lepeného spoje.



Obr. 37. Zkušební vzorek po všech úpravách.

6.7 Návrh typů koncovek

Adheze lepidla na povrchu dříků koncovek byla upravena na mikroskopické úrovni a zejména na té makroskopické vytvořením geometrií, které zvětšily povrch dříku nebo umožnily mechanické zajištění lepidla proti jeho smyku na dříku. Pro statistické vyhodnocení pevnosti jednotlivých typů konstrukce koncovek bylo vyrobeno pět kusů vzorků od každého provedení.

Byly navrženy čtyři typy koncovek:

- č. 1 – koncovka se zdrsňeným povrchem dříku na drsnost Ra 12,5,
- č. 2 – koncovka s dříkem opatřeným metrickým závitem,
- č. 3 – koncovka s dříkem upraveným pro aplikaci tlustší vrstvy lepidla,
- č. 4 – koncovka s děrami v dříku vzájemně posunutými o 90°.

Na koncovece bylo potřeba vytvořit otvor pro její uchycení k trubkovému nástavci zkušebního stroje prostřednictvím čepu. Čep (Obr. 38) je součástí tohoto stoje a slouží k uchycení upínacích čelistí do trubkového nástavce stroje. Tento čep má průměr 12 mm a byla navržena díra v koncovce o průměru 13 mm pro její jednoduché a dostačující uchycení k rámu zkušebního stroje.



Obr. 38. Čep pro uchycení koncovky k rámu zkušebního stroje.

Délka dříku byla zvolena na základě budoucí požadované únosnosti spojení lepeného spoje, která vycházela z následujících faktorů:

- Únosnost použitého lepidla – lepidlo D: $\bar{R}_{mS} = 19,7 \text{ MPa}$
- Střední průměr mezikruží lepeného spoje v trubce $d_0 = 17,89 - 2 * 0,1 \doteq 17,7 \text{ mm}$
- Požadovaná síla přenesená spojem (Kap. 4.2.2): $F_{MAX} = 3970 \text{ N}$

Z těchto veličin lze ze vztahu (4) vypočítat minimální délku přeplátování:

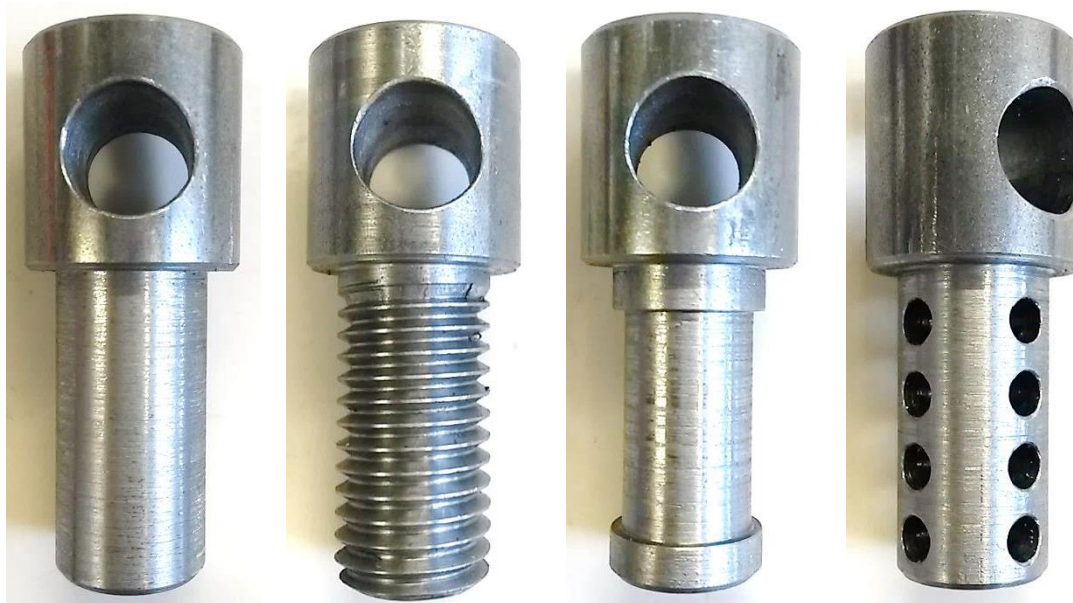
$$R_{mS} = \frac{F_{MAX}}{\pi \cdot d_0 \cdot l_0} \rightarrow l_0 = \frac{F_{MAX}}{\pi \cdot d_0 \cdot R_{mS}}$$

$$l_0 = \frac{3970}{\pi \cdot 17,7 \cdot 19,7}$$

$$l_0 = 3,6 \text{ mm}$$

Byla vypočítána teoretická minimální délka dříku koncovky. Tato délka byla ovšem předimenzována na 35 mm z důvodu dosažení lepší axiální únosnosti navržených typů koncovek a pro možnost aplikace konstrukčních modifikací dříků.

Konstrukční úpravy dříku byly navrženy s ohledem na jejich vzájemnou odlišnost způsobu ovlivnění pevnosti lepeného spoje.



Obr. 39. Typy provedení koncovek – zleva č. 1, 2, 3, 4.

6.8 Příprava zkušebních vzorků trubek s vlepenou koncovkou

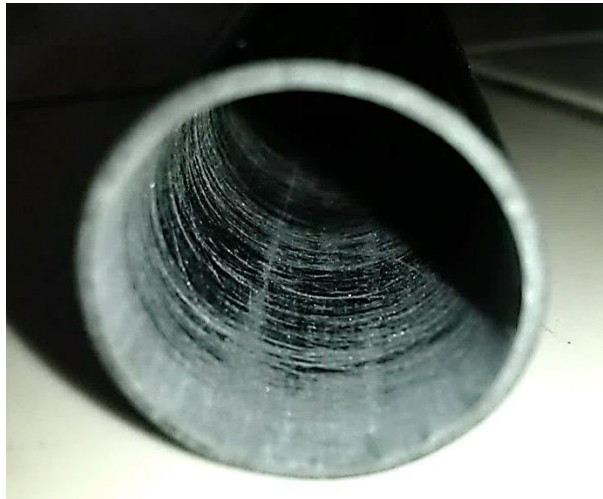
6.8.1 Odmaštění dříků

Plochy dříků byly odmaštěny technickým lihem naneseným na papírovou utěrku otřením dříků třikrát kolem jeho obvodu. Lih se beze zbytku odpařil.

Dříky byly označeny číslem provedení koncovky pro jejich pozdější identifikaci.

6.8.2 Odmaštění a zdrsnění vnitřního povrchu trubek

Vnitřní povrch nařezaných kusů trubek byl odmaštěn stejným způsobem jako plochy dřívků. Plochy byly dále ručně zdrsňeny pěti tahy okolo vnitřního obvodu trubky smirkovým papírem o zrnitosti 150 ve směru kolmém k ose budoucího namáhání spoje. Byla snaha o zachování konstantní přitlačné síly smirkového papíru k trubkám v průběhu zdrsňování všech jednotlivých kusů trubek.



Obr. 40. Detail zdrsnění vnitřního povrchu uhlíkové trubky.

6.8.3 Nanesení lepidla na dřívky koncovek

Přes statický směšovač bylo lepidlo HF MARKET A 5050 vytlačeno z kartuše a dřevěnou špachtlí nanášeno na dřívky koncovek. Ihned byla nasunuta připravená trubka a papírovou utěrkou odstraněny přebytky lepidla. Slepěný vzorek byl umístěn do vertikální polohy a ponechán tak po celou dobu schnutí lepidla.

Doba schnutí lepidla před jakoukoliv manipulací se vzorky činila 42 hodin.

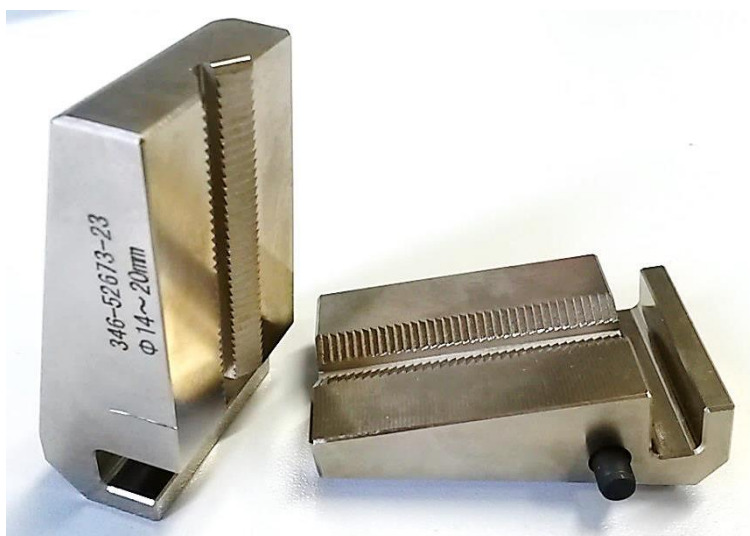


Obr. 41. Zhotovený zkušební vzorek trubky s vlepenou koncovkou.

7 NAVRŽENÍ A VÝROBA PŘÍPRAVKU PRO STATICOU ZKOUŠKU TAHEM

7.1 Úvod

Zkouška bude provedena na univerzálním zkušebním stroji ZWICK 1456. Tento stroj je opatřen trubkovým upínacím prvkem a výměnnými vložkami upínacích čelistí (Obr. 42) určenými pro upnutí trubek.



Obr. 42. Vložky upínacích čelistí zkušebního stroje pro upnutí trubek.

7.2 Úprava koncovky

Pro upevnění koncovky ke zkušebnímu stroji byl použit čep popsáný v kapitole 6.8. Úprava koncovky pro provedení testů spočívala pouze ve vytvoření díry pro čep.

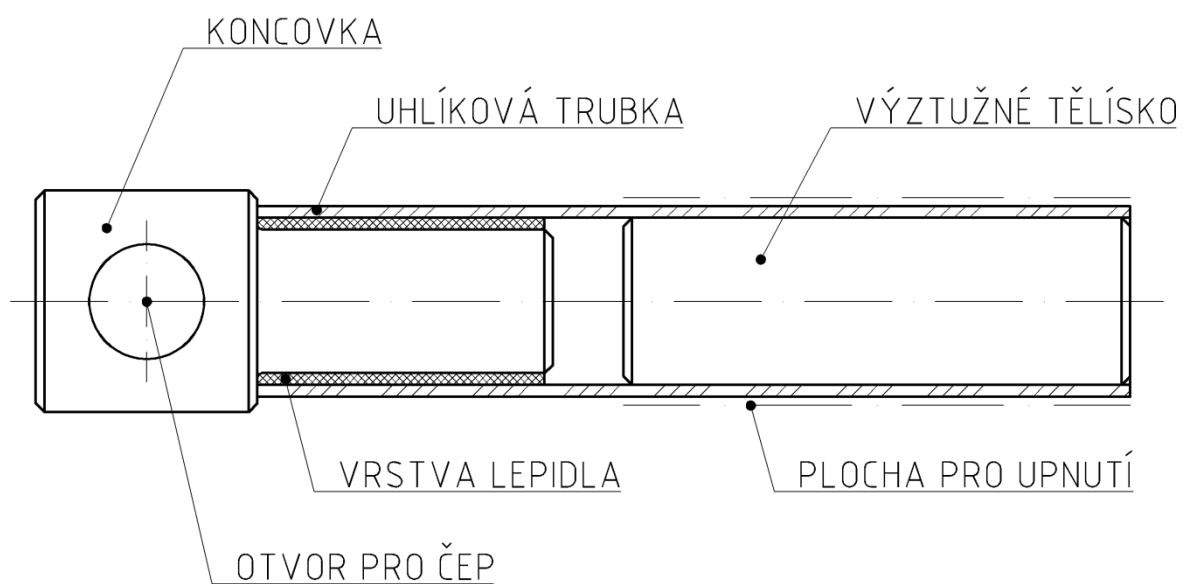
7.3 Úprava trubky

Zkušební stroj disponuje výměnitelnými vložkami upínacích čelistí pro upnutí trubek o průměru $14 \div 20$ mm. Úprava trubky pro zkoušku spočívala ve vsunutí kovového výtuzného válcového tělíska (Obr. 43) do části trubky, která byla upnuta v čelistech.



Obr. 43. Výztužné válcové tělísko.

Tato úprava zajistila tuhost upnuté části trubky, jelikož při tahové zkoušce je čelistmi vyvíjen značený tlak na upnutou část zkoušeného tělesa a v případě upnutí trubky hrozí její deformace a případné následné vysmeknutí z čelistí.



Obr. 44. Schéma sestavy zkušební vzorku trubky s vlepou koncovkou. Bez měřítka.

8 PROVEDENÍ ZKOUŠEK

8.1 Zkoušky lepidel

Na zkušebním stroji ZWICK 1456 byly provedeny smykové zkoušky lepidel osovým statickým tahem zkušebních vzorků. Od každého druhu lepidla bylo vyrobeno pět kusů vzorků. Vzorky byly upnuty do čelistí zkušebního stroje v místech určených normou ČSN EN 1465. Níže v Tab. 6 jsou uvedeny podmínky experimentu.

Tab. 6. Podmínky experimentu zkoušení pevnosti lepidel ve smyku.

Teplota v laboratoři na začátku měření:	23,7 °C
Teplota v laboratoři na konci měření:	23,2 °C
Relativní vlhkost vzduchu v laboratoři:	54 %
Rychlost posuvu čelistí zkušebního stroje:	10 mm.min ⁻¹



Obr. 45. Detail upnutí vzorku lepidla v čelistech zkušebního stroje.

8.2 Zkoušky vlepených typů koncovek

Na zkušebním stroji ZWICK 1456 byly provedeny statické tahové zkoušky vzorků uhlíkových trubek s vlepenými kovovými koncovkami. Od každého druhu provedení koncovky bylo vyrobeno pět kusů zkušebních vzorků.

Zkušební tělesa byla zatěžována tahovou osovou silou až do jejich přetržení. Do trubky každého vzorku bylo před zkouškou vsunuto výztužné válcové tělísko a trubka byla upnuta do čelistí zkušebního stroje. Kovová koncovka vzorku byla pomocí čepu uchycena k rámu stroje.

Tab. 7. Podmínky experimentu tahové zkoušky koncovek.

Teplota v laboratoři na začátku měření:	25,1 °C
Teplota v laboratoři na konci měření:	24,7 °C
Relativní vlhkost vzduchu v laboratoři:	58 %
Rychlost posuvu čelistí zkušebního stroje:	5 mm.min ⁻¹



Obr. 46. Detail upnutí vzorku trubky v čelistech zkušebního stroje.

9 VYHODNOCENÍ ZKOUŠEK

9.1 Vyhodnocení pevnosti lepidel

9.1.1 Charakteristika výsledků zkoušek

U každého vzorku byla sledována maximální síla přenesená plochou lepidla F_{iMAX} a následně přepočítána na maximální smluvní smykové napětí ve spoji R_{ims} . U obou souborů byla vypočtena směrodatná odchylka hodnot. Hodnoty byly takto zpracovány dle normy ČSN EN 1465.

U porušených zkušebních vzorků byly zaznamenány dva druhy lomů lepených spojů (Tab. 8). Určitý druh lomu byl zaznamenán vždy u všech zkušebních vzorků s daným druhem lepidla. Fotografie lomů vzorků lepidel jsou uvedeny v příloze P IV.

Vzorový výpočet pevnosti lepidla A pro jeho vzorek č. 1:

Dáno: šířka panelu $b_0 = 25 \text{ mm}$

délka přeplátování $l_0 = 12,5 \text{ mm}$

Naměřeno: $F_{A1MAX} = 1850 \text{ N}$

Výpočet - využít vztah (4):

$$R_{A1mS} = \frac{1850}{25 \cdot 12,5}$$

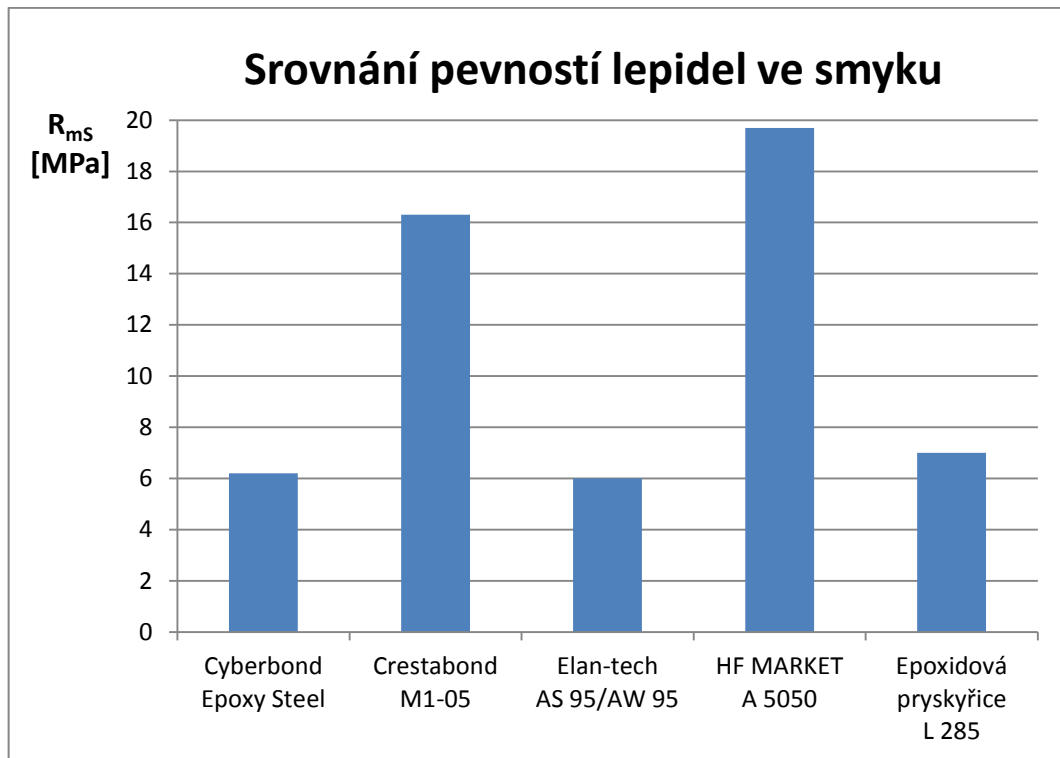
$$R_{A1mS} = 5,92 \text{ MPa}$$

9.1.2 Výsledky zkoušek

Tab. 8. Výsledná průměrná pevnost lepidel ve smyku a druh lomu spoje pro kombinaci materiálů kompozit s epoxidovým gelcoatem – kov.

Lepidlo	\bar{R}_{mS} [MPa]	s [MPa]	Druh lomu spoje
Cyberbond Epoxy Steel	6,2	1,1	adhezní
Crestabond M1-05	16,3	1,8	10 % SCF, 20 % AF, 70 % CF
Elan-tech AS 95/AW 95	6,0	1,1	adhezní
HF MARKET A5050	19,7	1,7	30 % AF, 70% SCF
Epoxidová pryskyřice L 285	7,0	1,9	adhezní

Pozn.: Podrobné výsledky zkoušek lepidel jsou uvedeny v příloze P III.



Graf 2. Srovnání pevností lepidel ve smyku pro slepení kombinace materiálů kompozit s epoxidovým gelcoatem – kov.

9.1.3 Závěr zkoušek

Z hodnot pevností ve smyku zvolených druhů lepidel vyplývá, že pro naši aplikaci, slepení kovové koncovky a uhlíkové kompozitové trubky, je nejvhodnější lepidlo HF MARKET A 5050 se střední pevností ve smyku $\bar{R}_{mS} = (19,7 \pm 1,7) \text{ MPa}$.

9.2 Vyhodnocení pevnosti vlepěných typů koncovek

9.2.1 Charakteristika výsledků zkoušek

U každého vzorku byla sledována maximální síla přenesená slepeným vzorkem koncovky a uhlíkové trubky F_{iMAX} . Naměřené hodnoty byly zpracovány jako hodnota mediánu a variační rozpětí souboru naměřených hodnot.

U všech typů vzorků bylo zatěžující tahovou silou způsobeno porušení matrice uhlíkové trubky, což mělo za následek porušení pevnosti lepeného spoje, vytržení segmentů trubek a poškození celkové pevnosti slepeného vzorku. Kompozice destrukce trubky byla u každého vzorku rozdílná, vždy však stejného charakteru a se stejnými důsledky.

Výsledky testování měly za cíl zjistit maximální přenesenou sílu daným typem koncovky.

9.2.2 Výsledky zkoušek

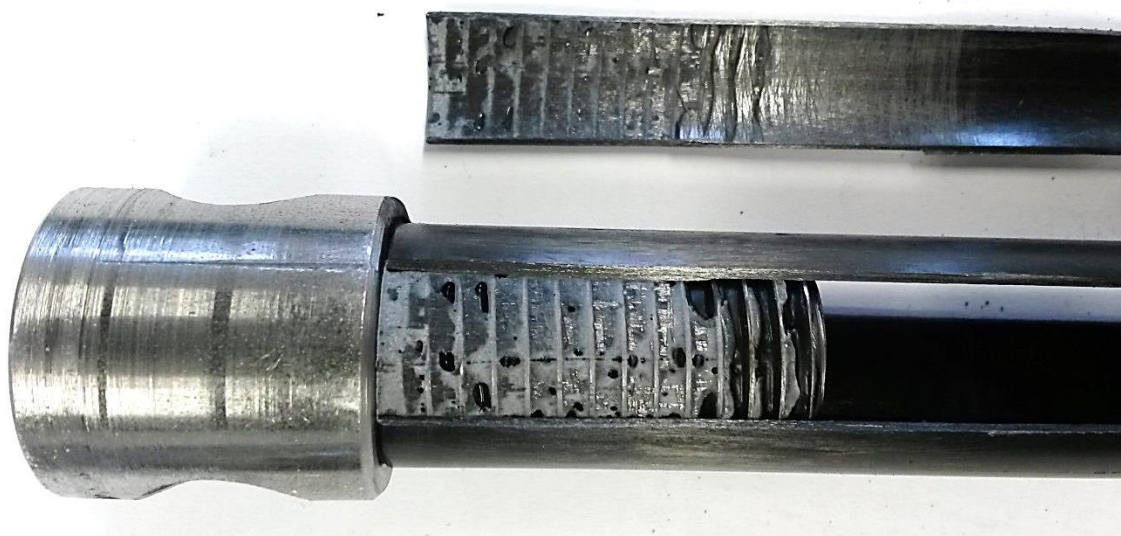
Pozn.: Další fotografie vzorků porušených trubek s vlepenými koncovkami jsou uvedeny v příloze P V.

U přetržených vzorků byly zaznamenány tři druhy lomu lepeného spoje – DF, CF, AF – plus porušení matrice uhlíkové trubky a následné vytržení segmentů trubky.

Druhy porušení lepeného spoje byly značně individuální každému jednotlivému zkušebnímu vzorku a nelze jednoznačně přisoudit výskyt určitých druhů lomů určitým provedení vlepených koncovek. Společným znakem přetržených vzorků byla destrukce trubky vzájemným skluzem jejích segmentů porušením pevnosti matrice.



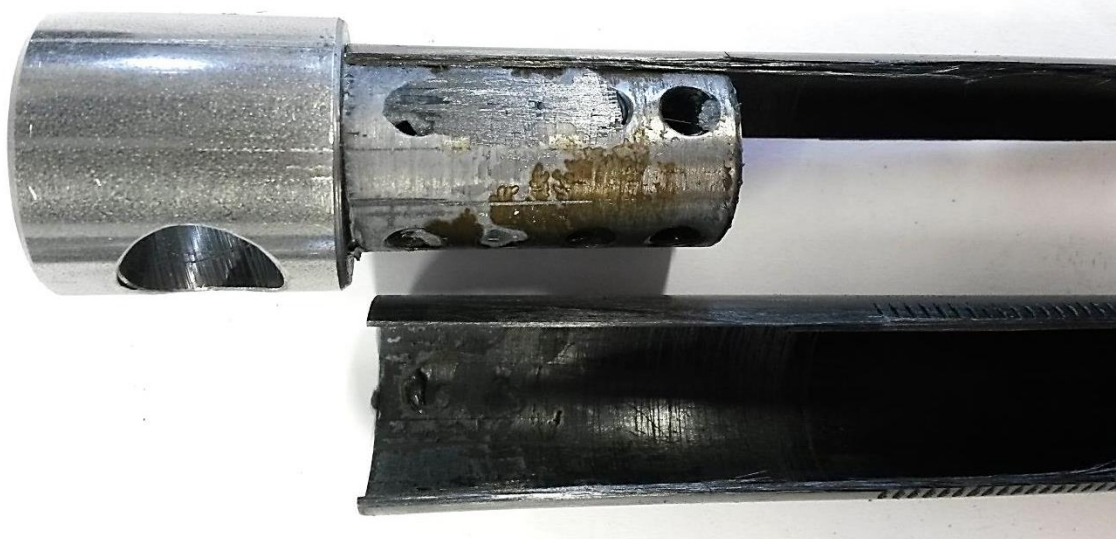
Obr. 47. Vzorek koncovky č. 1 po zkoušce, destrukce uhlíkové trubky, vložené výztužné válcové tělísko.



Obr. 48. Vzorek koncovky č. 2 po zkoušce.



Obr. 49. Vzorek koncovky č. 3 po zkoušce.



Obr. 50. Vzorek koncovky č. 4 po zkoušce.

Tvorba lomů lepeného spoje mezi koncovkou a trubkou byla odvislá od mechanismu destrukce uhlíkové trubky, který z velké části závisel na dokonalosti vrstvy použitého lepidla. Při výrobě zkušebních vzorků nebylo možno zajistit dokonalé rozmístění lepidla v mezikruží mezi koncovkou a trubkou a až po vykonání tahových zkoušek bylo zjištěno nerovnoměrné rozmístění lepidla mezi dříčky koncovek a trubkami.

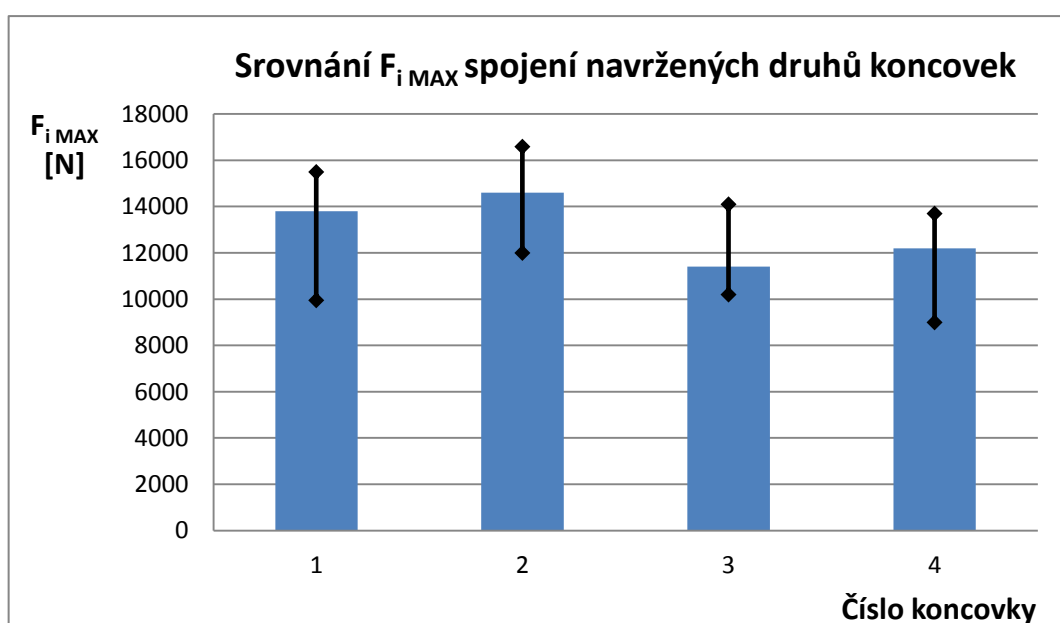
Z tohoto důvodu není relevantní přepočít silové únosnosti spojení koncovky a trubky na smluvní napětí v lepeném spoji a není možno určitým druhům koncovek přisoudit určitý druh lomu lepeného spoje. Pro jednoznačné závěry v této problematice by bylo nutno

vyrobit zkušební vzorky s dokonalou vrstvou lepidla mezi dřívky koncovek a trubkami a také zajistit rovnoměrné upnutí druhého konce trubky, nikoliv prostřednictvím čelistí, které trubku drží pouze v určitých místech, nýbrž například vlepěním předdimenzované koncovky s dokonalou vrstvou lepidla.

Pro dosažení lomu pouze lepeného spoje by bylo nutno navíc použít uhlíkovou trubku s jiným vnitřním uspořádáním vyztužujících vláken. Toto opatření by zajistilo několikanásobně větší pevnost a soudržnost kompozitu a z toho plynoucí vyšší pevnost lepeného spoje koncovky.

Tab. 9. Výsledky testování pevnosti lepeného spoje koncovek a uhlíkové trubky.

Číslo měření	$F_{1\ MAX}$ [N]	$F_{2\ MAX}$ [N]	$F_{3\ MAX}$ [N]	$F_{4\ MAX}$ [N]
1	14200	14200	11600	12200
2	13800	14600	14100	9000
3	12600	12000	11400	13700
4	9960	14800	10200	12100
5	15500	16600	11200	13700
\bar{x}	13800	14600	11400	12200
R	5540	4600	3900	4700
	Y_1 [%]	Y_2 [%]	Y_3 [%]	Y_4 [%]
	348	368	287	307



Graf 3. Srovnání průměrné přenesené síly koncovkami a variační rozpětí hodnot.

9.2.3 Závěr zkoušek

Z naměřených hodnot je patrné, že největší axiální silové zatížení je schopna přenést koncovka č. 2 se střední silovou únosností $\tilde{F}_{2\ MAX} = 14600\ N$.

Tato hodnota 3,68krát převyšuje požadované statické osové zatížení ramena zavěšení kola Formule Student a tedy aplikace navržené koncovky č. 2 a jejího spojení s uhlíkovou trubkou je ve skutečném vozidle Formule Student možná.

Výsledky testů značí, že stejně tak koncovky č. 1, 3 a 4 by bylo možno ve skutečném vozidle použít, jelikož typ koncovky s nejnižší únosností průměrně vykazuje 2,87násobek požadované silové únosnosti.

Výsledky testů nebyly signifikantně rozdílné a tahové zkoušky byly ovlivněny řadou faktorů popsanych výše. Pro kvantifikaci vlivu provedení koncovky na pevnost slepeného spojení s uhlíkovou trubkou by bylo nutno zkoušky provést s modifikacemi zkušebních vzorků popsanych výše, které by zajistily porušení pouze vrstvy lepidla.

ZÁVĚR

Cílem této bakalářské práce byl návrh spojení kovové koncovky a uhlíkové kompozitní trubky zavěšení kola vozidla Formule Student a jeho otestování statickým axiálním zatížením. Pomocí testů smykové pevnosti lepidel bylo vybráno lepidlo s nejvyšší pevností pro aplikaci na zvolenou kombinaci materiálů – lepidlo HF MARKET A5050.

Byly navrženy čtyři druhy kovových koncovek. Ty byly vlepny do uhlíkových trubek a axiálním statickým tahem těchto vzorků otestována pevnost lepeného spojení. Nejvyšší silové zatížení byla schopna přenést koncovka č. 2 se střední silovou únosností $\tilde{F}_{2\text{MAX}} = 14600\text{ N}$.

Během testů byla u všech slepených vzorků narušena pevnost a soudržnost matrice kompozitové trubky, z důvodu čehož došlo k předčasnému a výběrově místnímu porušení lepeného spoje. Získané výsledky tedy nevyovídají o výsledné pevnosti samotného lepeného spoje a vlivu provedení koncovky.

Dle výsledků statických zkoušek lze vyvodit, že všechny čtyři druhy navržených koncovek lze použít v praktické aplikaci na ramenech zavěšení kol Formule Student, jelikož koncovka s nejvyšší silovou únosností (č. 2) vykazuje průměrně 3,68násobek a koncovka s nejnižší silovou únosností (č. 3) vykazuje průměrně 2,87násobek reálného maximálního axiálního statického zatížení ramena zavěšení kola vozidla Formule Student.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] BAČOVSKÝ, Marek. *Použití kompozitních materiálů v automobilovém průmyslu*. Brno, 2012. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství. Vedoucí práce Ing. Pavel Ramík.
- [2] PRAVEENGOUDA, Patil. *Applications of Composites materials in the Automotive industry* [online]. Visvesvaraya: University Visvesvaraya College of Engineering, 2010 [cit. 2016-02-16]. Dostupné z: <http://www.scribd.com/doc/32475280/Composites-in-the-Automobile-Industry>
- [3] 2016 Formula SAE® Rules. In: *Institution of Mechanical Engineers - IMechE* [online]. London: Institution of Mechanical Engineers, 2016 [cit. 2016-02-01]. Dostupné z: <http://formulastudent.imeche.org/docs/default-source/default-document-library/2016-fsae-rules.pdf?sfvrsn=0>
- [4] FS.03. *CTU CarTech* [online]. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2016 [cit. 2016-02-22]. Dostupné z: <http://cartech.cvut.cz/fs-03/>
- [5] Formula Student - Více než cvičení. *Automobil Revue* [online]. Praha: Automotorevue, 2012 [cit. 2016-02-22]. Dostupné z: http://www.automobilrevue.cz/rubriky/automobily/technika/formula-student-vice-nez-cviceni_40946.html
- [6] NIESNER, Martin. *Návrh konstrukčního uspořádání vozidla studentské formule*. Brno, 2008. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství. Vedoucí práce Ing. Pavel Ramík.
- [7] *Formula Student Oulu* [online]. Oulu (Finsko): Formula Student Oulu, 2016 [cit. 2016-02-21]. Dostupné z: <https://fsoulu.wordpress.com/>
- [8] LocostBuilders. *LocostBuilders* [online]. 2007 [cit. 2016-03-14]. Dostupné z: <http://www.locostbuilders.co.uk/viewthread.php?fid=3&tid=70334>
- [9] OKÁNÍK, František. *Úprava zavěšení zadního kola formulového vozu*. Brno, 2014. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav

automobilního a dopravního inženýrství. Vedoucí práce Ing. Pavel Ramík.

- [10] *Těhllice vozu kategorie Formule SAE*. Brno, 2008. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství. Vedoucí práce Ing. David Svída.
- [11] BAREŠ, Richard. *Kompozitní materiály*. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1988, 328 s. ISBN 04-734-88.
- [12] VRBKA, Jan. *Mechanika kompozitů* [online]. Brno: Fakulta strojního inženýrství VUT v Brně, 2008 [cit. 2016-05-16]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/priloha.php?dpid=83340
- [13] EHRENSTEIN, Gottfried. *Polymerní kompozitní materiály*. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009, 351 s. ISBN 9788086960296.
- [14] STEHLÍK, Lubomír. Formule studentů VUT se ve zrychlení vyrovná Porsche 911. In: *Brněnský deník* [online]. Praha: VLTAVA-LABE-PRESS, a.s, 2014 [cit. 2016-02-16]. Dostupné z: http://brnensky.denik.cz/zpravy_region/formule-studentu-vut-se-ve-zrychleni-vyrovna-porsche-911-20140727.html
- [15] Průvodce uhlíkovými vlákny v F1. *F1NEWS.CZ* [online]. Újezd u Brna: Active Solutions, 2010 [cit. 2016-02-02]. Dostupné z: <http://f1news.autoroad.cz/technika/36549-pruvodce-uhlikovymi-vlakny-v-f1>
- [16] MARTYNKOVÁ, Simha. *Nové technické materiály*. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2010, 99 s. ISBN 978-80-7204-714-7.
- [17] Uhlíkový monokok. *CTU CarTech* [online]. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2016 [cit. 2016-02-18]. Dostupné z: <http://cartech.cvut.cz/uhlikovy-monokok>
- [18] HAJER, Václav. *Konstrukční uspořádání zadní části rámu vozidla Formule Student*. Brno, 2011. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství. Vedoucí práce Ing. Pavel Ramík.
- [19] Pagani Automobili | Zonda | Zonda R. *Pagani Automobili* [online]. San Cesario sul Panaro: Pagani Automobili S.p.A., 2011 [cit. 2016-02-10]. Dostupné z: http://www.pagani.com/en/zonda/zonda_R/default.aspx

- [20] THORŽ, František. *Rám formule Dragon 3*. Brno, 2013. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. David Svída.
- [21] TRZESNIEWSKI, Michael. *Rennwagentechnik: grundlagen, konstruktion, komponenten, systeme*. 3., akt. u. erw. Aufl. S.l.: Friedrich Vieweg, 2012. ISBN 978-383-4817-792.
- [22] Edith Cowan University Racing's - "Emma" MT7 - Formula Student Car. *Antilag Forums* [online]. 2014 [cit. 2016-02-21]. Dostupné z: <http://www.antilag.com/forums/showthread.php?62461-Edith-Cowaun-University-Racing-s-quot-Emma-quot-MT7-Formula-Student-Car>
- [23] Dragon 1 - Stavba. *TU Brno Racing* [online]. Brno: TU Brno Racing, 2014 [cit. 2016-02-22]. Dostupné z: <http://www.tubnoracing.cz/cs/media/foto/dragon-1-stavba-15.htm>
- [24] Přítlačná křídla. *CTU CarTech* [online]. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2016 [cit. 2016-02-22]. Dostupné z: <http://cartech.cvut.cz/pritlacna-kridla/>
- [25] Jenson Button. *F1technical.net* [online]. Zottegem: f1technical.net, 2016 [cit. 2016-02-22]. Dostupné z: <http://www.f1technical.net/gallery/2016/barcelona-test-22feb/jm1622fe349>
- [26] Uhlíkové disky. *CTU CarTech* [online]. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2016 [cit. 2016-02-17]. Dostupné z: <http://cartech.cvut.cz/uhlikove-disky/>
- [27] BMW steering wheel with KERS button. *F1 Fanatic* [online]. Keith Collantine, 2009 [cit. 2016-02-22]. Dostupné z: <http://www.f1fanatic.co.uk/2009/01/14/ferrari-and-bmw%E2%80%99s-clash-over-kers-could-be-a-threat-to-fota/p90044727/>
- [28] OSTEN, Miloš. *Práce s lepidly a tmely*. Vyd. 3. upravené. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1986, 285 s.
- [29] *Loctite worldwide design handbook 1996/97*. 1st ed. Rocky Hill: Loctite North America, 1995, 463 s. ISBN 09-645-5900-5.
- [30] 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.
- [31] ČSN ISO 10365. *Lepidla. Označení hlavních typů porušení lepeného spoje*. Pardubice:

Technická normalizační komise: TNK 52 Plasty, 1995.

- [32] Home | FSCzech. *FSCzech* [online]. Nymburk: Formula Student Czech Republic, 2016 [cit. 2016-02-01]. Dostupné z: <http://www.fsczech.cz/index.php>
- [33] Formula Student Czech Republic 2015 - Thursday. *FSCzech* [online]. Nymburk: Formula Student Czech Republic, 2016 [cit. 2016-02-01]. Dostupné z: <https://fsczech.smugmug.com/Photo/2015/Thursday/i-NtnCxdB/A>
- [34] We are always told carbon fiber is stronger/lighter than steel. To put it in perspective here is a test of a steel vs. carbon fiber drive/prop shaft.. *Reddit.com: the front page of the internet* [online]. Reddit Inc., 2014 [cit. 2016-03-14]. Dostupné z: https://www.reddit.com/r/videos/comments/1xonvw/we_are_always_told_carbon_fiber_is/
- [35] Pushrod-Pullrod. *Formula 1 Dictionary* [online]. 2016 [cit. 2016-05-17]. Dostupné z: http://www.formula1-dictionary.net/pushrod_pullrod.html
- [36] PADOVEC, Zdeněk a Michal VAŠÍČEK. Návrh a analýza napětí kompozitní trubky pro zavěšení kola závodního vozu. In: *Studentská tvůrčí činnost, sborník 2011*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní, 2011, s. 1-12. ISBN 978-80-01-04796-5.
- [37] Vůz. *CTU CarTech* [online]. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2016 [cit. 2016-05-17]. Dostupné z: <http://cartech.cvut.cz/vuz/>
- [38] Garáž. *TU Brno Racing* [online]. Brno: TU Brno Racing, 2016 [cit. 2016-05-17]. Dostupné z: <http://www.tubrnoracing.cz/cs/tym/garaz/>
- [39] URE - Cars. *University Racing Eindhoven* [online]. Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven, 2016 [cit. 2016-05-17]. Dostupné z: <http://universityracing.tue.nl/cars/>
- [40] MACHEK, Václav. *Zpracování a zkoušení kovových materiálů*. 1. vyd. V Praze: České vysoké učení technické, 2011, 157 s. ISBN 978-80-01-04683-8.
- [41] MARTINÁK, Milan. *Kontrola a měření: učebnice pro 3. ročník stř. prům. škol strojnických*. 1. vyd. Překlad Jindřich Klůna. Praha: SNTL, 1989, 214 s. ISBN 80-030-0103-X.
- [42] *Mechanické zkoušky* [online]. In: . b.r., s. 12 [cit. 2016-03-13]. Dostupné z: http://www.sssebrno.cz/files/ovmt/zkouska_smykem.pdf

- [43] ČSN EN 1465. *Lepidla - Stanovení pevnosti ve smyku při tahovém namáhání přeplátovaných lepených sestav*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

DF	Delaminace substrátu.
AF	Adhezní lom lepeného spoje.
CF	Kohezní lom lepeného spoje.
SCF	Kohezní lom lepeného spoje na hranici substrátu.
CSF	Porušení adherendu.
τ_s	Napětí lepeného spoje ve smyku [MPa].
F	Silové zatížení lepeného spoje [N].
A	Plocha lepeného spoje [mm ²].
f_{ges}	Celkový faktor vlivu lepeného spoje [1].
f_1	Faktor vlivu druhu adherendu [1].
f_2	Faktor vlivu tloušťky spáry lepeného spoje [1].
f_3	Faktor vlivu drsnosti povrchu [1].
f_4	Faktor vlivu plochy lepeného spoje [1].
f_5	Faktor vlivu směru zatížení lepeného spoje [1].
f_6	Faktor vlivu druhu zatížení lepeného spoje [1].
f_7	Faktor vlivu provozní teploty lepeného spoje [1].
f_8	Faktor vlivu druhu vytvrzení lepidla [1].
R_{mS}	Smluvní pevnost lepeného spoje ve smyku [MPa].
F_{MAX}	Reálná maximální silová únosnost spoje [N].
b_0	Počáteční šířka lepeného spoje [mm].
l_0	Počáteční délka spoje [mm].
SAE	Society of Automotive Engineers.
Y	Násobek referenční hodnoty silové únosnosti daného typu koncovky [%].
\tilde{F}_{MAX}	Medián silové únosnosti daného typu koncovky [N].
\bar{x}	Aritmetický průměr výběrového souboru.

n	Počet měření [1].
x	Hodnota měřené veličiny.
s	Směrodatná odchylka výběrového souboru.
\tilde{x}	Medián řady hodnot statistického souboru.
R	Variační rozpětí řady hodnot.

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1. Svařovaný rám Formule Student konstrukčního týmu univerzity v Oulu, Finsko ...</i>	15
<i>Obr. 2. Detail uchycení ocelových ramen k těhlici vozidla Formule Student</i>	16
<i>Obr. 3. Ocelová kulová hlavice ramena zavěšení nápravy.....</i>	16
<i>Obr. 4. Těhlice vozidla Formule Student vyrobená obráběním z hliníkové slitiny.....</i>	17
<i>Obr. 5. Mechanismy porušení dlouhovláknových kompozitů při podélném tahovém namáhání.....</i>	18
<i>Obr. 6. Formule Dragon 4 univerzitního týmu TU Brno Racing s uhlíkovým monokokem a uhlíkovými přitlačnými křídly</i>	20
<i>Obr. 7. Závodní automobil Pagani Zonda R s uhlíkovo-titanovým monokokem a karoserií</i>	22
<i>Obr. 8. Výroba hybridního monokoku z hliníkových sendvičových desek pro formuli Emma MT7 konstrukčního týmu Edith Cowan University Racing.....</i>	23
<i>Obr. 9. Sklolaminátová kapotáž závodního vozu Dragon 1 týmu TU Brno Racing</i>	24
<i>Obr. 10. Přední přitlačné křídlo vozidla Formule 1 značky McLaren MP4-31 vyrobené z uhlíkového kompozitu</i>	24
<i>Obr. 11. Deformační člen formule Student z hliníkových voštinových desek konstrukčního týmu univerzity v Oulu, Finsko</i>	25
<i>Obr. 12. Uhlíkovo-sendvičový disk kola formule FS.06</i>	25
<i>Obr. 13. Pohled na vnitřní strukturu uhlíkovo-sendvičového disku</i>	25
<i>Obr. 14. Uhlíkové tyče náprav s ocelovými koncovkami</i>	26
<i>Obr. 15. Grafika uhlíkových ramen náprav se dvěma druhy kovových koncovek.....</i>	26
<i>Obr. 16. Aerodynamická ramena nápravy zakončená pružnými ocelovými břity</i>	27
<i>Obr. 17. Multifunkční volant formule značky BMW s uhlíkovým tělem</i>	28
<i>Obr. 18. Deformace jednostranně přeplátovaného spoje v důsledku excentrického působení sil; rozdělení napětí po délce přeplátovaného spoje</i>	33
<i>Obr. 19. Způsoby vlepění koncovek a záslepek do trubek</i>	33
<i>Obr. 20. Způsoby přilepení příruby na trubku.....</i>	33
<i>Obr. 21. Vhodné a nevhodné konstrukce koutových lepených spojů a lepených spojů trubek</i>	34
<i>Obr. 22. Vliv pevnosti lepeného spoje na jeho tloušťce.....</i>	36
<i>Obr. 23. Schéma zkoušek lepených spojů</i>	37
<i>Obr. 24. Základní druhy porušení lepených spojů.....</i>	37

<i>Obr. 25. Logo společnosti Formula Student Czech Republic</i>	40
<i>Obr. 26. Zkouška vozidla náklonem</i>	42
<i>Obr. 27. Vozidlo FS.03 CTU CarTech</i>	43
<i>Obr. 28. Formule FS.03 při závodě</i>	43
<i>Obr. 29. Schéma zavěšení předního kola Formule Student</i>	45
<i>Obr. 30. Konstrukce odpružení typu pullrod a pushrod lichoběžníkového zavěšení kol</i>	46
<i>Obr. 31. Schéma mechanického univerzálního zkušebního stroje</i>	50
<i>Obr. 32. Příklad namáhání prostým smykem</i>	51
<i>Obr. 33. Schéma navrženého obecného spojení koncovky a trubky</i>	55
<i>Obr. 34. Schéma sestavy zkušebních panelů dle normy ČSN EN 1465</i>	58
<i>Obr. 35. Detail nanesení lepidla na panel a vložených vymežovacích drátků ve spoji</i>	59
<i>Obr. 36. Detail přeplátování lepeného spoje</i>	60
<i>Obr. 37. Zkušební vzorek po všech úpravách</i>	60
<i>Obr. 38. Čep pro uchycení koncovky k rámu zkušebního stroje</i>	61
<i>Obr. 39. Typy provedení koncovek</i>	62
<i>Obr. 40. Detail zdrsnění vnitřního povrchu uhlíkové trubky</i>	63
<i>Obr. 41. Zhotovený zkušební vzorek trubky s vlepenou koncovkou</i>	63
<i>Obr. 42. Vložky upínacích čelistí zkušebního stroje pro upnutí trubek</i>	64
<i>Obr. 43. Výztužné válcové tělísko</i>	65
<i>Obr. 44. Schéma sestavy zkušební vzorku trubky s vlepenou koncovkou</i>	65
<i>Obr. 45. Detail upnutí vzorku lepidla v čelistech zkušebního stroje</i>	66
<i>Obr. 46. Detail upnutí vzorku trubky v čelistech zkušebního stroje</i>	67
<i>Obr. 47. Vzorek koncovky č. 1 po zkoušce, destrukce uhlíkové trubky, vložené výztužné válcové tělísko</i>	70
<i>Obr. 48. Vzorek koncovky č. 2 po zkoušce</i>	70
<i>Obr. 49. Vzorek koncovky č. 3 po zkoušce</i>	71
<i>Obr. 50. Vzorek koncovky č. 4 po zkoušce</i>	71

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1. Vliv materiálu nosné konstrukce vozidla na jeho hmotnost a spotřebu paliva</i>	13
<i>Tab. 2. Srovnání vlastností vybraných druhů kompozitů.....</i>	19
<i>Tab. 3. Srovnání cen materiálů vyztužujících vláken, údaje z roku 2005.....</i>	19
<i>Tab. 4. Technické údaje vozidla FS.03</i>	44
<i>Tab. 5. Označení zkušebních vzorků dle použitého druhu lepidla.....</i>	59
<i>Tab. 6. Podmínky experimentu zkoušení pevnosti lepidel ve smyku</i>	66
<i>Tab. 7. Podmínky experimentu tahové zkoušky koncovek</i>	67
<i>Tab. 8. Výsledná průměrná pevnost lepidel ve smyku a druh lomu spoje pro kombinaci materiálů kompozit s epoxidovým gelcoatem – kov</i>	68
<i>Tab. 9. Výsledky testování pevnosti lepeného spoje koncovek a uhlíkové trubky.....</i>	72

SEZNAM GRAFŮ

<i>Graf 1. Procentuální zastoupení podílu bodů ze soutěžních disciplín na celkovém hodnocení soutěžních týmů</i>	<i>41</i>
<i>Graf 2. Srovnání pevností lepidel ve smyku pro slepení kombinace materiálů kompozit s epoxidovým gelcoatem – kov</i>	<i>69</i>
<i>Graf 3. Srovnání průměrné přenesené síly koncovkami a variační rozpětí hodnot</i>	<i>72</i>

SEZNAM PŘÍLOH

- P I Naměřené hodnoty vnitřního průměru uhlíkové trubky.
- P II Fotografie přípravy vzorků pro zkoušku pevnosti lepidel ve smyku.
- P III Naměřené hodnoty pevnosti lepidel.
- P IV Fotografie lomů zkoušených lepidel.
- P V Fotografie vzorků porušených trubek s vlepenými koncovkami.
- P VI Výkres „Zkušební panel“.
- P VII Výkres „Koncovka č. 1“.
- P VIII Výkres „Koncovka č. 2“.
- P IX Výkres „Koncovka č. 3“.
- P X Výkres „Koncovka č. 4“.
- P XI Výkres „Výztužné tělísko“.
- P XII Technický list Cyberbond Epoxy Steel (elektronická příloha).
- P XIII Technický list Crestabond M1-05 (elektronická příloha).
- P XIV Technický list Elan-tech AS 95/AW 95 (elektronická příloha).
- P XV Technický list HF MARKET A 5050 (elektronická příloha).
- P XVI Technický list Epoxidová pryskyřice L 285 (elektronická příloha).
- P XVII Technický list KORDCARBON CC 280 T4 (elektronická příloha).
- P XVIII Technický list Trubka z uhlíkových vláken 20x18x1000 mm (el. příloha).

**PŘÍLOHA P I: NAMĚŘENÉ HODNOTY VNITŘNÍHO PRŮMĚRU
UHLÍKOVÉ TRUBKY**

Číslo měření	d [mm]	Číslo měření	d [mm]
1	17,88	16	17,85
2	17,86	17	17,93
3	17,92	18	17,88
4	17,87	19	17,97
5	17,86	20	17,84
6	17,89	21	17,91
7	17,94	22	17,89
8	17,86	23	17,85
9	17,96	24	17,84
10	17,92	25	17,94
11	17,87	26	17,86
12	17,89	27	17,84
13	17,87	28	17,85
14	17,88	29	17,91
15	17,88	30	17,86
		\bar{x}	17,8856
		s	0,0364

PŘÍLOHA P II: FOTOGRAFIE PŘÍPRAVY VZORKŮ PRO ZKOUŠKU PEVNOSTI LEPIDEL VE SMYKU



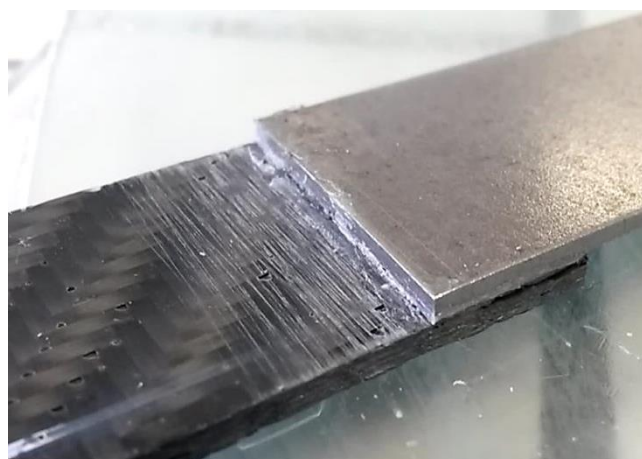
Detail zdrsnění ocelového panelu.



Detail zdrsnění laminátového panelu.



Detail zafixování panelů po nanesení lepidla.



Detail lepeného spoje po odstranění přebytků lepidla.

PŘÍLOHA P III: NAMĚŘENÉ HODNOTY PEVNOSTI LEPIDEL VE SMYKU

Výstup zkoušek lepidla A.

Č. vzorku	$F_{i\ MAX} [N]$	$R_{i\ mS} [MPa]$
1	1850	5,92
2	1650	5,28
3	2410	7,71
4	1620	5,18
5	2160	6,91
\bar{x}	1938	6,20
s	341	1,09

Výstup zkoušek lepidla D.

Č. vzorku	$F_{i\ MAX} [N]$	$R_{i\ mS} [MPa]$
1	6030	19,30
2	6680	21,38
3	6200	19,84
4	6480	20,74
5	5350	17,12
\bar{x}	6148	19,67
s	512	1,64

Výstup zkoušek lepidla B.

Č. vzorku	$F_{i\ MAX} [N]$	$R_{i\ mS} [MPa]$
1	5250	16,80
2	4500	14,40
3	4520	14,46
4	5730	18,34
5	5410	17,31
\bar{x}	5082	16,26
s	550	1,76

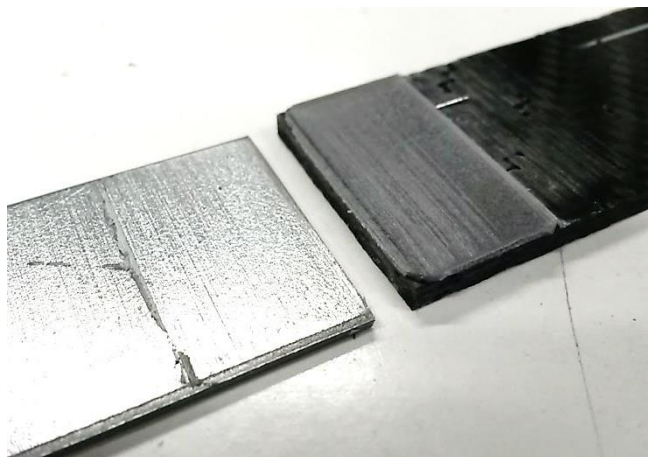
Výstup zkoušek lepidla E.

Č. vzorku	$F_{i\ MAX} [N]$	$R_{i\ mS} [MPa]$
1	1630	5,22
2	1890	6,05
3	2270	7,26
4	2040	6,53
5	3110	9,95
\bar{x}	2188	7,00
s	565	1,81

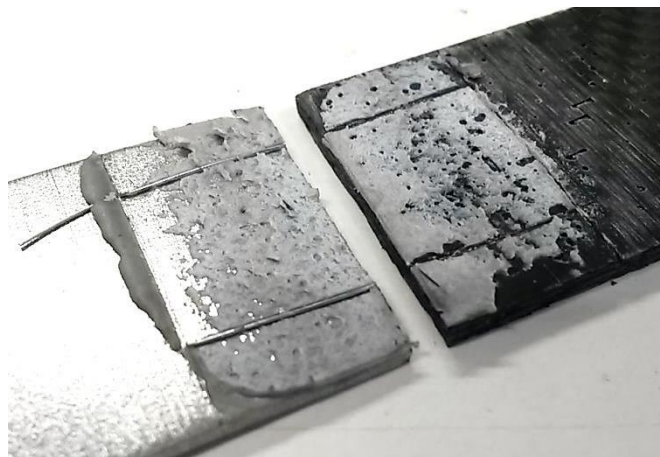
Výstup zkoušek lepidla C.

Č. vzorku	$F_{i\ MAX} [N]$	$R_{i\ mS} [MPa]$
1	1810	5,79
2	2120	6,78
3	2230	7,14
4	1830	5,86
5	1420	4,54
\bar{x}	1882	6,02
s	316	1,01

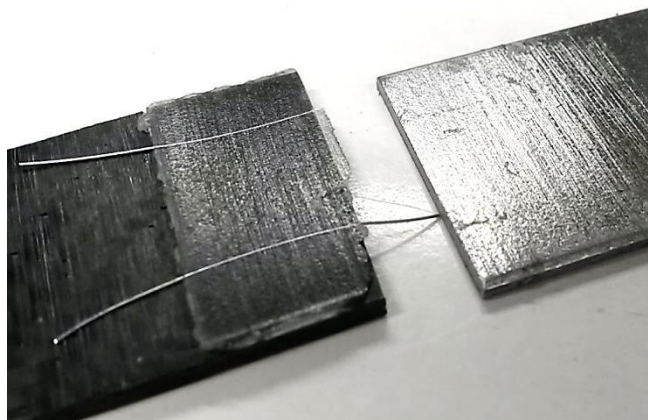
PŘÍLOHA P IV: FOTOGRAFIE LOMŮ ZKOUŠENÝCH LEPIDEL



Porušení spoje vzorku lepidla A.



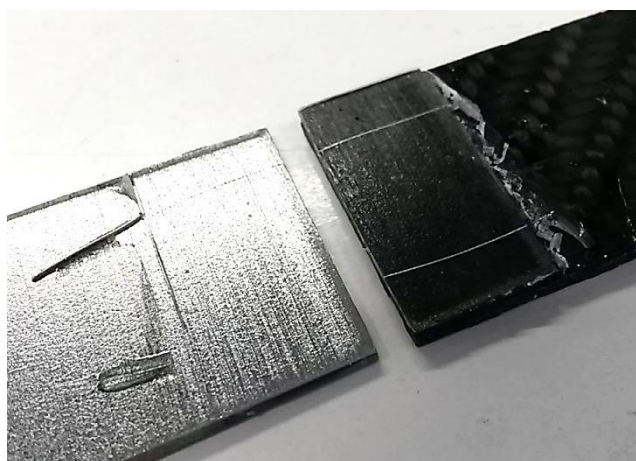
Porušení spoje vzorku lepidla B.



Porušení spoje vzorku lepidla C.



Porušení lepeného spoje vzorku lepidla D.

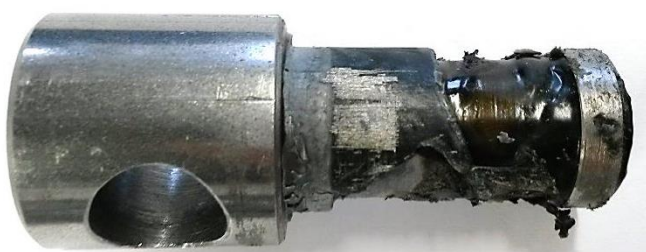


Porušení lepeného spoje vzorku lepidla E.

**PŘÍLOHA P V: FOTOGRAFIE VZORKŮ PORUŠENÝCH TRUBEK S
VLEPENÝMI KONCOVKAMI**



Porušení vzorku koncovky č. 3.



Porušení lepidla koncovky č. 3.



Porušení vzorku koncovky č. 1.



Porušení vzorku koncovky č. 4.