



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

NÁVRH RAMEN ZAVĚŠENÍ KOL S VLEPENÝMI ÚCHYTY KLOUBŮ

SUSPENSION A-ARM WITH GLUED INSERTS DESIGN

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Václav Dlápal

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Pavel Ramík

BRNO 2016

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav automobilního a dopravního inženýrství
Student: **Václav Dlápal**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojírenství
Vedoucí práce: **Ing. Pavel Ramík**
Akademický rok: 2015/16

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

Návrh ramen zavěšení kol s vlepenými úchyty kloubů

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Proveďte srovnání použití různých lepidel a různých úprav povrchu kompozitních součástí u konstrukce A-ramen zavěšení kol s vlepenými úchyty kloubů. Proveďte dostupné zkoušky se zhotovenými vzorky. Vyhodnoťte vhodnost různé úpravy povrchu a použitých lepidel.

Cíle bakalářské práce:

1. Proveďte rešerši současného stavu konstrukčního provedení zavěšení kol vozidel se zaměřením zejména na ramena náprav. Proveďte rešerši možnosti použití kompozitních materiálů, úprav jejich povrchů a různých lepidel pro upevnění vlepených úchytu kloubů.
2. Navrhněte konstrukci vybraných A-ramen náprav z kompozitních materiálů včetně vlepených vložek úchytů kloubů.
3. Vyberte vhodná lepidla a navrhněte způsob povrchové úpravy kompozitních dílů pro vlepení vložek.
4. Zhotovte zkušební vzorky pro zkoušky použití vybraných lepidel a úprav povrchu kompozitních dílů.
5. Navrhněte dostupné zkoušky zhotovených vzorků a proveďte navržené experimenty.
6. Zhodnoťte vhodnost různé úpravy povrchu a různých lepidel u zkoušených A-ramen. Vyslovte se k vhodnosti použití navržených ramen u vozidla Formule Student.

Seznam literatury:

JAN, Z., ŽDÁNSKÝ, B. a ČUPERA J. Automobily (1): Podvozky. Brno: Avid, spol. s r.o., 2009. ISBN 978-80-87143-11-7.

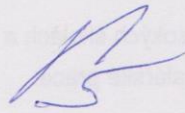
CHAWLA, K. K. Composite Materials, Springer Verlag, 2012. ISBN 978-0-387-74365-3.

Formula Student web page [online], 2015, poslední revize 21. 10. 2015. Dostupné z: <<http://www.formulastudent.com/>>.

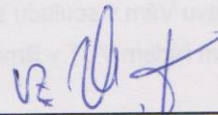
PTC Creo Tutorials [online], Parametric Technology Corporation, 2015, poslední revize 14. 10. 2015. Dostupné z: <http://learningexchange.ptc.com/tutorials/by_product/product_id:1>.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2015/16.

V Brně, dne 26. 11. 2015



prof. Ing. Václav Píštěk, DrSc.
ředitel ústavu



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



ABSTRAKT

Práce se zabývá zkoumáním vlivu mechanického opracování na pevnost spoje kompozitní trubky a válcové hliníkové vložky pomocí statické zkoušky. Na základě výsledků provedených zkoušek byl navrhnout lepený spoj pro aplikaci na ramenech náprav vozidla Formule Student.

KLÍČOVÁ SLOVA

Lepený spoj, Zkoušky lepidel, Uhlíková vlákna, CFRP, Zavěšení vozidel, Formule Student.

ABSTRACT

Aim of the thesis is to examine influence of mechanical surface treatment on co-axial glued joint between carbon fibre reinforced polymer tube and aluminium alloy pin. In consequence of this examination was designed glued joint to application in A-arms of Formula Student racing vehicle.

KEYWORDS

Glued joint, Glue testing, Co-axial joint, Carbon fibre, CFRP, Formula Student.



BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

DLÁPAL, V. *Návrh ramen zavěšení kol s vlepenými úchyty kloubů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 50 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Pavel Ramík.



ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

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

V Brně dne 27. května 2016

.....

Václav Dlápál



PODĚKOVÁNÍ

Chtěl bych poděkovat svým rodičům za celoživotní podporu nejen při studiu. Díky nim se mohu naplno věnovat tomu, co mě baví. Obrovský dík patří Kamile Krejčové za trpělivost a podporu, ale také za vlídná slova a společně strávené chvíle. Dík patří také Gabrielu Staríkovovi za to, že mi vštípil myšlenku chopit se projektu návrhu ramen s vlepenými vložkami, stejně jako celému týmu TU Brno Racing za inspirativní prostředí a nemálo zajímavých rozhovorů nejen o strojním inženýrství. Dále bych rád poděkoval Janu Šplíchalovi z Leteckého ústavu za vstřícnost a ochotu při provádění testů. Děkuji také docentu Klementovi za pomoc při vytvrzování vzorků a prvotní orientaci v problematice lepidel. V neposlední řadě bych rád poděkoval Pavlu Ramíkovi za vedení práce a užitečné připomínky.



OBSAH

Úvod	10
1 Druhy zavěšení v automobilové technice	11
1.1 Tuhá náprava	11
1.2 Lichoběžníková náprava s dvojitými příčnými rameny	12
1.3 Náprava McPherson	12
1.4 Kliková náprava	13
1.5 Víceprvková náprava	14
1.6 Zavěšení vozidel Formule Student	15
2 Kompozitní materiály	17
2.1 Vyztužující vlákna	17
2.1.1 Uhlíková vlákna	18
2.2 Matrice	18
2.2.1 Epoxidová matrice	19
2.3 Prepreg	19
2.4 Výhody kompozitu s uhlíkovými vlákny	19
2.5 Nevýhody kompozitu s uhlíkovými vlákny	19
3 Lepený spoj	21
3.1 Mechanismy zatěžování lepeného spoje	21
3.1.1 Návrh lepené plochy	21
3.1.2 Zatížení lepeného spoje	23
3.1.3 Poruchy lepeného spoje	23
3.2 Příprava povrchu pro lepení	24
3.3 Rozdělení lepidel	24
3.3.1 Anaerobní lepidla	24
3.3.2 Kyanoakryláty	25
3.3.3 Adheziva na bázi epoxidové pryskyřice	25
4 Zkoušky lepených spojů	27
4.1 Zkoušení parametrů lepeného spoje	27
4.1.1 Metodika vyhodnocování	28
4.1.2 Zkoumané parametry	28
4.2 Zkouška č. 1	29
4.2.1 Příprava vzorků pro zkoušku č. 1	29
4.2.2 Výsledky zkoušky č. 1	29
4.2.3 Analýza výsledků	29
4.2.4 Vyhodnocení zkoušky č. 1	32



4.3	Zkouška č. 2	32
4.3.1	Příprava vzorků pro zkoušku č. 2	32
4.3.2	Výsledky zkoušky č. 2	33
4.3.3	Analýza výsledků zkoušky č. 2	33
4.3.4	Vyhodnocení zkoušky č. 2	35
4.4	Zkouška č. 3	36
4.4.1	Zvolená lepidla	36
4.4.2	Příprava vzorků pro zkoušku č. 3	37
4.4.3	Výsledky zkoušky č. 3	38
4.4.4	Analýza výsledků	38
4.4.5	Vyhodnocení zkoušky č. 3	41
5	Návrh ramen zavěšení	42
5.1	Volba použité trubky	42
5.1.1	Výpočet vhodné trubky	42
5.2	Výpočet délky lepené plochy	44
5.3	Návrh ramen zavěšních kol s vlepenými úchyty kloubů	45
	Závěr	47
	Seznam použitých zkratk a symbolů	50



ÚVOD

V současné době lze v automobilovém průmyslu pozorovat jasný trend. Tímto trendem je odlehčování konstrukčních návrhů s cílem zachovat funkčnost součástí, při současném snížení hmotnosti. Díky tomuto fenoménu se daří snižovat provozní náklady vozidel a množství škodlivin, které do ovzduší vypouštějí. Na druhou stranu je ovšem kladen větší důraz na preciznost, znalosti a dovednosti konstruktéra. Kromě změny tvaru součástí lze odlehčení dosáhnout také volbou jiného materiálu.

Snaha o dosažení co nejnižší hmotnosti je ještě více zřetelná v motoristickém sportu. Jelikož v této oblasti je kladen mnohem menší důraz na pořizovací náklady a konstruovaná vozidla nejsou určena pro masovou produkci, lze se setkat s exotickými materiály jako titan, letecký hliník, dural nebo materiály kompozitními.

Cílem této práce je navrhnout a zhodnotit možnost použití kompozitního materiálu s uhlíkovými vlákny v kombinaci s vlepenými úchyty kloubů na ramenech zavěšení formulového vozu kategorie Formule Student týmu TU Brno Racing.

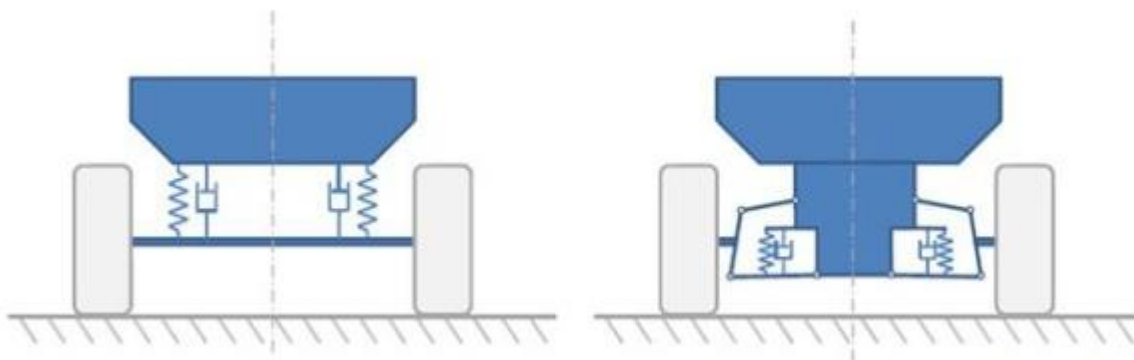


1 DRUHY ZAVĚŠENÍ V AUTOMOBILOVÉ TECHNICE

Zavěšení jako takové lze v podstatě rozdělit na dva druhy. Jedná se o zavěšení závislé a nezávislé [1]. Toto rozdělení však není dostatečné. Zejména u nezávislého zavěšení existuje velké množství konstrukčních variant. Tyto varianty lze ukázat na nejznámějších druzích náprav.

Pro popis zavěšení je nejprve nutné definovat pojem náprava. Prof. Vlk definuje nápravu takto: „*Pojmem náprava rozumíme komplet skládající se z nápravnice, zavěšení kola, úplných nábojů ložisek kol, brzdového ústrojí předních kol, pružících jednotek a u přední nápravy z řízení*“ [1]. U hnané nápravy patří do nápravy také hnací ústrojí [1].

Náprava je tedy funkční celek sestavy podvozku automobilu a zavěšení je její součástí. V následujících odstavcích budou popsány vybrané typy náprav, ze kterých budou zřejmé typické prvky, jež se pro danou konfiguraci obvykle používají.



Obr. 1 Porovnání závislého a nezávislého zavěšení [25]

1.1 TUHÁ NÁPRAVA

Jedná se o typ nápravy, u kterého jsou komponenty nápravy umístěny na společném nosném prvku a z kinematického pohledu je tedy bereme jako jedno těleso. Při vertikálním pohybu jednoho kola dochází skrze příčný prvek k reakci také na kole druhém – kola na stejné nápravě jsou na sobě závislá. Odsud plyne pojem „závislé zavěšení“ [1].

Tuhá náprava je nejstarším a dodnes používaným druhem zavěšení kol. V současné době se používá zejména u nákladních automobilů, autobusů, terénních a dodávkových vozidel nebo přípojných vozíků. Přesto lze toto řešení nalézt i na některých moderních osobních automobilech [1].

Za hlavní výhodu lze považovat minimální omezení velikosti a tvaru nákladového nebo zavazadlového prostoru, konstrukční jednoduchost a nízká cena takového řešení. Naopak nevýhodou jsou horší jízdní vlastnosti, zejména na nerovné vozovce [1].



1.2 LICHOBĚŽNÍKOVÁ NÁPRAVA S DVOJITÝMI PŘÍČNÝMI RAMENY

Tento typ nápravy je tvořen dvojicí nad sebou umístěných příčných ramen. Tato ramena mají obvykle přibližně tvar trojúhelníku, čímž dokáží zachytit jak podélné, tak příčné síly. Není tedy třeba dalších prvků k zachycení těchto sil. Spodní rameno bývá mohutnější, jelikož leží blíže působíště sil (styková plocha mezi pneumatikou a vozovkou) a tedy na něj působí větší síly [1].

Při pohledu zepředu ramena vytvářejí spolu s těhlicí lichoběžník, jelikož jedno z ramen (zpravidla horní) bývá kratší a většinou také není rovnoběžné s druhým ramenem. Toto je velmi významné při určování a možnosti úpravy kinematických veličin. U vozidel s motorem umístěným vpředu je horní rameno poměrně krátké z důvodu zachování dostatečného prostoru pro motor a jeho příslušenství [1].



Obr. 2 Lichoběžníková náprava s trojúhelníkovými rameny[13]

Při vertikálním pohybu kola a současně nehybné karoserii, případně naopak, dochází ke změně odklonu kola, čímž se mění tvar a velikost styčné plochy mezi pneumatikou a vozovkou. Dochází také k posuvu kola v příčném směru. Tento posuv je však zanedbatelný [1].

Výhodou lichoběžníkové nápravy jsou jisté jízdní vlastnosti podpořené snadnou změnou kinematických parametrů. To je výhodné hlavně u sportovních a závodních automobilů, kde si majitel může upravit chování vozu dle svých potřeb. Další výhodou může být možnost velmi nízké zástavby a malé prostorové náročnosti v porovnání s ostatními druhy zavěšení. Toho je s oblibou využíváno u předních náprav užitkových vozidel, jako jsou dodávky, ale také autobusy a tahače. Nevýhodou může být vyšší hmotnost v porovnání např. s nápravou McPherson. Vyšší je také cena takového řešení [1].

1.3 NÁPRAVA MCPHERSON

Náprava McPherson vychází z nápravy lichoběžníkové. Horní rameno je však nahrazeno posuvným vedením. Funkci tohoto vedení většinou přebírá tlumič. Jeho konstrukce proto musí být náležitě zesílena [1].



Obr. 3 Příklad přední nápravy McPherson [13]

Výhodou tohoto řešení je malý zástavbový prostor. Toto řešení je proto konstruktéry s oblibou využíváno na předních nápravách osobních moderních osobních automobilů, kde nechává dostatek prostoru pro umístění pohonné jednotky. Obdobně lze nápravu McPherson použít také na nápravě zadní, čímž lze získat větší, hlubší a širší zavazadlový prostor. Není to ale příliš časté [1].

Hlavní nevýhodou jsou nezanedbatelné změny odklonu a sbíhavosti při vertikálním pohybu kola. Tyto nedostatky lze zmírnit prodloužením příčných ramen (lze prodloužit téměř až k podélné ose vozu, čímž se zvětší poloměr kružnice, kterou kolo při kývání opisuje). Prodloužení lze ale uplatnit pouze v případě použití tohoto typu nápravy na zadní části vozidla. U přední nápravy tomu ve značné míře většinou brání pohonná jednotka [1].

1.4 KLIKOVÁ NÁPRAVA

Hlavními prvky klikové nápravy jsou podélná ramena s příčnou osou kývání (kolmou na podélnou rovinu vozu). Používá se většinou pro nepoháněné zadní nápravy vozidel. Ramena ve tvaru kliky jsou otočně uložena do dvou pryžových pouzder (ložisek) přímo na karoserii automobilu. Výhodné je tyto ložiska umístit co nejdále od sebe, kvůli lepšímu rozložení působících sil. Toto řešení je výhodné kvůli malému zástavbovému prostoru a nízké hmotnosti (zpravidla nevyžaduje těžkou nápravnicí) [1].

Kliky na jedné nápravě lze spojit do jednoho celku torzně poddajným prvkem. Tímto krokem vznikne tzv. „kliková náprava s torzním propojovacím prvkem“. Jak název napovídá, propojovací prvek dovoluje krut. Díky tomu plní také funkci stabilizátoru. V ohybu je však tuhý [1].



Obr. 4 Kliková náprava s torzně poddajným prvkom vozidla Peugeot 3008 [13]

Z hlediska kinematiky je toto řešení přechodem mezi nezávislým zavěšením a tuhou nápravou. Pokud bychom torzní propojovací prvek umístili do osy kol, měl by výsledný celek vlastnosti tuhé nápravy. Při stejnoběžném vertikálním pohybu kola vzniká mírná změna odklonu závislá na tuhosti kliky. Při protiběžném vertikálním pohybu kola dochází k výrazné změně odklonu [1].

Toto řešení přebírá výhody klikové nápravy a přidává mnohé další. Kromě malého zástavbového prostoru a nízké hmotnosti jsou to tyto: jednoduchá instalace a vyjmutí nápravy jako celku, nízká hmotnost neodpružených částí, malý počet součástí a konstrukční jednoduchost, snadné upevnění pružících a tlumících částí, malá změna sbíhavosti aj. [1].

Nevýhod pro využití v osobním vozidle není mnoho. Vlastností tohoto systému je obecně horší stabilita (v přímém směru a při průjezdu zatáčkou na nerovném povrchu) než u lichoběžníkového nebo víceprvkového řešení. Mezi další nevýhody patří nemožnost pohonu takovéto nápravy, tendence k přetáčivosti vlivem bočních sil nebo omezené maximální zatížení nápravy z důvodu vysokého namáhání svarových spojů [1].

1.5 VÍCEPRVKOVÁ NÁPRAVA

Jedná se o zavěšení přední nebo zadní nápravy využívající několik ramen. Tyto ramena mohou mít formu tyčí nebo ramen trojúhelníkových (tato mají dva upevňovací body na nápravnicí nebo karoserii vozidla a jeden zpravidla na těhlici). Systémy obsahují obvykle čtyři nebo pět hlavních prvků ovlivňujících vedení kola. Není to však podmínkou. Jednotliví výrobci často používají vlastní obchodní názvy pro konkrétní řešení, například multi-link [1].

Hlavním benefitem víceprvkové nápravy je možnost lepšího naladění podvozku a možnost upravovat jednotlivé vlastnosti v předprodukční fázi vozidla zvláště, upravením jednotlivých vzájemně nezávislých komponent. Současně víceprvková náprava v dnešní době nejlépe splňuje dynamické požadavky na přesné vedení kola u sériových osobních automobilů. S tím je ovšem spojena vyšší konstrukční náročnost a z toho plynoucí vyšší cena tohoto řešení [1].



Z výše uvedených důvodů nacházíme víceprvkové nápravy většinou u vozů dražších nebo spadajících do vyšších tříd. Často se k jejich použití uchylují také automobilky zaměřující se na sportovní jízdní vlastnosti.

1.6 ZAVĚŠENÍ VOZIDEL FORMULE STUDENT

Pravidla soutěže Formula Student blíže nespecifikují podobu zavěšení vozů této kategorie. Návrh podvozku vozidla je limitován pouze stanoveným minimálním pohybem kola ve vertikálním směru 25,4 mm oběma směry od základní polohy vozu s řidičem uvnitř (celková pohyblivost kola tedy musí být nejméně 50,8 mm), minimálním rozvorem náprav 1 525 mm a rozchodem kol užší z náprav minimálně 75 % rozchodu širší nápravy [11].

V soutěži Formula Student používají všechny týmy bez výjimky, stejně jako ostatní závodní vozy formulového typu, lichoběžníkové zavěšení s nestejně dlouhými trojúhelníkovými rameny. U závodního vozu jsou ještě důležitější kritéria nízké hmotnosti a možnosti nastavení jednotlivých kinematických parametrů, čímž se dá značně ovlivnit chování vozu, popřípadě jej změnit v závislosti na konkrétních podmínkách nebo závodní disciplíně. Proto je tento typ zavěšení pro vozy Formula Student nejvhodnější [7].

Otázka hmotnosti je u ramen náprav o to klíčovější, jelikož spadají částečně do tzv. neodpružených hmot. V závislosti na teorii se míra „neodpruženosti“ ramen liší. Obecně lze však prohlásit, že přibližně 50 % hmotnosti ramen zavěšení spadá do neodpružených hmot, zbylá polovina potom do hmot odpružených [7]. Konkrétní řešení tvaru trojúhelníkových ramen se liší tým od týmu v závislosti na návrhu kinematiky pro dané vozidlo.

OCELOVÁ RAMENA ZAVĚŠENÍ

Ocel je klasický materiál používaný v soutěži Formula Student. Zhotovení ramen z oceli je v závislosti na použité jakosti poměrně levné a konstrukčně jednoduché. Mezi hlavní výhody tohoto řešení patří především spolehlivost. V případě, že návrh není poddimenzován, spolehlivost je, až na výjimky špatného výrobního nebo technologického postupu, téměř absolutní. Hlavní nevýhodou je zejména vyšší hmotnost oproti kompozitnímu řešení, velký počet výrobních operací a možný vznik nepřesností důsledkem stahování svařence.



Obr. 5 Zavěšení předního kola vozidla Dragon 6



RAMENA ZAVĚŠENÍ ZHOTOVENÁ Z KOMPOZITNÍHO MATERIÁLU

Použití ramen z uhlíkovými vlákny vyztuženého materiálu s sebou nese značnou úsporu hmotnosti. Na druhou stranu návrh vyžaduje značné dovednosti a zkušenost s návrhem z uhlíkového kompozitu u takto namáhaného dílu. Výroba je poměrně nákladná vzhledem k nutnosti zvláštní frézované hliníkové formy pro každou geometrii ramena. Ramena se vyrábí většinou z předimpregnované tkaniny tzv. „prepregu“, viz kapitola 2.3 „Prepreg“.

KOMPOZITNÍ RAMENA S VLEPENÝMI ÚCHYTY KLOUBŮ

Toto řešení je jakýmsi mezikrokem mezi celokompozitními a čistě ocelovými rameny. Jedná se o konstrukci obsahující kompozitní trubky a do nich vlepené většinou frézované úchyty kloubů z lehké slitiny. Trubky se nakupují jako sériově vyráběný polotovar. Výhodou tohoto řešení je úspora hmotnosti oproti ocelovým ramenům a zároveň vyšší přesnost, díky eliminaci sváření. Výroba má také méně operací.

Hlavní nevýhodou je kromě vyšší ceny oproti ocelové variantě zejména hůře predikovatelné chování lepeného spoje, který je náchylný k porušení vlivem sebemenší neopatrnosti při lepení dílu viz kapitola 3 „Lepený spoj“. Je proto vhodné spoj vhodně dimenzovat a doporučuje se kontrolovat každý vyrobený kus vhodným zátěžným cyklem zohledňujícím budoucí pracovní zatížení [6].



Obr. 6 Selhání lepeného spoje [6]

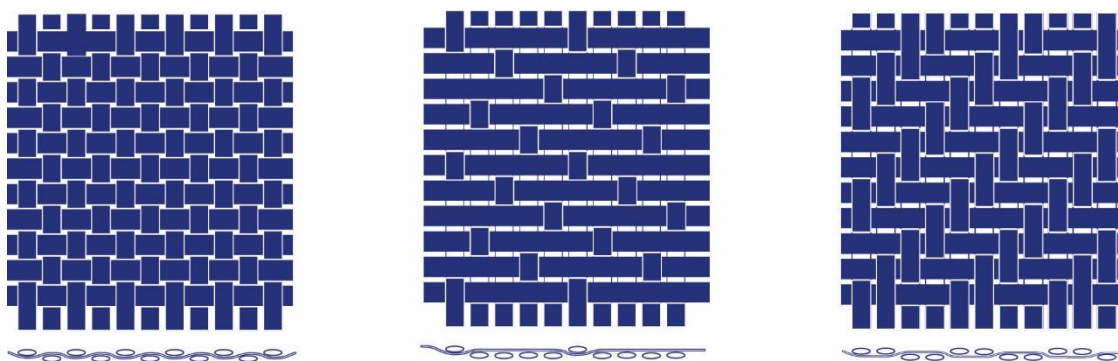


2 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY

Kompozitní materiál je obecně materiál složený z více částí. Ve strojírenství roste obliba kompozitů obsahujících plast vyztužený vlákny. Většina vyztužených plastů obsahuje vlákna, která jsou kladena po vrstvách. Jedná se proto o tzv. „lamináty“ (z latinského lamina – vrstva). Vrstvy vláken jsou k sobě spojovány pryskyřicí. Tato pryskyřice se nazývá matricí laminátu. Vzhledem ke stavbě materiálu jsou jeho vlastnosti značně odlišné od konvenčních materiálů. Pro lepší pochopení těchto odlišností kompozitních materiálů bude v následujících odstavcích shrnuta jejich stavba, proces výroby a další předpoklady, pro jejich vhodnou aplikaci [2].

2.1 VYZTUŽUJÍCÍ VLÁKNA

Vlákna používaná pro vyztužování kompozitů jsou velmi tenká. Jejich průměry se pohybují v jednotkách až desítkách mikrometrů. Proto jsou spojována do pramenů obsahujících přibližně 200 vláken. Tyto prameny jsou dále zpracovávány na tkaniny, které jsou používány při tvorbě laminátů. Tkaniny jsou buď jednosměrné (tzv. rovingy) nebo vícesměrné. U dvou směrných tkanin jsou prameny orientovány ve dvou směrech – vzájemně otočených o 90°. Nejčastější uspořádání je plátno a kepr [2].



Obr. 7 Ukázka některých typů vazby tkanin. Zleva plátno, satén a kepr [26].

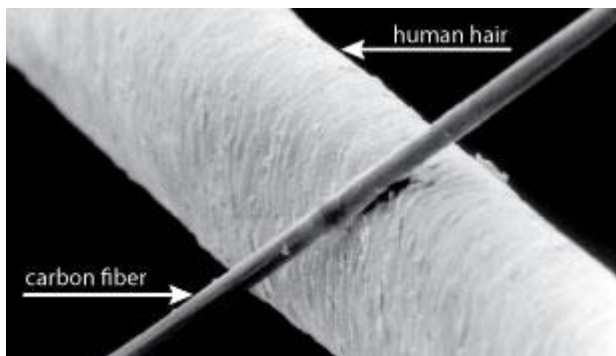
Mezi nejrozšířenější vlákna patří vlákna skelná, aramidová a uhlíková. Každý ze jmenovaných typů vláken má své specifické vlastnosti a vhodné užití. V této kapitole se budeme zabývat pouze kompozitem obsahujícím uhlíková vlákna, často označovaným jako CFRP¹ [2].

¹ Z anglického carbon fibre reinforced polymer



2.1.1 UHLÍKOVÁ VLÁKNA

Uhlíková vlákna jsou extrémně tuhá a pevná. Jejich tažnost je naopak velmi nízká. Výchozí surovinou pro výrobu uhlíkových vláken jsou organické suroviny vláknitého tvaru (nejčastěji polyakrylonitril (PAN) nebo celulóza). Tato vlákna jsou s rostoucí teplotou karbonizována² [3].



Obr. 8 Porovnání velikosti lidského vlasu a uhlíkového vlákna [4]

VLASTNOSTI UHLÍKOVÝCH VLÁKEN

Uhlíková vlákna mají velmi vysokou hodnotu pevnosti pohybující se, při směru zatěžování rovnoběžném se směrem vláken, mezi hranicí $\sigma_{PIIf} = 1500$ až 5000 MPa. Vysoká je také hodnota modulu pružnosti v tahu při stejném směru zatěžování: $E_{If} = 180$ až 500 GPa, dle výrobce a jakosti vláken. Vlastnosti v příčném směru vlákna jsou výrazně horší. Toto bývá, v případě vyžadované pevnosti také v tomto směru, kompenzováno umístěním kolmých pramenů ve vazbě tkaniny, které přeberou zatížení ve směru kolmém na původní vlákno. Uhlíková vlákna jsou tedy silně anizotropní. Hustota je oproti jiným konstrukčním materiálům nízká a pohybuje se v závislosti na výrobci komponentů a určení výsledného kompozitu mezi $\rho_f = 1,6$ až $2,0$ g·cm⁻³ [2].

2.2 MATRICE

Matrice je materiál, který slouží k propojení jednotlivých vláken a po vytvrzení zajišťuje tvarovou stálost výsledného materiálu – kompozitu. Mezi hlavní úkoly matrice patří zejména přenos namáhání mezi jednotlivými vlákny, zajištění stanovené polohy vláken vůči sobě i vzhledem k celému výrobku a ochrana vláken vůči vnějším vlivům. Tyto vlivy mohou být jak mechanické, tak chemické [2].

² Karbonizace je proces přeměny výchozího vlákna na vlákno uhlíkové. Probíhá mezi teplotami 1000°C a 2000°C v inertní atmosféře, přičemž dojde k odstranění atomů ostatních prvků. Výsledný podíl uhlíku ve vlákne je přibližně 90 %. Ten lze

dále zvýšit tzv. grafítizací. Ta je prováděna mezi teplotami 2000°C a 3000°C , opět v inertní atmosféře. Výsledný obsah uhlíku je až 99 %. Při grafítizaci vzniká uspořádaná vrstvená struktura vlákna.[2][3]



2.2.1 EPOXIDOVÁ MATRICE

Nejčastěji používaným druhem pojiva pro dosažení co nejvyšších pevnostních charakteristik je matrice epoxidová. Pevnost v tahu matrice se může pohybovat mezi $\sigma_{Ptm} = 48$ až 120 MPa. Hodnoty modulu pružnosti v tahu bývají zpravidla mezi $E_m = 2,8$ až 3,7 GPa. Velkou výhodou je její tekutost ve výchozím stavu, což usnadňuje aplikaci a manipulaci. Oproti pryskyřicím s horšími vlastnostmi je ovšem značně nákladnější. Používá se tedy pro vysoce kvalitní materiály (zejména ve spojení s uhlíkovými vlákny) v oblastech jako jsou sportovní potřeby, letectví, motorsport atd. [2].

Tekutá epoxidová pryskyřice se vytvrdí přidavkem tvrdidla. Proces vytvrzování je založen na vzájemné reakci molekul pryskyřice a tvrdidla. Jedna molekula tvrdidla tedy reaguje s jednou molekulou pryskyřice. Je proto důležité dodržovat stanovený poměr těchto složek. V opačném případě může dojít ke zhoršení vlastností materiálu. Zvolením konkrétního tvrdidla či pryskyřice a jejich vzájemnou kombinací lze docílit specifické vlastnosti [2].

2.3 PREPREG

Hovoříme-li o tzv. prepregu, jedná se o pryskyřici předsycenou tkaninu. Odpadá tak ruční nanášení pojiva, které je již obsaženo ve výchozím materiálu. Po naklazení jednotlivých vrstev tkanin do žádaných směrů a orientace je výrobek vytvrzen působením tepla a tlaku. To lze provést lisováním za tepla v lisu nebo v autoklávu. Výhodou prepregu je oddělený proces prosycování (probíhá u výrobce tkaniny) od procesu výroby dílu. Toto oddělení má velký vliv na kvalitu výsledného výrobku, jelikož lze snadno reprodukovat a kontrolovat podmínky výroby i skladbu tkanin. Nevýhodou tohoto typu tkanin jsou několikanásobně vyšší pořizovací náklady oproti samostatným tkaninám a specifické nároky na skladování [2].

2.4 VÝHODY KOMPOZITU S UHLÍKOVÝMI VLÁKNY

Vláknové kompozity jsou vysoce pevné a tuhé, zejména při namáhání tahem. Tyto vlastnosti lze navíc přizpůsobit provozovanému zatížení při konkrétní aplikaci a to zejména orientací vláken nebo počtem vrstev. Skladba vrstev a orientace lze různě kombinovat. Takto lze získat tzv. „materiál na míru“, přesně splňující požadavky pro danou aplikaci. Výsledný kompozit je zpravidla anizotropní. Tato anizotropie pramení z různé orientace vláken v kladených vrstvách zejména směry největšího namáhání. Mezi další výhody těchto materiálů patří vysoká odolnost proti stárnutí a korozi, vysoká odolnost proti dynamickému namáhání nebo nízké investiční náklady pro kusovou a malosériovou výrobu [2].

2.5 NEVÝHODY KOMPOZITU S UHLÍKOVÝMI VLÁKNY

Jelikož existuje velké množství variant použitých materiálů a typů tkanin, nelze definovat tzv. „standardní laminát“, kterému bychom přisoudili přesně definované vlastnosti. Tyto vlastnosti jsou navíc závislé na preciznosti a důkladnosti laminující osoby (hlavně při ručním tzv. „mokřím laminování“), z důvodu měnících se vlastností kompozitu při různé orientaci vláken. Laminující osoba tedy musí mít jistou zručnost a zkušenost, protože kvalita výsledného výrobku



leží z velké části na ní. Z toho důvodu musí mít také lepší kvalifikaci než běžný pracovník v konvenční strojírenské výrobě [2].

Výslednou pevnost lze poměrně obtížně exaktně vypočítat vzhledem k vrstevnaté struktuře a celkové anizotropii materiálu. Teoreticky vypočítané hodnoty mechanických vlastností by měly být ověřeny fyzickou zkouškou. Podstatnou nevýhodou je také omezená možnost opravy výrobku při jeho poškození, kvůli porušení vláken, která jsou nositelem pevnosti. Většímu průmyslovému rozšíření brání také omezená možnost automatizace³ procesu výroby vysoce kvalitních kompozitních dílů⁴. Náklady na případnou velkosériovou výrobu by tedy byly značné[2].

³ Existují strojní zařízení, která dokáží plně automaticky vyrábět hotové součásti. Tyto stroje pracují se sekanými vlákny, čímž se značně zhoršují mechanické vlastnosti oproti použití tzv. nekonečných vláken⁴ v tkaninách. Tento typ zařízení se používá pro velkosériovou výrobu výrobků na bázi skelných vláken [2].

Další technologií je tzv. „kontinuální laminace“. Tato technologie umožňuje vyrábět „nekonečné pásy“ plochých nebo zvlněných výrobků. Obdobně lze také vyrábět trubky [2].

Nejvyšší kvalitativní nároky splňují technologie navíjení a oplétání. Tyto technologie jsou převzaty z textilního průmyslu. Jejich použití u kompozitů je značně technologicky a investičně nákladné. Technologií oplétání byly například vyrobeny nosníky supersportovního automobilu Lexus LFA [2][5].



3 LEPENÝ SPOJ

Lepení je definováno jako spojení dvou částí (substrátů) za použití adheziva. Pod pojmem adhezivo rozumíme nekovové pojivo, které je schopné pomocí soudržných sil držet spojované součásti při sobě [8].

Lepení je moderní metoda spojování částí. Moderní lepidla mají vynikající mechanické vlastnosti, houževnatost, odolnost proti povětrnostním i chemickým vlivům aj. Použitím lepeného spoje lze poměrně snadno vytvořit výrobek, který by konvenčními metodami byl buď velmi drahý, nebo dokonce nevyrobitelný. Použití adheziv tedy může nést i ekonomický benefit [8].

Přes tyto vlastnosti roste obliba lepeného spoje u konstruktérů a technologů spíše pozvolna. Všeobecné inženýrské praktiky jsou spíše konzervativní a drží se osvědčených řešení. Velkou nevýhodou lepidel je nesmírně široké portfolio produktů, ve kterém je těžké se zorientovat a určit vhodné řešení pro danou aplikaci. Další nevýhodou oproti konvenčním materiálům je obtížnější predikce chování a stanovení limitů daného produktu na dané aplikaci. Tyto vlastnosti jsou závislé na více faktorech např. stavu povrchu spojovaných dílů, množství použitého adheziva, atd. Proto je obtížné výpočtem exaktně stanovit vlastnosti konkrétního spoje. Tento značný hendikep je postupně zmenšován rozšiřujícími se numerickými modely lepených spojů. Predikce chování na úrovni oceli však pravděpodobně nebude nikdy možná [8].

3.1 MECHANISMY ZATĚŽOVÁNÍ LEPENÉHO SPOJE

Jak je známo, látky drží pospolu díky přitažlivým silám elektronů pohybujících se v jejich atomech a molekulách. To platí pro všechny skupenství látek. Důkazem může být povrchové napětí kapalin nebo těžce oddělitelné kusy dvou kovových desek s broušeným povrchem. V tomto případě jsou nerovnosti povrchů tak malé, že atomy dvou desek jsou si natolik blízké, že mezi nimi působí přitažlivé síly [8].

Lepidla tyto vlastnosti jak kapalin, tak tuhých látek chytře kombinují ke své funkci. Ve výchozím stavu jsou tekutá. Díky tomu dokáží téměř ideálně přilehnout na lepený objekt, díky čemuž působí přitažlivé síly mezi lepidlem a lepeným objektem. Ty tak mohou držet pospolu. Po vytvrzení se lepidlo chová jako tuhá látka. Jako již přilnutá nemůžou měnit tvar a mohou zajišťovat funkci pevného spoje dvou objektů. Proto hraje klíčovou roli pro zajištění požadovaných vlastností vhodná úprava povrchů obou spojovaných částí. Nečistoty i mastnota znemožňují dostatečné přilnutí povrchů a znemožňují vznik přitažlivých („soudržných“) sil. O přípravě povrchů pro lepení je blíže pojednáno v podkapitole 3.2 „Příprava povrchu pro lepení“ [8].

Při zajištění správných podmínek pro lepený spoj nese velkou část zatížení přímo samo lepidlo. Jelikož je maximální napětí v adhezivech řádově menší než u běžných materiálů, je třeba vhodně dimenzovat lepený spoj [15].

3.1.1 NÁVRH LEPENÉ PLOCHY

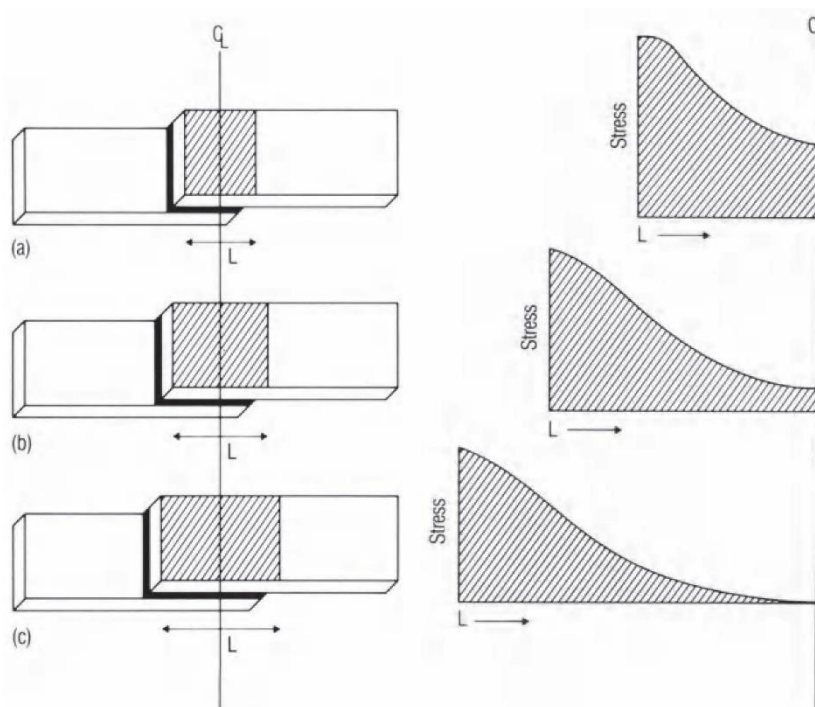
Nepsané pravidlo je, že lepidla by neměla být zatěžována na více než 10 % své meze pevnosti. V leteckém průmyslu jde dokonce o hodnotu 5 %. Tímto konzervativním přístupem se za-



ručí, že u adheziva nedojde ke creepu. Pokud je součást zatěžována pouze jedním směrem, přispívá to k výrazně lepšímu únavovému chování [8].

Je důležité si uvědomit, že lepenou plochu nelze zvětšovat donekonečna. Nejvíce jsou namáhány krajní oblasti spoje. Existuje hraniční rozměr, za kterým již nelze uvažovat rovnoměrný nárůst přenášeného napětí. Bezpečnost spoje naopak klesá, jelikož se zvyšuje možnost creepu lepidla ve střední nezátížené části, což zvyšuje nebezpečí únavového porušení. Tento hraniční rozměr se liší podle typu lepidla a geometrie plochy. K jeho stanovení lze využít specializovaný software. Pro běžnou praxi postačí brát tuto informaci v potaz a ověřit předpokládané napětí mechanickou zkouškou [8].

Empiricky byly stanoveny mezní rozměry lepeného spoje pro konzervativní návrhy. Minimální překrytí lepené plochy by mělo být 12 mm a maximální 25 mm, pro zajištění kýžených výsledků [8].



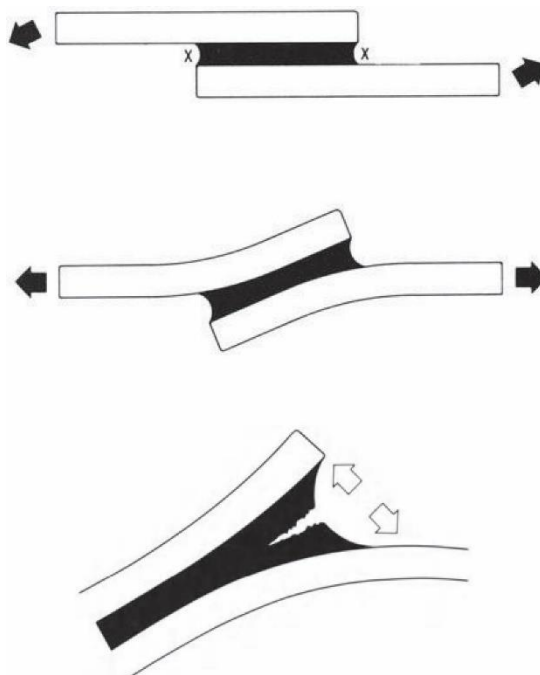
Obr. 9 Průběh napětí na lepení ploše [8]

Na Obr. 9 je znázorněn průběh napětí na lepené ploše. Přímka C_L znázorňuje osu symetrie uprostřed přeplátovaného lepeného spoje. Jak je vidět, napětí ve středové oblasti spoje s narůstající délkou klesá. Pokud bychom použili délku větší, než je znázorněno v případě c), již bychom nezvýšili maximální přenášenou sílu, neboť střední oblast spoje by nepřenášela žádné napětí.



3.1.2 ZATÍŽENÍ LEPENÉHO SPOJE

Nejlepších vlastností u lepeného spoje docílíme, budeme-li jej zatěžovat převážně smykovým napětím. Toto plyne ze samotných mechanismů pevnosti lepeného spoje. Tlakové zatížení snášejí lepidla také velmi dobře [15]. Naopak nejhorším módem pro zatěžování lepidla je odlupování. Jelikož při reálných aplikacích se čistý tah prakticky nedá docílit, je dobré co nejvíce omezit namáhání v tahu (viz Obr. 10) [8].



Obr. 10 Vznik odlupování při smykovém napětí u přeplátovaného lepeného spoje [8]

Přes probíhající vývoj v této oblasti, moderní lepidla dokáží přenést přibližně 100krát větší napětí ve smyku než v odlupování. Pokud nelze zamezit působení síly vyvolávající odlupování lepeného spoje, je dobré spoj vyztužit šrouby, nýty atp., aby bylo odlupování minimalizováno [8].

3.1.3 PORUCHY LEPENÉHO SPOJE

V knize [16] je popsáno několik teorií, které vysvětlují mechanismy adheze. Pro běžnou inženýrskou praxi se lze spokojit se zjednodušeným výkladem vyskytujících se jevů.

ADHEZIVNÍ PORUCHA

V adhezivní zóně spoje dochází ke styku lepidla a lepené součásti. Pokud se mezi povrchem lepidla a součástí nachází cizí prvek (mastnota, nečistota), zabrání svou přítomností přilnutí lepidla a tudíž oslabí celkovou pevnost spoje. Tato porucha lze často přičítat nevhodné nebo nedostatečné povrchové úpravě. U řady materiálů může být povrchová vrstva zoxidovaná nebo jinak oslabena vlivem prostředí. To může mít také negativní vliv na celkovou pevnost spoje.



KOHEZNÍ PORUCHA

Kohezní porucha je porucha vnitřní soudržnosti lepidla. Při testování lepených spojů je výskyt tohoto typu poruchy žádoucí, jelikož nám ukazuje samotné pevnostní limity lepidla pro dané geometrické a zatěžovací podmínky.

3.2 PŘÍPRAVA POVRCHU PRO LEPENÍ

Přestože některé typy adheziv speciální přípravu povrchu nevyžadují, obecně lze doporučit před jakýmkoliv adhezivním spojením dvou dílu povrch důkladně očistit od nečistot a odmastit vhodným přípravkem. Tento krok je obzvláště důležitý pro vysokopevnostní lepidla [9][15]. Vhodné je použít odmašťovací přípravek, který se samovolně vypaří, čímž se vyhneme zbytečné manipulaci s výrobkem a s tím související možnosti jej znovu znečistit. Lepení provádíme pokud možno ihned po odpaření odmašťovací lázně [9].

Hladké povrchy je vhodné zdrsňit středně hrubým smirkem. Smirkování musí být následováno očištěním a odmaštěním povrchu i v případě, že již byl před broušením odmaštěn. U kovových materiálů pokrývajících se vrstvou svých oxidu (pasivace) je vhodné tuto vrstvu povrchově odbrousit. Jelikož mají tyto sloučeniny jiné mechanické vlastnosti, mohlo by dojít k porušení lepeného spoje právě na rozhraní kovu a jeho oxidu [9].

Pro uhlíkový kompozit se doporučuje zdrsňit povrch smirkovým papírem a opakovaně důkladně odmastit. Důležité je brousit pouze povrchově, aby nedošlo k porušení vláken uhlíku. Vhodná jsou odmašťovací lázně na bázi alkoholu nebo acetonu. Před samotným lepením je vhodné zkontrolovat, zda bylo veškeré odmašťovací činidlo odpařeno [8][9][15].

3.3 ROZDĚLENÍ LEPIDEL

Existuje celá řada skupin a podskupin lepidel, se kterými se lze v běžném životě setkat. Mnoho z nich má velmi omezené potenciální využití. Budeme se tedy zabývat pouze vybranými skupinami lepidel, která jsou ve strojírenství běžná.

3.3.1 ANAEROBNÍ LEPIDLA

Jak název napovídá, adheziva tohoto druhu vytvrzují bez přístupu vzduchu. Tento druh lepidel byl speciálně vyvinut pro sestavování a upevňování součástí v sestavách jako jsou kuželové spoje, pojišťování závitů, upevňování ložisek atd. Velkou výhodou je široká nabídka pevností a viskozity. Tyto parametry mohou být téměř v libovolné kombinaci. Lze tedy zvolit produkt vhodný přímo pro konkrétní aplikaci téměř „na míru“. Vzhledem k účelu a vlastnostem lepidla je spoj většinou opakovaně rozebíratelný, což je v tomto případě výhodou. Díky svým těsnícím vlastnostem mohou nahrazovat v některých aplikacích tmely [8].



Obr. 11 Anaerobní lepidlo pro zajišťování šroubů Loctite 262[17]

Obvyklé pevnosti ve smyku se pohybují od 2 MPa (u velmi slabých výrobků) do přibližně 18 MPa, výjimečně až 35 MPa u nejsilnějších lepidel. Vhodná tloušťka lepidla v lepeném místě je 0,05 mm až 0,25 mm. Velkou výhodou pro tento typ lepidla je snížená náročnost na přípravu povrchu. Jelikož jsou tato lepidla silnými rozpouštědly, není stav povrchu rozhodující pro funkčnost lepeného spoje, přestože nejlepší výsledky vykazuje na připraveném povrchu (očistění, odmaštění). Z toho důvodu není vhodné spojovat některé typy plastů, jelikož by mohla být porušena jejich struktura. Obecně se anaerobní typ používá pouze pro kovy [8].

3.3.2 KYANOAKRYLÁTY

Kyanoakryláty se vyznačují nízkou viskozitou a velmi krátkou dobou tuhnutí. Jelikož za určitých podmínek mohou určité druhy tvrdnout již za pár vteřin, lidově je tato skupina označována jako „vteřinová lepidla“.

Ve strojírenství se používají ke spojování gumových, plastových nebo malých kovových součástí zatěžovaných zejména tahem. Obecně lze ale říct, že mohou být použity téměř na všech druzích povrchu. Vzhledem k nízké viskozitě je vhodné používat lepidlo do maximální tloušťky 0,125 mm lepeného spoje. Při větších mezerách má tendenci samovolně vytékat. Dobře se vypořádávají i s nepřípravenými povrchy obdobně jako anaerobní adheziva. Nevýhodou tohoto typu lepidla je nízká odolnost vůči teplotě a náchylnost na vlhkost. Houževnatost je poměrně nízká [8].

3.3.3 ADHEZIVA NA BÁZI EPOXIDOVÉ PRYSKYŘICE

Jedná se o termosetická lepidla vytvrzující mechanismem polymerace, obdobně jako epoxidová pryskyřice. Vyznačují se vysokou pevností, odolností a houževnatostí. Díky tomu je užití poměrně univerzální. Pouze použití na velmi malých součástech je omezené vzhledem ke střední až vysoké viskozitě. Vyskytují se ve dvou variantách – dvousložkové a jednosložkové vytvrzované teplem [8].



DVOUSLOŽKOVÁ EPOXIDOVÁ LEPIDLA

Dvousložková epoxidová lepidla se skládají ze dvou složek – základu na bázi epoxidové pryskyřice a tvrdidla. Po smíchání dvou složek lepidlo vytvrzuje za pokojové teploty zpravidla minimálně 24 hodin do úplné pevnosti. Manipulační pevnosti dosahuje přibližně za 6 hodin. Proces vytvrzení lze urychlit zvýšenou teplotou. Pro správné vlastnosti je třeba dodržovat předepsaný poměr složek. U některých typů je toto usnadněno výtlačnou kartuší s mixovacím nástavcem. Toto řešení je uživatelsky velmi pohodlné, jelikož lze produkt snadno dávkovat a odpadá nutnost navažování přesného množství složek [8].

Nejdůležitější podmínkou pro správnou funkčnost lepeného spoje je vhodná úprava spojovaných povrchů. Dvousložková varianta je na kvalitu povrchu velmi háklivá, což při nedůsledné přípravě může vést k zásadnímu zhoršení vlastností. Každý materiál vyžaduje specifickou povrchovou přípravu. Obecně lze doporučit důsledné očištění a odmaštění, případně zdrsnění lepené plochy [8].

JEDNOSLOŽKOVÁ EPOXIDOVÁ LEPIDLA

Tvrdidlo je v tomto lepidle již zakomponováno přímo z výroby a je aktivováno teplem. Tepelné vytvrzování probíhá přibližně mezi 80 – 200 °C. Při vytvrzení na vyšší teploty jsou dosahovány vyšší pevnosti, ale nižší houževnatosti a naopak. Díky tepelnému vytvrzování není pevnost spoje tolik náchylná na čistotu povrchu. Mastnota a nečistoty se při vysoké teplotě částečně rozpustí díky přítomným rozpouštědlům [8].



4 ZKOUŠKY LEPENÝCH SPOJŮ

Zkoušky lepených spojů, stejně jako zkoušky ostatních materiálů, lze rozdělit do dvou skupin. Jedná se o zkoušky statické a dynamické.

Statické zkoušky jsou snáze proveditelné, zpravidla levnější a mají spíše obecnou vypovídající hodnotu o vlastnostech lepidla. Nejběžnější statickou zkouškou pro lepené spoje je „Zkouška pevnosti ve smyku při tahovém namáhání přeplátovaných lepených sestav“, kterou definuje norma ČSN EN 1465 (66 8510) [19]. Substráty pro lepený spoj jsou tenké plechy. Samotný spoj vznikne přeplátováním těchto plechů. Zkouška je prováděna na zařízení pro tahovou zkoušku. Zjišťovaným parametrem při této zkoušce je pevnost adheziva ve smyku. Vzhledem k podmínkám zkoušky a poměrně malé tloušťce plechu je vznikající napětí v odlupování zanedbatelné. Vzhled vzorku lze připodobnit k vzorkům vyobrazeným na Obr. 10. Mezi další statické zkoušky patří zkouška odlupování, tahem nebo creepová zkouška [16].

Dynamické zkoušky jsou náročné na strojní zařízení a v případě únavové zkoušky často také na čas. Tyto zkoušky se používají pro zjišťování nebo ověřování specifických vlastností lepeného spoje, často při konkrétní aplikaci. Mezi nejběžnější dynamické zkoušky patří únavová zkouška a rázová zkouška [16].

4.1 ZKOUŠENÍ PARAMETRŮ LEPENÉHO SPOJE

Vzhledem k dostupnosti možných zkoušek a jejich časové náročnosti bylo rozhodnuto, že jednotlivé parametry budou vyhodnocovány na základě statických zkoušek prováděných na zařízení pro zkoušku tahem. Nejednalo se však o normovanou zkoušku, nýbrž o zkoušení za specifických geometrických podmínek pro konkrétní aplikaci – v tomto případě válcová vložka v trubce. Tyto zkoušky byly provedeny na kalibrovaném zařízení LabTech LabTest 6.500 Leteckého Ústavu Fakulty Strojního inženýrství VUT v Brně.



Obr. 12 Zařízení LabTest 6.500 Leteckého ústavu VUT



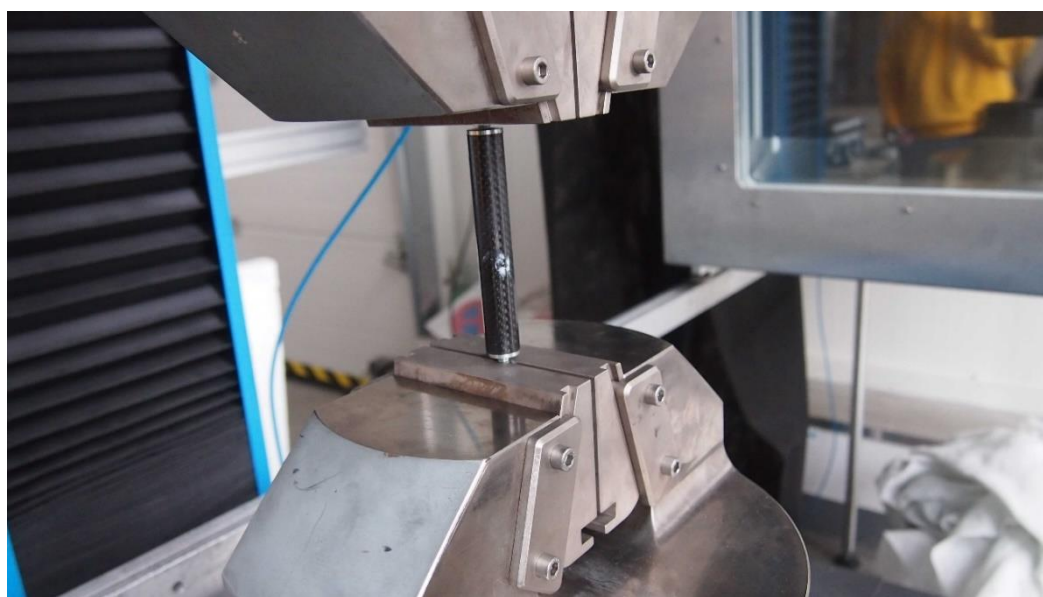
4.1.1 METODIKA VYHODNOCOVÁNÍ

Připravené vzorky byly osazeny na měřicí přístroj a následně byla zkoumána statická síla, při které se daný vzorek poruší. Tato hodnota byla následně prohlášena za mez pevnosti daného vzorku.

4.1.2 ZKOUMANÉ PARAMETRY

Pro správnou funkčnost lepeného spoje je nutné zajistit vhodné podmínky. Těmito podmínkami jsou zejména stav povrchů obou substrátů. Dalšími podmínkami jsou správná volba lepidla, tloušťka a tvar lepené plochy. V této práci se budeme zabývat pouze stavem povrchu karbonové trubky a volbou vhodného lepidla.

Vliv stavu povrchu hliníkové vložky, tvaru drážky pro lepidlo a její hloubku řeší ve své bakalářské práci „*Návrh spojovacích tyčí zavěšení kol z kompozitních materiálů*“ kolega Petr Olišar [12].



Obr. 13 Zkoušení vzorku na zařízení pro zkoušku tahem

Kvůli finanční náročnosti vzorků, časové náročnosti jejich přípravy a poměrně velkému množství zkoumaných parametrů bylo rozhodnuto vyrábět pro každý stanovený parametr vždy tři testovací vzorky. Ze statistického hlediska to není mnoho, ale tři vzorky je dostatečný počet pro porovnání dílčích parametrů mezi sebou a tím i určení směru, kterým je vhodné se ubírat při dalším zkoumání.



4.2 ZKOUŠKA Č. 1

První zkouška proběhla dne 27. 1. 2016 na Leteckém ústavu a byla zaměřena na úpravu vnitřního povrchu trubky. Pro tuto zkoušku byla zvolena trubka z uhlíkových vláken o vnějším průměru $\varnothing 16$ mm a vnitřním průměru $d_I = 14$ mm. Délka lepené plochy byla $l_I = 20$ mm.

4.2.1 PŘÍPRAVA VZORKŮ PRO ZKOUŠKU Č. 1

Kompozitní trubky byly opatřeny dírami pro doplnění lepidla po vsunutí vložky o průměru 2,5 mm.

Vzorky 1,2,3 měly vnitřní povrch broušený smirkovým papírem o hrubosti $160 \text{ zrn} \cdot \text{cm}^{-2}$. Povrch hliníku po soustružení nebyl dále opracován. Oba lepené povrchy byly před lepením důkladně odmaštěny.

Vzorky 4,5,6 neměly vnitřní povrch trubky nijak opracovaný. Oba lepené povrchy byly taktéž odmaštěny.

Pro testy povrchové úpravy trubky bylo zvoleno lepidlo 3M DP490. Jedná se o dvousložkové epoxidové lepidlo vynikající vysokou pevností, přičemž zároveň zůstává houževnaté. Tyto vlastnosti jsou pro zvolenou aplikaci žádoucí. Podrobněji budou vlastnosti lepidla rozebrány v podkapitole 4.4.1 „Zvolená lepidla“.

4.2.2 VÝSLEDKY ZKOUŠKY Č. 1

Naměřené výsledky ukázaly důležitost úpravy vnitřního povrchu trubky.

Tabulka 1 Naměřené hodnoty síly při porušení vzorků zkoušky č. 1

Vzorek	Síla při porušení vzorku F_F [N]
1	15 113
2	15 356
3	14 048
4	2 574
5	2 162
6	2 220

4.2.3 ANALÝZA VÝSLEDKŮ

Po provedení testu byly jednotlivé vzorky rozřezány a jejich vnitřní povrch byl následně pečlivě prozkoumán se zaměřením na vzhled lepených ploch, jenž indikuje mechanismus, kterým došlo k porušení lepeného spoje. Hodnoty v Tabulka 2 byly stanoveny odhadem na základě vizuálního posouzení daného vzorku.



Tabulka 2 Podíl mechanismů porušení na ploše lepeného spoje u zkoušky č. 1

Vzorek	Adhezivní [%]	Kohezivní [%]	Smišený [%]
1	50	40	10
2	30	50	20
3	30	40	30
4	100	0	0
5	100	0	0
6	100	0	0

Vzorky 1-3 vykázaly uspokojivé výsledky. Charakter lepených ploch byl kombinací obou druhů poruch popsanych v podkapitole 3.1.3 „Poruchy lepeného spoje“.



Obr. 14 Analýza lepené plochy vzorku 3

Vzorky 4-6 shodně vykázaly čistou adhezivní poruchu při velmi malém působícím napětí. Toto bylo způsobeno nevhodnou (v tomto případě žádnou) povrchovou úpravou kompozitní trubky.



Obr. 15 Adhezivní porucha vzorku 6



VÝPOČET PRŮMĚRNÉ SÍLY A STŘEDNÍHO NAPĚTÍ

Z naměřených hodnot pro dané parametry byly stanoveny aritmetické průměry sil pro porušení vzorku podle vztahu

$$F_p = \frac{F_{F1} + F_{F2} + \dots + F_{Fn}}{n} \quad (1)$$

kde

F_p	[N]	aritmetický průměr naměřených sil,
$F_{F1} \dots F_{Fn}$	[N]	síly při porušení vzorků daného parametru,
n	[-]	počet vzorků daného parametru.

Z aritmetického průměru naměřených sil dále vypočítáme střední hodnotu napětí v lepené ploše podle vztahu [18]

$$\sigma_s = \frac{F_p}{S} \quad (2)$$

kde

$$S = \pi dl \quad (3)$$

Použité symboly mají význam

σ_s	[MPa]	střední napětí v lepené ploše,
S	[mm ²]	obsah povrchu lepené plochy,
d	[mm]	vnitřní průměr trubky,
l	[mm]	délka lepené plochy.

Vypočítané výsledky zkoušky č. 1 jsou přehledně uvedeny v Tabulka 3. Parametr 1 představuje opracování trubky smirkovým papírem o zrnitosti 160 zrn/cm², které bylo aplikováno na vzorky 1-3. Parametr 2 představuje vzorky 4-6, jejichž povrch trubky nebyl nijak mechanicky upraven.

Tabulka 3 Výsledky zkoušky č.1

Parametr č.	F_s [N]	σ_s [MPa]
1	14 839	16,87
2	2 319	2,64



4.2.4 VYHODNOCENÍ ZKOUŠKY Č. 1

Z výsledků první zkoušky je zřejmý význam opracování vnitřního povrchu trubky. Vypočítaná hodnota středního napětí odpovídá 47 % výrobcem udávané pevnosti ve spojení uhlíkového kompozitu s uhlíkovým kompozitem. Pevnost ve spojení s hliníkem se neudává.

Lepené spoje u vzorků 4, 5, 6 vykazaly nízké hodnoty pevnosti. Na Obr. 15 je zřejmá adhezni porucha na straně karbonové trubky. Pravděpodobně vlivem separační vrstvy z výroby trubek nedošlo k adekvátnímu přilnutí adheziva k CFRP kompozitu, což vedlo ke špatné funkčnosti lepené plochy.

4.3 ZKOUŠKA Č. 2

Druhá zkouška proběhla dne 21. 3. 2016 taktéž na Leteckém ústavu. Tato zkouška byla opět zaměřena na úpravu povrchů trubky. Použita byla trubka o vnějším průměru $\varnothing 16$ mm s vnitřním průměrem $d_2 = 14$ mm. Délka lepené plochy byla stanovena na $l_2 = 12$ mm. V této zkoušce byl zkoumán vliv zrnitosti smirkového papíru na výslednou pevnost spoje a vliv použití podkladového přípravku pro zlepšení vlastností lepených spojů u plastů (tzv. „primeru“ na plasty). Zkoumání vlivu tohoto primeru není samoúčelné, jelikož epoxidová matrice použitého kompozitu je plast. Kratší lepená plocha byla zvolena kvůli validaci předchozích výsledků. Ze stejného důvodu bylo opět použito lepidlo 3M DP490.

4.3.1 PŘÍPRAVA VZORKŮ PRO ZKOUŠKU Č. 2

Oproti první sérii byly zmenšeny díry pro doplnění lepidla po vsunutí vložky na průměr 1,5 mm.

Vzorky A1, A2 a A3 byly na vnitřním průměru broušeny smirkovým papírem o zrnitosti 160 zrn/cm². Následně byly broušené části důkladně odmaštěny. Soustružený povrch hliníkové vložky byl u všech vzorků druhé série pouze důkladně odmaštěn. Vzorky A4, A5 a A6 byly na vnitřním průměru broušeny smirkovým papírem o zrnitosti 80 zrn/cm². Tento povrch byl posléze důkladně očištěn a odmaštěn.



Obr. 16 Vzorky zkoušky č. 2 před testem



Vzorky A7, A8 a A9 byly na vnitřním průměru nejprve broušeny smirkem o zrnitosti 160 zrn/cm² a důkladně očištěny a odmaštěny. Po vypaření odmašťovacího činidla byl nanesen primer na plasty Teroson 150. Po zaschnutí přípravku byly části ihned lepeny.

4.3.2 VÝSLEDKY ZKOUŠKY Č. 2

Tabulka 4 Naměřené hodnoty síly při porušení vzorků zkoušky č. 2

Vzorek	Síla při porušení vzorku F _F [N]
A1	5 148
A2	8 515
A3	9 111
A4	9 027
A5	7 708
A6	9 272
A7	6 044
A8	6 842
A9	6 752

4.3.3 ANALÝZA VÝSLEDKŮ ZKOUŠKY Č. 2

Po zkoušení vzorků následovala obdobná analýza jako po zkoušce č. 1.

Tabulka 5 Podíl mechanismů porušení na ploše spoje u zkoušky č. 2

Vzorek	Adhezivní [%]	Kohezivní [%]	Smíšený [%]	Nedostatek lepidla [%]
A1	10	30	10	50
A2	20	60	10	10
A3	20	40	40	0
A4	20	70	10	0
A5	10	40	20	30
A6	10	40	50	0
A7	90	0	0	10
A8	90	10	0	0
A9	90	0	0	10



Obr. 17 Nedostatek lepidla na vzorku A1

Tabulka byla doplněna o podíl lepené plochy, na které se vyskytovalo nedostatečné množství lepidla. Kvůli tomuto nedostatku nemohla být daná plocha funkční. Nedostatek lepidla byl nejvíce patrný u vzorku A1 viz Obr. 17, kde činil 50 % celkové lepené plochy. Vzhledem k těmto okolnostem byl vzorek A1 vyřazen z výpočtu středního napětí. Obdobně vzorek A5 vykázal přibližně 30% nedostatek lepidla na lepené ploše. Vzorek A5 byl rovněž vyřazen z vyhodnocení dosažené pevnosti.



Obr. 18 Přibližně 60 % lepené plochy vzorku A2 bylo porušeno kohezní poruchou



Obr. 19 Adhezni porucha u vzorku A7

VÝPOČET PRŮMĚRNÉ SÍLY A STŘEDNÍHO NAPĚTÍ

Postupem uvedeným v podkapitole 4.2.3 „Analýza výsledků“ byly stanoveny hodnoty průměrné síly a středního napětí. Do výpočtu nebyly zahrnuty vzorky A1 a A5.

Jako parametr č. 3 jsou uvedeny vzorky A2-A3, jejichž povrch kompozitní trubky byl broušen smirkovým papírem o hrubosti $160 \text{ zrn} \cdot \text{cm}^{-2}$.

Broušení smirkovým papírem o zrnitosti $80 \text{ zrn} \cdot \text{cm}^{-2}$ bylo označeno jako parametr č. 4. Hodnoty průměrné síly a středního napětí byly stanoveny z výsledků vzorků A4 a A6.

Jako parametr č. 5 byly označeny vzorky A7-A9. Tyto vzorky byly broušeny smirkovým papírem o zrnitosti $160 \text{ zrn} \cdot \text{cm}^{-2}$ a následně ošetřeny primerem na plasty Teroson 150.

Tabulka 6 Výsledky zkoušky č.2

Parametr č.	F_s [N]	σ_s [MPa]
3	8 813	19,48
4	9 150	20,22
5	6 546	14,47

4.3.4 VYHODNOCENÍ ZKOUŠKY Č. 2

Vzhledem k vyřazení po jednom vzorku u parametrů č. 3 a 4 jsou výsledné hodnoty zkoušek těchto vzorků spíše orientační. Preciznější přípravou lepených ploch se přesto u vzorků s dostatkem lepidla podařilo dosáhnout vyššího středního napětí než u zkoušky č. 1.

Vzorky parametru 5 dosáhly nezanedbatelně horších výsledků než zbylé vzorky, které neobsahovaly defekt. Tyto výsledky byly způsobeny aplikací primeru na plasty. Ten neměl očeká-



vaný efekt, naopak zhoršil vlastnosti lepeného spoje a omezil adhezi na kompozitní trubku. Na všech těchto vzorcích došlo k adhezní poruše a nebyl využit potenciál lepidla.

Ani jeden z parametrů 3 a 4 nezaznamenal výrazně lepší výsledky než druhý. Na základě této zkoušky tedy nelze rozhodnout o vlivu zrnitosti brusného papíru na celkovou pevnost lepeného spoje. V obou případech bylo díky větší pečlivosti dosaženo lepších výsledků než u zkoušky č. 1.

4.4 ZKOUŠKA Č. 3

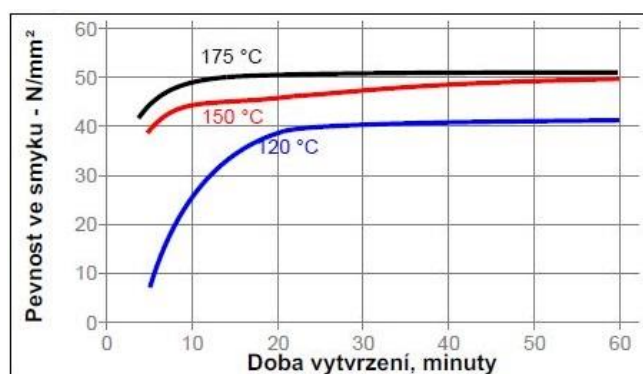
V pořadí třetí zkouška proběhla dne 2. 5.2016 na stejném stroji Leteckého ústavu VUT v Brně, jako v minulých případech. Tato zkouška byla zaměřena na porovnání vybraných typů lepidel. Kompozitní trubka měla vnější průměr $\varnothing 20$ mm a vnitřní průměr $d_3 = 16$ mm. Délka lepené plochy byla $l_3 = 18$ mm. Na základě předchozích zkoušek bylo zvoleno vnitřní povrch kompozitní trubky brousit smirkovým papírem o zrnitosti $80 \text{ zrn} \cdot \text{cm}^{-2}$.

4.4.1 ZVOLENÁ LEPIDLA

Vzhledem k charakteristice běžně používaných lepidel pro daný materiál a potřebné vysoko-
pevnostní vlastnosti byla všechna zvolená lepidla typu epoxidových lepidel. Stejná matrice lepidla i kompozitu by navíc měla přispět k lepší pevnosti na tomto rozhraní díky snadnějšímu vzájemnému navazování vazeb molekul stejného druhu [16].

LOCTITE 9514

Loctite 9514 je jednosložkové, teplem vytvrzované lepidlo na epoxidové bázi. Vyniká vysokou pevností ve smyku, přesto je odolné proti rázům i loupání. Vyznačuje se vysokou viskozitou, což znesnadňuje aplikaci [20].



Obr. 20 Vytvrzovací křivky Loctite 9514 [20]

LOCTITE 9466

Výrobek 9466 od výrobce Loctite je dvousložkové epoxidové lepidlo. Po smíchání obou složek je výsledná směs bezbarvá. Viskozita je střední, z vybraných lepidel byla nejnižší, což usnadnilo aplikaci. Udávaná pevnost ve smyku na obroušeném hliníku je 26 MPa. Lepidlo vytvrzuje za pokojové teploty po dobu minimálně 24 h. Proces vytvrzení lze urychlit zvýšenou teplotou dle materiálového listu [20].



LOCTITE 9394 AERO

Toto lepidlo je určeno pro trh USA a bylo vyvinuto pro potřeby leteckého průmyslu. Materiálový list neuvádí pevnost ve stříhu, pouze pevnost v tahu, která činí 46 MPa. Dále je v dokumentu doporučeno vytvrzovat po dobu 3 až 5 dnů [22].

3M DP490

Jedná se o dvousložkové epoxidové lepidlo černé barvy a střední viskozity. Vyznačuje se vysokou pevností při současně dobré houževnatosti a odolnosti. Udávaná pevnost na epoxidu zesíleném uhlíkovými vlákny je 36,1 MPa [23].

4.4.2 PŘÍPRAVA VZORKŮ PRO ZKOUŠKU Č. 3

Vzhledem k problémům s nedostatečným množstvím lepidla na lepené ploše u zkoušky č. 2 byly opět použity doplňovací díry o průměru 2,5 mm.

Kompozitní trubky i hliníkové vložky byly u všech vzorků připraveny stejně. Vnitřní průměr trubky byl broušen smirkovým papírem o zrnitosti 80 zrn/cm², poté očištěny od nečistot a důkladně odmaštěny. Hliníkové vložky nebyly nijak mechanicky opracovány, pouze důkladně odmaštěny.

Na vzorky B1-B3 bylo aplikováno lepidlo Loctite 9514. Po nanesení lepidla byly vzorky vytvrzeny v peci Leteckého ústavu VUT po dobu 80 minut při 150 °C.



Obr. 21 Aplikace Loctite 9514

Lepidlo Loctite 9466 bylo použito na vzorcích B4-B6. Vytvrzování probíhalo po dobu 5 dnů při pokojové teplotě.

Vzorky B7-B9 byly lepeny výrobkem Loctite 9394 Aero. Vytvrzení trvalo 5 dní za pokojové teploty.

Produkt 3M DP 490 byl aplikován na vzorcích B10-B12. Tyto vzorky opět vytvrzovaly 5 dní při pokojové teplotě.



4.4.3 VÝSLEDKY ZKOUŠKY Č. 3

Tabulka 7 Výsledky měření č. 3

Vzorek	Síla při porušení vzorku F_F [N]
B1	45 250
B2	41 936
B3	45 936
B4	23 531
B5	26 963
B6	17 249
B7	24 760
B8	24 492
B9	24 325
B10	24 569
B11	26 750
B12	24 060

4.4.4 ANALÝZA VÝSLEDKŮ

Obdobně jako v předchozích případech, po zkoušce vzorků následovala jejich analýza. U všech vzorků došlo k částečnému zatečení lepidla za drážku pro něj určeno. Ve výpočtu tedy bude uvažována délka lepené plochy $l_{31} = 20$ mm.

Tabulka 8 Podíl mechanismů porušení na ploše spoje u zkoušky č. 3

Vzorek	Adhezivní [%]	Kohezivní [%]	Smíšený [%]
B1	70	0	30
B2	60	0	40
B3	70	0	30
B4	100	0	0
B5	100	0	0
B6	100	0	0
B7	100	0	0
B8	100	0	0
B9	100	0	0
B10	20	70	10
B11	0	50	50
B12	20	30	50

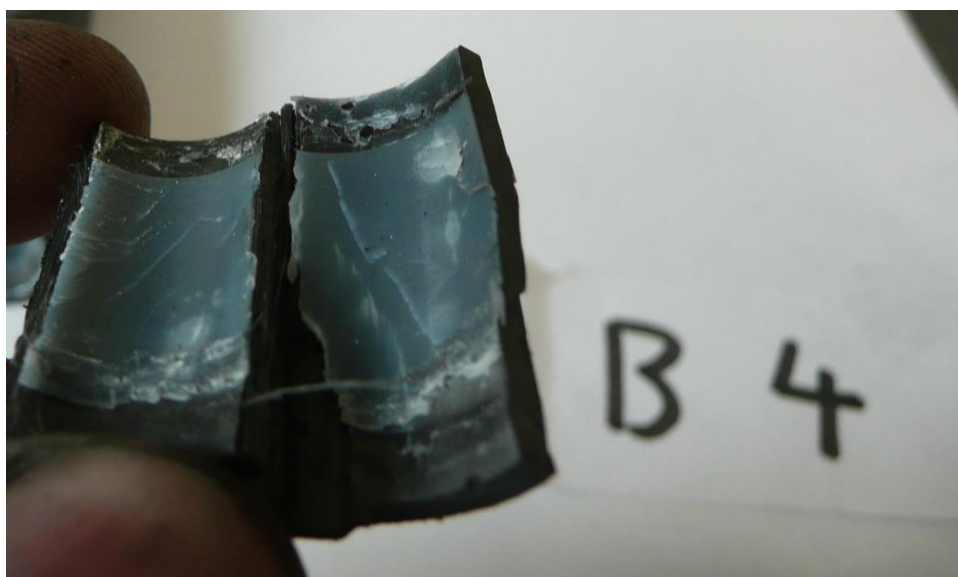


U vzorků B1-B3 došlo k porušení lepeného spoje pouze částečně. Vznikající napětí nedokázala přenést poslední vrstva jednosměrné tkaniny v trubce, která se na všech třech vzorcích oddělila, čímž došlo k porušení vzorku. Ve výpočtové části jsou vzorky lepené lepidlem Loctite 9514 označeny jako parametr č. 6.



Obr. 22 Vytržená vlákna trubky na vzorku B1

Vzorky B4-B6 měly shodně vypadající lepené plochy. Na celé ploše došlo k adhezivní poruše na rozhraní lepidlo-hliník. Toto porušení však vzhledem k vysoké hodnotě působící síly není způsobeno nedokonalým odmaštěním, nýbrž nedostatečnou povrchovou úpravou hliníkové vložky (v tomto případě pouze odmaštění). Úprava povrchu hliníku není předmětem této práce. Dále se jí zabývá Petr Olišar ve své bakalářské práci [12], jak bylo zmíněno již dříve.



Obr. 23 Adhezivní porucha vzorku B4



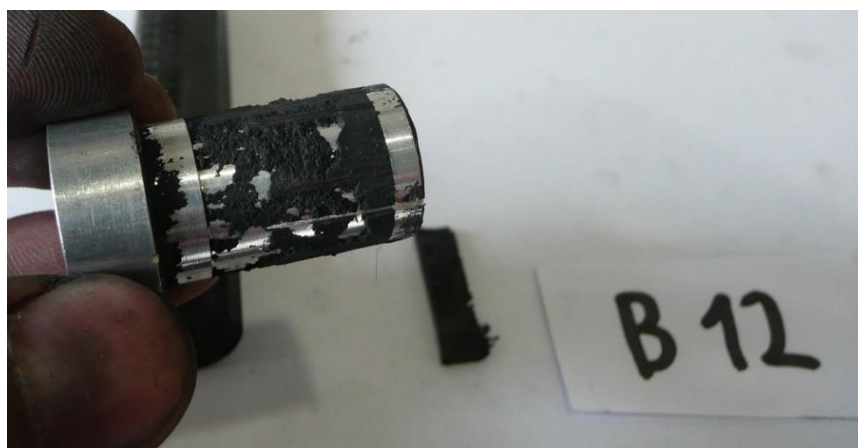
Ve výpočtové části jsou vzorky lepené lepidlem Loctite 9466 označeny jako parametr č. 7. Vzorek B6 vykázal podstatně nižší pevnost než ostatní vzorky. Vzhled lepené plochy však neprokázal žádné selhání. Tento vzorek byl tedy vyřazen z výpočtu středního napětí pro tento parametr.

U vzorků B7-B9 nastala stejná porucha jako u vzorků B4-B6. Lepidlo tedy přes vysoké vypočítané napětí stále nedosahuje své maximální pevnosti. Tyto vzorky jsou ve výpočtové části označeny jako parametr č. 8.



Obr. 24 Lepená plocha vzorku B8

Poslední vzorky označené jako B10-B12 vykazovaly největší podíl kohezivní poruchy z této série. Úprava povrchu hliníku by přesto pravděpodobně vlastnosti ještě zlepšila. Vzorky lepené lepidlem 3M DP490 jsou ve výpočtové části označeny jako parametr č. 9.



Obr. 25 Lepená plocha vzorku B12



VÝPOČET PRŮMĚRNÉ SÍLY A STŘEDNÍHO NAPĚTÍ

Stejným postupem jako u předchozích dvou zkoušek byl stanoven aritmetických průměr sil potřebných pro porušení vzorků daného parametru a následně vypočítáno střední napětí působící na lepené ploše.

Tabulka 9 Výsledky zkoušky č. 3

Parametr č.	F_s [N]	σ_s [MPa]
6	44 374	44,14
7	25 247	25,11
8	24 526	24,40
9	25 126	24,99

4.4.5 VYHODNOCENÍ ZKOUŠKY Č. 3

Lepidlo Loctite 9514 potvrdilo menší náchylnost jednosložkových epoxidových lepidel na úpravu povrchu. Přes porušení kompozitní trubky lze prohlásit toto lepidlo za nejpevnější z vybraných, jelikož jasně předčilo ostatní srovnávaná lepidla. Pevnost tohoto lepidla lze demonstrovat přetrženým šroubem M8 pevnostní třídy 8.8 během testu při síle 30 000 N. Pro dokončení testu musel být šroub nahrazen pevnostní třídou 12.9, který již byl dostatečný.



Obr. 26 Přetržený šroub M8 8.8 při testu vzorku B1

Ostatní lepidla vykazala také velmi dobré výsledky přibližující se pevnostem předepsaných v jejich technických listech. Tento fakt poukazuje na vhodnou úpravu povrchu kompozitní trubky. Pro dosažení ještě lepších hodnot je třeba mechanicky opracovávat také hliníkovou vložku.



5 NÁVRH RAMEN ZAVĚŠENÍ

Jelikož je konstrukce ocelových ramen u týmu TU Brno Racing na takové úrovni, že za pomoci běžně dostupných technologií téměř nemají prostor pro další vylepšování, je potřeba se pro další posun a redukci hmotnosti v oblasti ramen zavěšení poohlédnout po změně materiálu, ze kterého jsou zhotovena.

Vzhledem k finanční nákladnosti, technologické náročnosti a nedostatku zkušeností pro zhotovení ramen v celokompozitní variantě, bylo přistoupeno k použití CRFP trubek s vlepenými vložkami.

5.1 VOLBA POUŽITÉ TRUBKY

Bylo přistoupeno k nákupu kompozitních trubek od dodavatele namísto jejich vlastní výroby z důvodu časové náročnosti a možné nestálé kvality ručně vyráběných trubek.

Jako dodavatel trubek byla zvolena německá společnost Carbon Composites. Trubky od stejného dodavatele byly použity při zkouškách v kapitole 4.

Tabulka 10 Mechanické vlastnosti kompozitní trubky firmy Carbon Composites [24]

R_{mTR}	1 800 MPa
E_{tTR}	135 GPa
R_{mcTR}	1 350 MPa
R_{mbTR}	1 650 MPa
E_{bTR}	110 GPa
ρ_{TR}	1 550 kg·m ⁻³

kde

R_{mTR}	[MPa]	mez pevnosti kompozitní trubky v tahu,
E_{tTR}	[GPa]	Youngův modul pružnosti kompozitní trubky v tahu,
R_{mcTR}	[MPa]	mez pevnosti kompozitní trubky v tlaku,
R_{mbTR}	[MPa]	mez pevnosti kompozitní trubky v ohybu,
E_{bTR}	[GPa]	modul pružnosti kompozitní trubky v ohybu,
ρ_{TR}	[kg·m ⁻³]	hustota kompozitní trubky.

5.1.1 VÝPOČET VHODNÉ TRUBKY

Na základě tenzometrického měření sil v zavěšení provedeného na voze Dragon 4 Gabrielem Stariakem, při uvažování vyšších sil na novějším voze byla zvolena návrhová síla působící v zavěšení na $F_A = 1\,500\text{ N}$.

Vzhledem k rozměrům byla pro výpočet zvolena trubka s vnějším průměrem $D_l = 16\text{ mm}$ a vnitřním průměrem $d_l = 14\text{ mm}$. Vzhledem k převládajícímu zatěžování trubky v režimu tah-tlak byla volba následně ověřena výpočtem odvozeným ze vztahu (2) do výsledného tvaru



$$F_{maxTR} = R_{mTR} \pi \frac{D_1^2 - d_1^2}{4} \quad (4)$$

kde

F_{maxTR} [N] maximální síla v kompozitní trubce při namáhání tahem,
 D_1 [mm] vnější průměr trubky.
 tedy

$$F_{maxTR} = 84\,823 \text{ N}$$

Bezpečnost vůči meznímu stavu pevnosti je tedy podle vztahu z publikace [18]

$$k_{MSP} = \frac{F_{maxTR}}{F_A} \quad (5)$$

kde

k_{MSP} [-] bezpečnost vůči meznímu stavu pevnosti,
 F_A [N] návrhová síla působící v zavěšení.
 tedy

$$k_{MSP} = 56,55$$

Přes tuto vysokou hodnotu je třeba brát v úvahu, že nejkritičtějším režimem zatěžování bude v tomto případě tlak, respektive borcení trubky. Je tedy třeba kontrolovat také bezpečnost vůči meznímu stavu vzpěrné stability podle vzorce převzatého z [18]. S využitím konzervativního přístupu budeme uvažovat horší z modelů vedení trubky a to volný konec na jedné straně a vetknutí na straně druhé.

$$F_{kr} = \frac{\pi^2 EJ}{L^2} \quad (6)$$

kde

F_{kr} [N] kritická tlaková síla,
 E [GPa] Youngův modul pružnosti,
 J [mm⁴] kvadratický moment průřezu,
 L [mm] redukovaná délka.

Rovnici (6) dále odvodíme podle [18] do tvaru

$$F_{kr} = \frac{\pi^2 E_{bTR} \pi \frac{(D_1^4 - d_1^4)}{64}}{(0,7l_{max})^2} \quad (7)$$



kde

l_{max} [mm] Maximální délka trubky použitá na voze Dragon 6

Nejdelší trubka použitá na voze Dragon 6 má délku $l_{max} = 700$ mm.

Výsledná kritická síla tedy činí

$$F_{kr} = 6\,019 \text{ N}$$

Bezpečnost vůči meznímu stavu vzpěrné stability tedy činí podle rovnice převzaté z [18]

$$k_{MSVS} = \frac{F_{kr}}{F_A} \quad (8)$$

kde

k_{MSVS} [-] bezpečnost vůči meznímu stavu vzpěrné stability.

Bezpečnost vůči meznímu stavu vzpěrné stability je tedy

$$k_{MSVS} = 4,01$$

Tato hodnota je vzhledem k charakteru materiálu CFRP adekvátní.

5.2 VÝPOČET DÉLKY LEPENÉ PLOCHY

Při výpočtu potřebné délky lepené plochy lze opět vyjít ze vztahu (2) rozšířeného o obsah plochy válce (3). Neznámou tentokrát bude představovat zmiňovaná délka lepené plochy l . Dle doporučení z podkapitoly 3.1.1 „Návrh lepené plochy“ budeme uvažovat zatížení lepeného spoje na 5 % jeho pevnosti. V této úvaze již je zahrnuta návrhová bezpečnost. Vypočítaná lepená plocha tedy bude konečnou délkou lepené plochy. Odvozený vztah je tedy ve tvaru

$$l_{LS} = \frac{F_A}{0,05\pi d_1 \sigma_L} \quad (9)$$

kde

l_{LS} [mm] výsledná délka navrhovaného lepeného spoje,

σ_L [MPa] dosahovaná pevnost lepeného spoje.

Uvažované lepidlo použité na tuto aplikaci je Loctite 9514. Za proměnnou σ_L bude dosazena hodnota zjištěná při testování vzorků, na kterých bylo aplikováno, tedy $\sigma_L = 44$ MPa.



Výsledná délka navrhovaného lepeného spoje je tedy

$$l_{LS} = 15,5 \text{ mm} \approx 16 \text{ mm}$$

5.3 NÁVRH RAMEN ZAVĚŠNÍ KOL S VLEPENÝMI ÚCHYTY KLOUBŮ

Díky parametrům stanoveným v předchozích podkapitolách bylo možné přistoupit k samotnému návrhu ramen zavěšení. Návrh vycházel z kinematických bodů, které navrhl David Zubíček. Za základě těchto bodů byl proveden návrh ramen zavěšení pro vozidlo Dragon 6.



Obr. 27 Navržená sestava ramen zavěšení s vlepenými úchyty kloubů

Uvažovaným materiálem pro úchyty kloubů je hliníková slitina s označením EN AW 7075.T6. Vzhledem k horším mechanickým vlastnostem oproti aktuálně používané vysokolegované oceli 25CrMo4 musela být konstrukce rozměrově posílena.



Obr. 28 Navržené přední horní rameno zavěšení



V návrhu bylo dále uvažováno stejné příslušenství jako pro ocelovou variantu ramen zavěšení vozidla Dragon 6. Vložky pro ložiska jsou tedy navrhovány na stejná ložiska. Zároveň je návrh koncipován tak, aby ramena šla připevnit do již existujících držáků na vozidle.



Obr. 29 Úchyt kloubu zadního horního ramena zavěšení



Obrázek 31 Úchyt ramen zavěšení na upevnění do rámu vozu



ZÁVĚR

Byl dokázán výrazný vliv přípravy povrchu pro lepení na celkovou pevnost spoje.

Na základě provedených zkoušek byl stanoven postup přípravy povrchu kompozitní trubky pro adhezivní spojení s hliníkovou vložkou. Zkoumané vzorky se navíc vyznačovaly vysokou mírou opakovatelnosti výsledků, což potvrzuje vhodnost stanovených úprav.

Stanoveným postupem bylo s použitím lepidla Loctite 9514 dosaženo pevnosti ve smyku $\sigma_S = 44$ MPa. Díky tomu, lze prohlásit stanovenou metodu provádění lepeného spoje za vhodnou k použití na navěšení vozu kategorie Formula Student. Toto tvrzení je podloženo výpočtem navrhovaného lepeného spoje pro zvolenou aplikaci.

Dále je třeba poukázat na důležitost přípravy povrchu také u druhého substrátu, v tomto případě hliníkové vložky. Tento faktor nebyl předmětem zkoumání této bakalářské práce.

Pro ověření bezpečnosti při cyklickém namáhání navrženého lepeného spoje je třeba důrazně doporučit únavovou zkoušku, popřípadě rázovou zkoušku daného spoje.

V další části práce byla navržena ramena zavěšení pro vůz Formula Student. Jelikož MKP analýza vzhledem k charakteru práce nebyla provedena, před nasazením do provozu by na tento fakt měl být brán zřetel.

Budoucí zájem v této oblasti by se měl ubírat cestou prověření bezpečnosti lepeného spoje únavovou zkouškou a validace dosažených výsledků například zkouškami zvoleného lepidla při různých teplotách vytvrzení.



POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] VLK, František. *Podvozky motorových vozidel*. 3. přeprac., rozš., aktualiz. vyd. Brno: Prof.Ing.František Vlk, DrSc, 2006. ISBN 802396464X.
- [2] EHRENSTEIN, Gottfried W. *Polymerní kompozitní materiály*. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009. ISBN 9788086960296.
- [3] Uhlíkové vlákno. *Kordcarbon* [online]. [cit. 2016-03-08]. Dostupné z: http://www.kordcarbon.cz/uhlikove_vlakno
- [4] Carbon Fiber. *Zoltek* [online]. [cit. 2016-03.08]. Dostupné z: <http://zoltek.com/carbonfiber/>
- [5] Development of the LFA supercar. *Lexus* [online]. [cit. 2016-04-01]. Dostupné z: <http://www.lexus-int.com/models/LFA/development-of-the-lfa-supercar.html>
- [6] CLARKE, Pat. Pat's Corner - Back to Basics. *Formula student germany* [online]. [cit. 2016-03-26]. Dostupné z: <https://www.formulastudent.de/academy/pats-corner/advice-details/article/pats-corner-back-to-basics/>
- [7] ŠTIPÁK, Patrik. *Suspension Development od Formula Student Vehicle*. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 147 s. Diplomová práce. Vedoucí práce doc. Ing. Petr Porteš, Dr..
- [8] LEES, W. A. *Adhesives in Engineering Design*. 1. vydání. Berlín: Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH, 1984. ISBN 978-3-662-11032-4 (eBook)
- [9] Hysol Surface Preparation Guide. *Loctite* [online]. [cit. 2016-03-08]. Dostupné z: http://www.loctite.ph/php/content_data/LT4536_TT_Aerospace_Surface_Preparation_Guide.pdf
- [10] Science of adhesion. *Adhesives.org* [online]. [cit. 2016-04-08]. Dostupné z: <http://www.adhesives.org/adhesives-sealants/science-of-adhesion>
- [11] 2016 Formula SAE Rules. *SAE International* [online]. [cit. 2016-04-02]. Dostupné z: http://www.fsaeonline.com/content/2016_FSAE_Rules.pdf
- [12] OLÍŠAR, P. *Návrh spojovacích tyčí zavěšení kol z kompozitních materiálů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. Vedoucí bakalářské práce Ing. Pavel Ramík.
- [13] The Suspension Bible. *CarBibles.com* [online]. [cit. 2016-04-02]. Dostupné z: http://www.carbibles.com/suspension_bible.html
- [14] DRC (Dynamic Rolling Control). *Autolexicon.net* [online]. [cit. 2016-04-20]. Dostupné z: <http://www.autolexicon.net/cs/articles/drc-dynamic-rolling-control/>



- [15] ARENAS, José M., Cristina ALÍA, Julián J. NARBÓN, Rosa OCAÑA a Cristina GONZÁLEZ. Considerations for the industrial application of structural adhesive joints in the aluminium–composite material bonding. *Composites Part B* [online]. Elsevier Ltd, 1301, 44(1), 417-423 [cit. 2016-05-26]. ISSN 1359-8368.
- [16] KINLOCH, A. J. *Adhesion and adhesives: science and technology*. 1. vyd. Chapman and Hall, 1987. ISBN 978-94-015-7764-9 (eBook)
- [17] Loctite 262. *Loctite* [online]. [cit. 2016-04-01]. Dostupné z: http://www.loctite.cz/Loctite-6700.htm?nodeid=8802623029249&mstdsLanguage=CS_CZ&selectedTab=technical
- [18] SHIGLEY, Joseph Edward, Charles R. MISCHKE, Richard G. BUDYNAS, Martin HARTL a Miloš VLK. *Konstruování strojních součástí*. Brno: VUTIUUM, 2010, 1159 s. : il. ISBN 978-80-214-2629-0.
- [19] ČSN EN 1465 (668510). *Česká technická norma* [online]. [cit. 2016-03-21]. Dostupné z: <http://nahledy.normy.biz/n.php?i=84221>
- [20] Technical Data Sheet LOCTITE EA 9514. *Loctite* [online]. [cit. 2016-03-21]. Dostupné z: <http://tds.henkel.com/tds5/Studio/ShowPDF?pid=EA%209514&format=MTR&subformat=HYSL&language=CS&plant=WERCS>
- [21] Technický list LOCTITE EA 9466. *Loctite* [online]. [cit. 2016-03-21]. Dostupné z: <http://tds.henkel.com/tds5/Studio/ShowPDF?pid=EA%209466&format=MTR&subformat=REPR&language=CS&plant=WERCS>
- [22] Technical Process Bulletin LOCTITE EA 9394 AERO. *Loctite* [online]. [cit. 2016-03-21]. Dostupné z: [https://tds.us.henkel.com/NA/UT/HNAUTTDS.nsf/web/B02C099805BD377385257BC60067B0E3/\\$File/LOCTITE%20EA%209394%20AERO-EN.pdf](https://tds.us.henkel.com/NA/UT/HNAUTTDS.nsf/web/B02C099805BD377385257BC60067B0E3/$File/LOCTITE%20EA%209394%20AERO-EN.pdf)
- [23] Scotch-Weld Lepidlo EPX DP490. *AZK Trade s.r.o* [online]. [cit. 2016-03-21]. Dostupné z: <http://www.azktrade.cz/publicdoc/dp-490.pdf>
- [24] Carbon tubes. *Carbon-composite technology* [online]. [cit. 2016-03-21]. Dostupné z: <http://www.online-shop.carbon-composite.com/index.php?cat=KAT11-10103&lang=ENG>
- [25] SAJDL, Jan. Zavěšení kol. *Autolexicon.net* [online]. [cit. 2016-04-02]. Dostupné z: <http://www.autolexicon.net/cs/articles/zaveseni-kol/>
- [26] HexPly Prepreg Technology. *Hexcel* [online]. [cit. 2016-04-02]. Dostupné z: http://www.hexcel.com/Resources/DataSheets/Brochure-Data-Sheets/Prepreg_Technology.pdf



SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

F_{maxTR}	[N]	maximální síla v kompozitní trubce při namáhání tahem
k_{MSP}	[-]	bezpečnost vůči meznímu stavu pevnosti
k_{MSVS}	[-]	bezpečnost vůči meznímu stavu vzpěrné stability
l_{LS}	[mm]	výsledná délka navrhovaného lepeného spoje
σ_L	[MPa]	dosahovaná pevnost lepeného spoje
CFRP		polymer vyztužený uhlíkovými vlákny
D_1	[mm]	vnější průměr trubky
E	[GPa]	Youngův modul pružnosti
E_{bTR}	[GPa]	modul pružnosti kompozitní trubky v ohybu modul pružnosti v tahu vlákna při rovnoběžném zatěžování ve směru osy
E_{IIIf}	[GPa]	
E_m	[GPa]	modul pružnosti matrice v tahu
E_{tTR}	[GPa]	Youngův modul pružnosti kompozitní trubky v tahu
F_A	[N]	návrhová síla působící v zavěšení
F_{kr}	[N]	kritická tlaková síla
F_{max}	[N]	nejvyšší naměřená síla
J	[mm ⁴]	kvadratický moment průřezu
L	[mm]	redukovaná délka
l_{max}	[mm]	maximální délka trubky použitá na voze Dragon 6
R_{mbTR}	[MPa]	mez pevnosti kompozitní trubky v ohybu
R_{mcTR}	[MPa]	mez pevnosti kompozitní trubky v tlaku
R_{mTR}	[MPa]	mez pevnosti kompozitní trubky v tahu
S	[mm ²]	obsah lepené plochy
ρ_f	[g·cm ⁻³]	hustota vláken
ρ_{TR}	[kg·m ⁻³]	hustota kompozitní trubky pevnost vlákna v tahu při rovnoběžném zatěžování ve směru jeho osy
σ_{PtIIIf}	[MPa]	
σ_{Ptm}	[MPa]	pevnost v tahu matrice
σ_s	[MPa]	střední napětí v lepené ploše