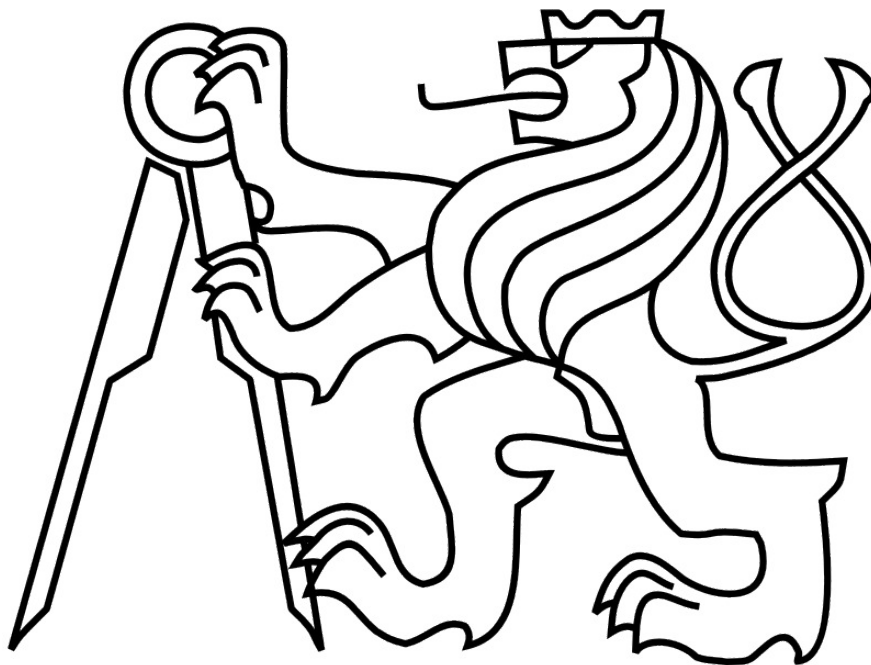


# České vysoké učení technické v Praze

Fakulta strojní

Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel



## Bakalářská Práce

*Rešerše provedení lepeného spoje*

*Development of bonded joint*



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE  
Fakulta strojní, Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel  
Technická 4, 166 07 Praha 6  
Akademický rok: 2013/2014

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

pro: Jan Snížek

program: Teoretický základ strojního inženýrství

obor: bez oboru

název česky: Rešerše provedení lepeného spoje

název anglicky: Development of bonded joint

Zásady pro vypracování:

1. Provedte rešerši provedení lepeného spoje mezi karbonovou trubkou a hliníkovým insertem.
2. Lepený spoj bude použit při návrhu ramen náprav vozu Formule Student
3. Připravte metodiku pro provedení lepeného spoje

Rozsah průvodní zprávy: 20 stran

Rozsah grafických prací:

Seznam doporučené literatury:

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Nikita Astraverkhau

Konzultant bakalářské práce:

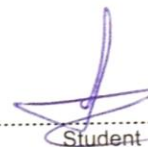
Datum zadání bakalářské práce: 2. května 2014

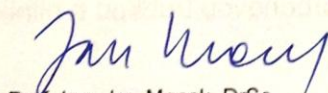
Datum odevzdání bakalářské práce: 20. června 2014

Neodevzdá-li student bakalářskou nebo diplomovou práci v určeném termínu, tuto skutečnost předem písemně zdůvodnil a omluva byla děkanem uznána, stanoví děkan studentovi náhradní termín odevzdání bakalářské nebo diplomové práce. Pokud se však student řádně neomluvil nebo omluva nebyla děkanem uznána, může si student zapsat bakalářskou nebo diplomovou práci podruhé.

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

Zadání bakalářské práce převzal dne: 5.5. 2014

  
Student

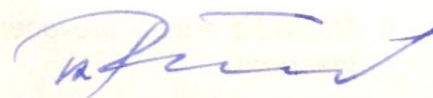


Prof. Ing. Jan Macek, DrSc.

Vedoucí ústavu



L.S.



Prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.

Děkan fakulty

V Praze dne 25. dubna 2014

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady uvedené v závěru práce.

V Praze dne: 15.6.2014

Jan Snížek

## Poděkování

Zde bych rád poděkoval Ústavu automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel a týmu CTU CarTech za projevenou důvěru a možnost uskutečnění tohoto výzkumu.

Obzvláště děkuji vedoucímu práce Ing.Nikitovi Astraverkhau, za poskytnutí této příležitosti. Dále Ing.Karlovi Barákovi a Ing.Jaromírovi Kučerovi za pomoc a konzultace při vývoji technologie a následných zkouškách.

Anotace

Název práce:	Rešerše provedení lepeného spoje
Autor:	Jan Snížek
Vedoucí práce:	Ing. Nikita Astraverkhau
Akademický rok:	2013/2014
Ústav:	Ú 12120 – ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel
Rozsah:	25 stran 19 tabulek 18 obrázků 4 Grafy CD s přílohami
Anotace:	Cílem této práce bylo vyvinout technologii a postup lepení duralových koncovek do uhlíkových trubek. Práce zahrnuje postupné odhalování problémů a jejich následné řešení, tahové zkoušky jednotlivých vzorků pro zjištění výsledků jednotlivých úprav v technologii a ověření opakovatelnosti.
Klíčová slova:	Uhlíkové trubky, lepené spoje, injektáž, tahová zkouška

Annotation

Title:	Development of bonded joint
Author:	Jan Snížek
Supervisor:	Ing. Nikita Astraverkhau
Akademic year:	2013/2014
Department:	Ú 12120 – Department of Automobiles, Internal combustion engines and Railway vehicles
Size:	25 pages 19 tables 18 pictures 4 Graphs CD containing annexes
Annotation:	The aim of this study was to develop technologies and practices gluing aluminum alloy end caps in carbon tubes. The study involves the sequential detection of problems and their subsequent solutions, tensile testing of individual samples to determine the results of individual modifications in technology and verify repeatability.
Key words:	Carbon Tubes, bonded joint, injection, tensile testing

## Obsah

1. Úvod .....	1
2. Využití Uhlíkových trubek na voze FS.06 .....	1
3. Nedostatečná pevnost v sezóně 2013 .....	3
3.1 Technologie lepení v sezóně 2013 .....	4
3.2 Zatěžovací zkouška .....	5
3.3 Závěr zkoušky .....	6
4. První zkouška .....	7
4.1 Příprava zkušebních vzorků .....	7
4.2 Injektáž .....	8
4.3 Průběh zkoušky .....	9
4.4 Vyhodnocení zkoušky vzorků typu A .....	10
5. Úprava povrchu trubek a insertů .....	11
6. Zkouška - Typ B .....	12
6.1 Průběh zkoušky .....	13
6.2 Vyhodnocení zkoušky .....	15
6.3 Výpočet smykového napětí v lepeném spoji .....	16
7. Dimenzování velikosti lepeného spoje .....	16
8. Zkouška - Typ C .....	17
8.1 Průběh zkoušky .....	17
8.2 Vyhodnocení zkoušky .....	18
9. Zkouška - Typ D .....	18
9.1 Průběh zkoušky .....	18
9.2 Vyhodnocení zkoušky .....	19
10. Opakovatelnost .....	19
11. Zkouška - Typ E .....	20
11.1. Průběh zkoušky .....	20
11.2 Vyhodnocení zkoušky .....	20
12. Metodika .....	21
13. Použití lepeného spoje na voze FS.06 .....	23
14. Závěr .....	24
15. Použitá literatura .....	25
16. Seznam příloh .....	25



## 1. Úvod

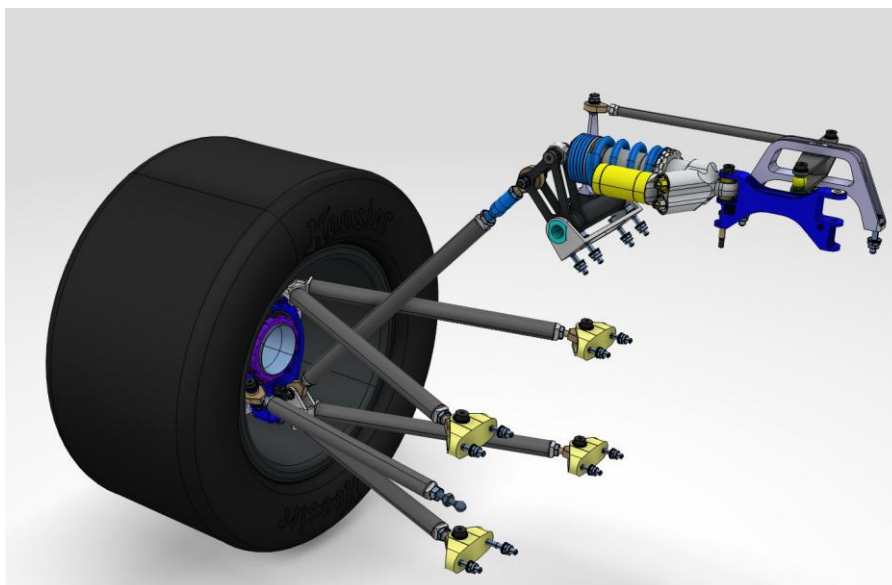
Cílem této práce je vyvinout a zdokonalit technologii lepení koncovek do uhlíkových trubek, které budou použity na studentské formuli týmu CTU CarTech v sezóně 2013/2014, jako prvky zavěšení předních, zadních kol a v řízení.

Požadavkem bylo zjistit příčinu nedostatečné pevnosti u prvních vzorků testovaných v sezóně 2013, najít řešení a postup lepení tak, abych mohl zaručit pevnost spoje v osovém zatížení s určitou bezpečností v takovém rozsahu, ve kterém je spoj zatěžován během závodů.

V této práci budu popisovat jednotlivé kroky, které jsem učinil na základě výsledků z jednotlivých tahových zkoušek a následného rozboru porušení spoje.

## 2. Využití Uhlíkových trubek na voze FS.06

V dnešní době jsou kladeny vysoké požadavky na co největší výkon, tuhost a zároveň nejmenší možnou celkovou hmotnost závodního speciálu. Celé vozidlo je tedy složeno z kompromisů mezi pevností a hmotností jednotlivých součástí. Proto je nahrazení ocelových trubek kompozitovými trubkami důležitým krokem k získání nižší hmotnosti v řádech stovek gramů. Kompozitové materiály jsou používány i na většině dalších částech vozu např.: monokok, přitlačná křídla, volant, sedačka jezdce, palivová nádrž nebo disky kol.



Obrázek 1 - Zavěšení předního kola

Zavěšení předních a zadních kol je potenciálně oblast konstrukce, kde kompletní nahrazení dřívějších ocelových ramen uhlíkovými trubkami, bez snížení pevnosti a tuhosti soustavy, přinese úsporu hmotnosti.

Pro objektivní navržení velikosti lepeného spoje je potřeba stanovit jednotlivé hodnoty namáhání a mezní zatížení, které je na nápravu vyvinuto. U zadní hnané nápravy jsme použili tyto součinitele:

- jízda zatáčkou ustáleného poloměru na mezi adheze 1,6g
- brzdění na mezi adheze 1,5g
- přímá akcelerace 1g

Tyto hodnoty použitých násobků zrychlení v jednotlivých směrech odpovídají prakticky změřeným dosažitelným maximům u vozů kategorie FSAE za ideálních podmínek. Tyto stavy nelze kombinovat, protože síly působící od pneumatiky jsou vždy omezené eliptickým tvarem adheze, síly mezi nápravami a zatížení se pohybují mezi těmito mezními hodnotami. Při kombinaci těchto součinitelů by výsledek odpovídal nereálným hodnotám.

Při uvažování dynamických přetížení a únavy u navrhovaných částí nápravy byla použita metoda statických násobků, které se používají při návrhu motorových vozidel. Výsledné hodnoty byly převzaty z výpočtu silových účinků a MKP analýzy zatížení těhlic na zadní nápravě vozu FS.

Statický násobek	Hodnota
Směr X	2,0
Směr Y	2,0
Směr Z	3,0
Brzdný moment	1,5

Tabulka 1 - statické násobky

Jako vstupní hodnoty pro MKP analýzu kolové skupiny a těhlic byly použity hodnoty vypočítané ve dvou rovinách, radiální a axiální pro všechny výchozí situace, ze známých parametrů vozu.

	Statické zatížení	Hodnota se statickým násobkem
<b>Zatáčka 1,6g - vnější kolo</b>		
<b>X [N]</b>	0	0
<b>Y [N]</b>	2716	5430
<b>Z [N]</b>	1810	5432
<b>Vratný moment [Nm]</b>	--	40
<b>Zatáčka 1,6g - vnitřní kolo</b>		
<b>X [N]</b>	0	0
<b>Y [N]</b>	198	396
<b>Z [N]</b>	132	264
<b>Brzdění 1,5g</b>		
<b>X [N]</b>	-429	-858
<b>Y [N]</b>	0	0
<b>Z [N]</b>	643	1929
<b>Brzdný moment X [Nm]</b>	166	249
<b>Zrychlení 1g</b>		
<b>X [N]</b>	1765	3530
<b>Y [N]</b>	0	0
<b>Z [N]</b>	1333	3999

Tabulka 2 - zatížení

Z těchto sil byly určeny reakční síly v přípojných bodech do zbytku nápravy za pomoci programu LSA. Pro přehlednost jsou uvedeny pouze maximální zatížení jednotlivých prvků pro všechny výchozí situace.

	Zatáčka 1,6g [N]	Brzdění 1,5g [N]	Zrychlení 1g [N]	Maximum s násobkem [N]
Dolní rameno - přední uchycení	+602	+1362	-2424	-4848
Dolní rameno zadní u.	-1720	-701	+2559	<b>+5118</b>
Dolní rameno - výslednice těhlice	<b>+1830</b>	+1319	+725	+3660
Horní rameno - přední u.	-232	-419	<b>+631</b>	+1262
Horní rameno - zadní u.	<b>+1874</b>	+284	-1011	+3748
Horní rameno - výslednice těhlice	<b>+1865</b>	+580	+1085	+3730
Spojovací tyč	<b>-1624</b>	-97	+686	-3248
Tlačná tyč	<b>-1989</b>	-713	-1382	-5967
Vahadlo - přední u.	<b>+846</b>	+346	+616	+2538
Vahadlo - zadní u.	<b>+980</b>	+382	+704	+2940

Tabulka 3 - Zatížení prvků nápravy

Maximální zatížení na prvky uchycení se vyskytuje na zadním uchycení dolního ramene zavěšení. Z důvodu možnosti výskytu dalšího namáhání, které nebylo uvažováno při výpočtu ( náraz, smyk, dopad při nadskočení vozidla ) je nutné pojistit dané hodnoty určitou bezpečností  $k > 5$ .

### 3.Nedostatečná pevnost v sezóně 2013

Konstrukční návrh, který počítal s využitím uhlíkových trubek na monopostu studentské formule vznikl již na modelu FS.03, na kterém byly společně s ocelovými trubkami použity i uhlíkové trubky jako některé prvky v soustavě zavěšení zadních i předních kol. Následně se tyto prvky využily i na vozu FS.04.

Nahrazení ocelových ramen přineslo snížení hmotnosti a vylepšilo koncept konstrukčního řešení vozu, který je při soutěži Formula Student jedním z hlavních faktorů při rozdělování bodů v kategorii engineering design report.

Při přípravách a vývoji vozu FS.05 na sezónu 2013 se poprvé objevili problémy při technologii výroby. Kvůli neexistenci technologického postupu lepení nedosáhly lepené spoje požadované pevnosti. Z důvodu nedostatku času a lidí potřebných na výzkum bylo od varianty s uhlíkovými prvky odstoupeno.



Obrázek 2 - Zavěšení zadního kola

### 3.1 Technologie lepení v sezóně 2013

Při výrobě těchto ramen bylo použito lepidlo Gurit Spabond 345. Dvousložkové epoxidové teplem vytvrditelné lepidlo míchané v objemovém poměru 100:50. Lepidlo se vyrábí ve 3 typech v závislosti na rychlosti tužidla ( rychlé, pomalé, extra pomalé ) a lze jej vytvrdit ve 3 různých časových a teplotních intervalech. Každý interval vykazuje jiné hodnoty pevnosti ve smyku ale především veliké rozdíly v časové náročnosti.

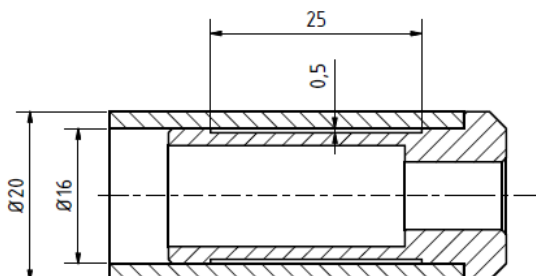
	Pokožová teplota ( 28dní/21°C )			24hodin při 21°C + 16hodin při 50°C			5hodin při 70°C		
	rychlé	pomalé	extra pomalé	rychlé	pomalé	extra pomalé	rychlé	pomalé	extra pomalé
<b>Hustota [g/cm<sup>3</sup>]</b>	-	-	-	-	-	-	1,18	1,166	1,129
<b>Lineární stažení [%]</b>	-	-	-	-	-	-	1,15	1,121	1,057
<b>Pevnost ve smyku na oceli [MPa]</b>	36,6	37,8	29,2	37,3	39,3	37,2	41,5	40,2	35,6

Tabulka 4 - Vytvrzování

Dle materiálového listu a použitého typu lepidla bylo zvoleno vytvrzování v peci při 70°C po dobu 5 hodin což odpovídá pevnosti ve smyku při použití na oceli 40,2MPa.

Lepidlo bylo nanášeno přímo na inserty, které byly následně zasunuty do trubek s lehce zdrsňným povrchem pomocí brusného papíru. Povrch lepené plochy byl odmaštěn.

Po zalepení insertů neproběhla žádná kontrola množství lepidla nebo kvality vyplnění prostoru pro lepenou plochu.



Obrázek 3 - Schéma insertu

### 3.2 Zatěžovací zkouška

Zatěžovací zkoušky všech měřených vzorků byly prováděny v laboratořích ústavu letectví ČVUT v Praze na Karlově náměstí na stroji Inova ZUZ 200 za použití měřícího integrovaného snímače PS100, výrobce Rukov Rumburk, jmenovitý rozsah 100kN.



Obrázek 4 - Inova ZUZ 200

Při měření ramen ze sezony 2013 bylo dosaženo nerovnoměrných výsledků v rozsahu 0-8,25kN. Tyto hodnoty a celkový neúspěch zkoušky byl očekávaný.

Číslo vzorku	Zatěžovací síla [kN]	Odchylka od průměru [kN]	poznámka
RR1RR	5,18	1,73	
RR2RR	0,00	-3,45	Vytažen rukou
RR3RR	8,25	4,80	lepená plocha minimalní
LL1LL	0,00	-3,45	neodmaštěné
LL2LL	4,85	1,40	lepená plocha minimalní
Tlačná tyč 1	2,4	-1,05	
Tlačná tyč 2	5,91	2,47	

Tabulka 5 - součásti pro sezonu 2013

Průměr: 16mm

Délka insertu: 25mm

Průměrná zatěžovací síla: 3,45kN

### 3.3 Závěr zkoušky

Jelikož z naměřených hodnot nebylo možné vyvodit žádné závěry, které by pomohli při dalším výzkumu zaměřil jsem se především na vizuální stránku. Při podrobném zkoumání, jsem zjistil že lepidlo nebylo dostatečně nanášeno - malá vrstva, tudíž vůbec nepřišlo do kontaktu s povrchem trubky a lepená plocha tím pádem byla minimální až žádná jak je patrné z obrázku.



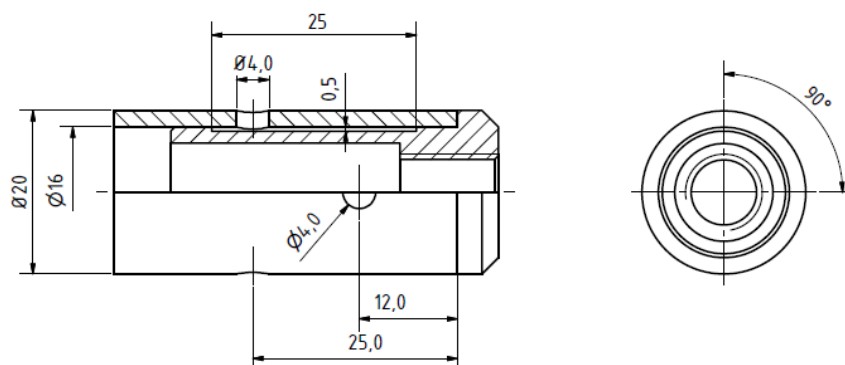
Obrázek 5 - Špatná lepená plocha

Dalším krokem tedy bylo zajistit úplné vyplnění prostoru pro lepidlo mezi středícím osazením na konci a pod hlavou insertu. Pro opravdu celistvou vrstvou bylo nutné zajistit, aby se lepidlo dostalo přímo na své místo po celé délce a nestíralo se při lepení o okraj trubky a co nejvíce omezit chybu rovnoměrnosti nanášení lepidla člověkem. Tento problém jsem vyřešil metodou injektáže přímo na místo určené pro lepidlo skrz navrtané otvory v trubce.

## 4. První zkouška

Pro první zkoušku jsem zvolil stejnou velikost trubek (20x2) a insertů jako u předešlých nepovedených ramen (průměr: 16mm; délka insertu: 25mm)

Tentokrát bylo lepidlo přiváděno na místo pomocí již zmiňované injektaže standardní stříkačkou skrz 4 otvory  $d=4,2\text{mm}$  pootočených o  $90^\circ$  vůči sobě. Inserty byly na povrchu velice zdrsňené soustružnickým nožem.



Obrázek 6 - Schéma rozložení otvorů

### 4.1 Příprava zkušebních vzorků

Po konzultaci s profesory z fakulty letectví a kosmonautiky, kteří mi s celým výzkumem pomáhali, jsme stanovili kontrolní počet zkušebních vzorků pro každý pokus na 6ks. To by mělo odhalit případné chyby a zároveň je tento počet dostačující pro ověření správnosti provedení lepeného spoje danou metodou.

Námi používané trubky vyráběné metodou pultruzního tažení od Německé firmy Carbon-Composite Technology, která nabízí trubky různých průměrů a tloušťek stěn a mnoho dalších výrobků z kompozitů. Vnitřní skladba této trubky je  $0^\circ$  (roving) ve směru vláken (paralelní osy) a vnější vrstva je hladká tkanina  $0/90^\circ$  ve směru vláken. Tento poměr je asi 80% roving a 20% tkanina. Parametry této trubky jsou následující:

Pevnost v tahu	1800 MPa
Modul pružnosti v tahu	$\sim 135$ GPa
Pevnost v tlaku	1350 MPa
Pevnost v ohybu	1650 MPa
Modul pružnosti v ohybu	$\sim 110$ GPa
Hustota	$1,55 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$

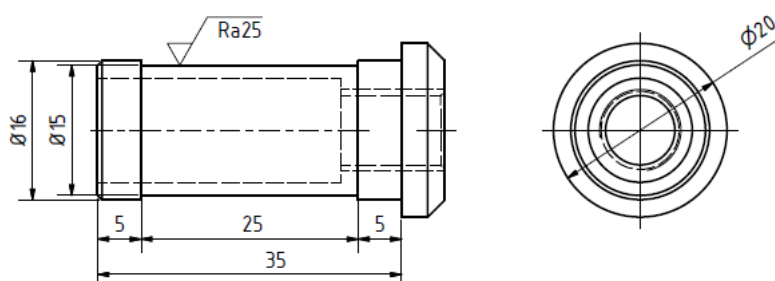
Tabulka 6 - Mechanické vlastnosti trubek

Trubky jsem nařezal na přibližnou délku 100mm, zabrousil konce do roviny pod úhlem  $90^\circ$  aby dokonale dosedaly na okraj insertu po celém obvodu a navrtal 4 díry pro injektaž ve 2 různých vzdálenostech od kraje, kvůli menšímu zeslabení průřezu trubky v kritických místech a pootočených o  $90^\circ$  viz. *obrázek 6*. Při navrtávání vznikají uvnitř trubky velké otřepy, takže vnitřek trubky musí být očištěn brusným papírem, případně pilníkem.

Inserty z duralu o délce 35mm, počítáno včetně osazení 2x5mm na koncích insertů kvůli zaručení souososti, byly na lepené ploše (25mm) hrubě rovnoměrně zdrsňeny soustružnickým nožem. Obě součásti se řádně odmastily acetonem.



Obrázek 7 - Zdrsnění povrchu soustružnickým nožem



Obrázek 8 - Výkres insertů

Zkušební vzorky byly před zkouškou označeny pořadovým číslem a písmenem, označující typ úpravy trubek a insertů a jejich rozměry.

Řada A	
Délka insertu	35mm
Délka lepené plochy	25mm
Průměr lepené plochy	15mm
Plocha plochy	1216,75mm <sup>2</sup>
technika	Navrtání - d=4mm
lepidlo	Hysol 9394

Tabulka 7 - Popis řady A

## 4.2 Injektáž

Pro první vzorky bylo použito dvousložkové lepidlo Hysol® 9394 od firmy Henkel na doporučení ústavu letectví. Lepidlo je mícháno v hmotnostním poměru 100:17. Nedoporučuje se míchat hmotnosti větší než 450g, dochází k chemické reakci produkující teplo a hrozí zranění. Přípravování v menších dávkách se minimalizuje vzniklé teplo a tím snižuje možnost zranění. Lepidlo je opět možné vytvrdit při více teplotních možnostech po určité časové intervaly. Námi použitá metoda je 1 hodina při 66°C. Základní technické parametry:



Pevnost ve smyku (hliník)	28,2 MPa
Pevnost v loupání	22,2 N/25mm

Tabulka 8 - Pevnost lepidla

Připraveným lepidlem se naplní injekční stříkačka (vše je nutné provádět v ochranných rukavicích a brýlích) a skrz navrtané díry se postupně vtlačuje lepidlo do doby dokud nevytéká z ostatních děr. To nám zaručí úplné vyplnění prostoru mezi osazeními a stěnami trubky. Vyteklé lepidlo setřeme a povrch trubky očistíme acetonem.



Obrázek 9 - Připravené zkušební vzorky

Takto připravené, zalepené trubky necháme vytvrdit dle materiálového listu lepidla v peci při teplotě 66°C po dobu 1 hodiny poté vyjmeme z pece a necháme vychladnout.

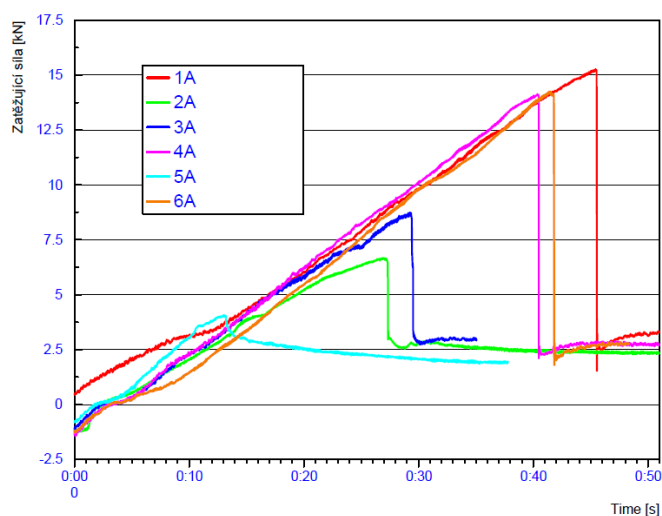
### 4.3 Průběh zkoušky

Zkušební vzorky byly upnuty pomocí tlakových čelistí za šrouby M8-8.8 vešroubované do insertů a zatěžovány rychlostí 1mm/min. Měření probíhalo pod dohledem Ing. Jaromíra Kučery, který průběh celého měření hlídal. Výsledky naměřené ze vzorků 1-6 typu A jsou shrnuty v *Tabulce 9* a znázorněny v *Graf.1*.

Číslo vzorku	Zatěžovací síla [kN]	Odchylka od průměru [kN]
1A	15,3	4,74
2A	6,72	-3,84
3A	8,74	-1,82
4A	14,18	3,62
5A	4,11	-6,45
6A	14,3	3,74

Tabulka 9 - Tahová zkouška Typ A

Průměr: 16mm  
 Délka insert: 25mm  
 Průměrná zatěžovací síla: 10,56kN



Graf 1 - Tahová zkouška Typ A

#### 4.4 Vyhodnocení zkoušky vzorků typu A

Z naměřených hodnot a *Grafu 1* je patrné že rozptyl zatížení, které jednotlivé vzorky vydržely je značný (4,11kN-15,3kN). Ačkoliv se hodnoty zatěžujících sil zvýšili a výsledky jsou příznivější nejsou stále dostatečné, především kvůli neschopnosti určení přesné zatěžovací síly, kterou přeneše lepený spoj na této lepené ploše.

Při vizuální kontrole vytržených insertů je patrné, že lepidlo aplikované pomocí injektaže dokonale vyplnilo prostor mezi osazeními a lepená plocha byla využita na 100%. Metoda injektaže tudíž splnila požadavky, které se od ní očekávaly.



Obrázek 10 - Vzorky typu A po zatěžovací zkoušce

Dalším pozorovaným jevem je skutečnost, že lepidlo se vůbec nespojilo s povrchem trubky a při vytažení pouze klouzalo po vnitřním povrchu. Tento problém má pravděpodobně příčinu v samotné výrobě trubek. Trubky jsou vyráběny namotáváním pramenů uhlíku pod různými úhly na ocelový trn, který je namazaný separační vrstvou kvůli lepšímu sejmutí vyrobené trubky z výrobního trnu. Právě tato vrstva může za špatnou přilnavost lepidla k povrchu trubky, tudíž pouze její lehké zdrsnění brusným papírem nestačí, neboť se separační vrstva neodstraní v dostatečné míře a lepidlo po ní sklouzne.

Jako další vylepšení je tedy potřeba upravit povrch trubek pro lepší spojení s lepidlem.

## 5. Úprava povrchu trubek a insertů

Ke zlepšení vlastností na rozhraní lepidlo/trubka bylo nutné radikálně odstranit separační vrstvu v dostatečné hloubce. Při pouhém zdrsnění povrch brusným papírem totiž nedošlo ke správnému propojení lepidla s uhlíkovými vlákny.

Pro zdrsnění jsem použil soustruh a za pomoci vnitřního soustružnického nože jsem v oblasti lepeného spoje odebral 0,5mm tlustou vrstvu separátoru. Pro zachování soustřednosti insertů a trubek jsem na kraji vynechal 5mm široké osazení a soustruženou plochu jsem udělal přesně 25mm širokou, tak aby obě dvě osazení na insertu dala vystředit.



Obrázek 11 - Vnitřní soustružení

Takto osoustružené trubky jsem opět připravil na injektáž navrtáním 4 otvorů. Při soustružení se porušila některá vlákna, která následně překážela při zavádění insertů, bylo tedy nutné veškeré otřepy uvnitř trubky očistit pilníkem a poté brusným papírem k dokonalé čistotě a kvalitě povrchu.

Úpravu povrchu soustružnickým nožem jsem po logické úvaze zaměnil za pouhé zdrsnění povrchu pomocí rašple. Lepidlo se musí pouze k povrchu přichytit a ne držet v drážkách vytvořených soustružnickým nožem při zdrsňování. Při zdrsňování povrchu rašplí se stav povrchu přiblíží struktuře, která vzniká při tryskání. Ruční opracování je tedy vhodné

zaměnit za strojní alternativní metodu s lepším a předepisovatelným povrchem, který určuje druh abraziva, jeho velikost a rychlost dopadání na povrch a tím jeho drsnost.



Obrázek 12 - Různé opracování povrchu

Povrch obou součástí byl odmaštěn pomocí acetonu a vatových tampónků do té doby dokud se z povrchu neodstranily veškeré nečistoty a mastnota. Odmašťování a čištění je nutné provádět v co nejméně prašném klidném prostředí, aby se zbytečně nevířili nečistoty . Vše je nutné provádět v latexových rukavicích a odkládat na očištěné místo tak aby lepená plocha nepřišla s ničím do styku. Případně je nutné povrch opět očistit.

## 6. Zkouška - Typ B

U zkušebních vzorků typu B bylo použito dvousložkové lepidlo Spabond 345, výrobce Gurit (*Tabulka 4*), které bylo vytvrzeno dle materiálového listu za teploty 70°C po dobu 5 hodin v peci viz. výše. Zkušební vzorky byly upraveny a zalepeny dle postupu v bodě 5 viz. výše. Zatěžování proběhlo rychlostí 1mm/min pomocí šroubů M8-8.8. Použité inserty zůstaly stejné jako v bodě 4.

Řada B	
Délka insertu	35mm
Délka lepené plochy	25mm
Průměr lepené plochy	15mm
Plocha plochy	1216,75mm <sup>2</sup>
technika	Navrtání - d=4mm
lepidlo	Spabond 345
Stěna trubky	Soustružena

Tabulka 10 - Popis řady B

## 6.1 Průběh zkoušky

Při Zkoušení vzorku 1B nastalo při zatěžovací síle 20kN k pomalému ustálení zatížení a následně k přetržení upínací tyče M8-8.8. Tuto hodnotu zatížení již nebyl šroub z daného materiálu přenést, což potvrzuje výpočet dovoleného napětí v tahu.

M8-8.8	
Průměr $d_3$	6,466mm
Dovolené napětí	640Mpa

Tabulka 11 - Parametry M8-8.8

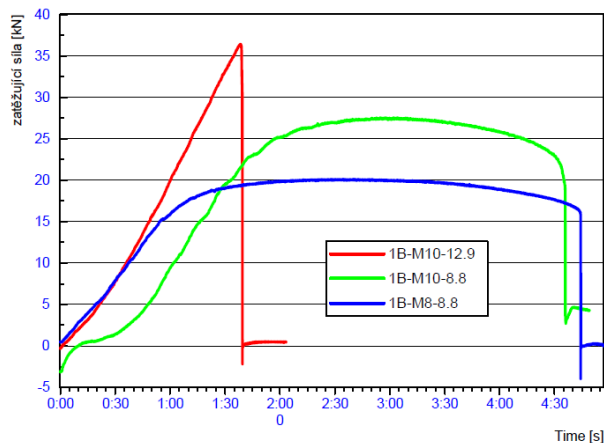
$$\sigma = \frac{F}{S} \Rightarrow F = \sigma * S = \sigma * \frac{\pi * d_3^2}{4} = 640 * \frac{\pi * 6,466^2}{4} \sim 21kN$$

Inserty všech zkušebních tyčí byly odvrtný a předělány na závit M10. Dále zkouška vzorku 1B probíhala od začátku pomocí závitových tyčí M10-8.8, zatěžovací rychlostí 1mm/min. Při hodnotě zatížení 27kN došlo k porušení závitu M10-8.8 stejným způsobem jako v případě M8-8.8. Kvůli nedostatečné pevnosti šroubů pevnostní třídy 8.8 byly použity šrouby třídy pevnosti 12.9.



Obrázek 13 - Přetrhnuté šrouby

Při použití těchto šroubů zkouška probíhala standardně a při hodnotě 36,45kN došlo u vzorku 1B k poruše trubky a lepeného spoje. Při měření dalších vzorků se nevyskytly žádné další komplikace v technologii.

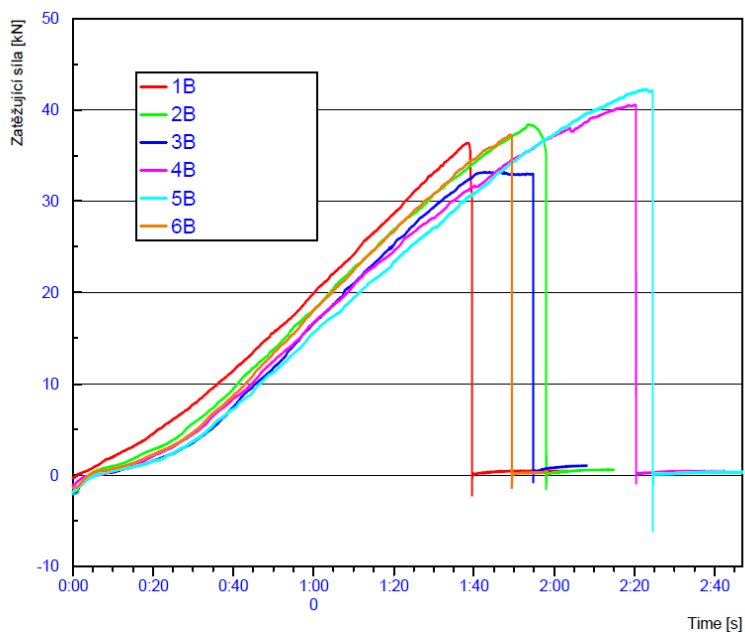


Graf 2 - Tahová zkouška vzorku 1B

Při měření jsme dosáhly diametrálně rozdílných hodnot než u předchozích vzorků stejných rozměrů. Zatížení, které byly povrchově upravené trubky schopny přenést bylo až 3x větší a především s přijatelným rozptylem od průměrné hodnoty.

Číslo vzorku	Zatěžovací síla [kN]	Odchylka od průměru [kN]
<b>1B</b>	36,45	-1,62
<b>2B</b>	38,45	0,38
<b>3B</b>	<b>33,24</b>	-4,83
<b>4B</b>	40,63	2,56
<b>5B</b>	<b>42,33</b>	4,26
<b>6B</b>	37,32	-0,75

Tabulka 12 - Tahová zkouška Typ B



Graf 3 - Tahová zkouška Typ B

## 6.2 Vyhodnocení zkoušky

Z výsledku zkoušky je patrné, že naměřené hodnoty přeneseného zatížení všech vzorků se pohybují ve vysokých číslech odpovídajících maximálnímu napětí, které je schopné přenést lepidlo a zároveň s poměrně malým rozptylem od průměrné hodnoty. Z toho můžeme usoudit, že technologický postup lepeného spoje byl správný. Nejdůležitějšího



Obrázek 14 - Vytržený insert

pokroku jsme dosáhly v oblasti spojení lepidla se strukturou uhlíkové trubky. Tento jev má za následek, že lepidlo pouze "neklouže" po vnitřním již neseparovaném povrchu trubky, ale je dokonale spojeno s vlákny uvnitř. Metoda odebrání separační vrstvy na soustruhu se tedy osvědčila a bude dále používána v přípravě dalších vzorků, tak aby se potvrdila její 100% funkčnost.

Z průměrné hodnoty zatížení a plochy lepeného spoje spočítáme napětí které vzniklo v lepeném spoji při tahové zkoušce. Toto napětí dále budeme považovat za počáteční při návrhu velikosti lepeného spoje jenž má přenést zatížení, které budeme požadovat.



Obrázek 15 - Vzorky typu B po zatěžovací zkoušce

Při bližším zkoumání vzorků řady B jsem zjistil že lepidlo nezůstalo pouze v prostoru pro lepenou plochu ( 25mm ), ale vyplnilo také prostor u osazení. To mohlo způsobit vyšší zatěžující sílu. Za předpokladu tohoto jevu i v budoucnu a korektnosti navrhování délky osazení insertu budu uvažovat výpočtovou délku lepeného spoje vzorku řady B stále 25mm a průměr insertu 15mm = průměru insertu v místě lepené plochy.

### 6.3 Výpočet smykového napětí v lepeném spoji

Použité lepidlo	Spabond 345
Průměrná zatěžující síla	38,07kN
Délka lepené plochy	25mm
Průměr insertu v místě lepené plochy	15mm
Plocha lepené plochy	1178,10mm <sup>2</sup>

Tabulka 13 - Výpočtové hodnoty

$$\sigma = \frac{F}{S} = \frac{38070}{1178,1} \sim \mathbf{32MPa}$$

Hodnotu 32MPa budu považovat za výchozí hodnotu napětí pro určení lepené plochy vzorků řady C, kde ověřím správnost a přesnost této hodnoty.

## 7. Dimenzování velikosti lepeného spoje

Pro ověření správnosti vypočítaného napětí, jsem pro vzorky řady C stanovil délku lepeného spoje na 15mm při zachování průměru insertů v místě lepené plochy 15mm. Dosazením do rovnice:

$$F = \sigma * S = \sigma * \pi * D * l = 32 * \pi * 15 * 15 \sim \mathbf{22,6kN}$$

Z výpočtu vyplývá, že konečná přenášená síla by měla odpovídat 22,6kN, při dodržení dosavadního technologického postupu.



## 8. Zkouška - Typ C

Zkušební vzorky řady C byly upraveny stejným postupem jako vzorky řady B. Trubky soustruženy a navrtány. Inerty tryskané v oblasti lepeného spoje.

Řada C	
Délka insertu	20mm
Délka lepené plochy	15mm
Průměr lepené plochy	15mm
Plocha plochy	706,86mm <sup>2</sup>
technika	Navrtání - d=4mm
lepidlo	Spabond 345
Stěna trubky	Soustružena

Tabulka 14 - Popis řady C

### 8.1 Průběh zkoušky

Zatěžování zkušebních vzorků probíhalo rychlostí 1mm/minutu za použití šroubů pevnostní třídy 12.9, použitých v předcházející zkoušce.

Číslo vzorku	Zatěžovací síla [kN]	poznámka
1C	31,26	
2C	31,33	
3C	23,72	2/3 plochy
4C	30,27	
5C	26,97	Špatné zdrsnění
6C	25,17	1 díra nezalepena

Tabulka 15 - Tahová zkouška Typ C

Naměřené hodnoty vysoce přesáhly mnou navrhovanou zatěžovací sílu. Toto zvýšení zatěžovací síly bylo zapříčiněno špatným osazením na koncích insertů. Z důvodu nepřesné výroby osazení a nedodržení výrobních rozměrů bylo osazení menší a lepidlo tudíž zateklo mezi osazení a trubku. Nesprávný rozměr osazení má za následek především nesouosost, která nám přidá nesouměrné zatěžování.



Obrázek 16 - Zatečení lepidla na osazení

## 8.2 Vyhodnocení zkoušky

Nedostatečné utěsnění osazení mělo za následek prodloužení lepeného spoje na 20mm. Při přepočítání zatěžovací síly s danými parametry vyjde:

$$F = \sigma * S = \sigma * \pi * D * l = 32 * \pi * 20 * 15 \sim \mathbf{30,2kN}$$

Tato hodnota odpovídá naměřeným hodnotám. U vzorků s menší přenesenou zátěží byly zjištěny výrobní chyby v přípravě povrchu a pečlivostí při injektáži.

Tato zkouška nepotvrdila 100% správnost výpočetního napětí a poukázala na náchylnost procesu k chybám při výrobě. Z naměřených hodnot lze usoudit, že napětí 32MPa bude pravděpodobně správným odhadem.

## 9. Zkouška - Typ D

U zkoušky typu D jsem použil pro ověření správnosti vypočítaného napětí jiný průměr uhlíkové trubky. Vnitřní průměr d=12mm. K dimenzování lepeného spoje jsem navrhl délku 10mm. Při této velikosti lepeného spoje by zatěžovací síla měla odpovídat **12kN**. Při přípravě trubek a insertů bylo dbáno na dokonalé opracování, odmaštění a maximální důslednost při injektáži, tak aby se zamezilo výrobě zmetků.

Řada D	
Délka insertu	15mm
Délka lepené plochy	10mm
Průměr lepené plochy	11,5mm
Plocha plochy	361,1mm <sup>2</sup>
technika	Navrtání - d=4mm
lepidlo	Spabond 345
Stěna trubky	Soustružena

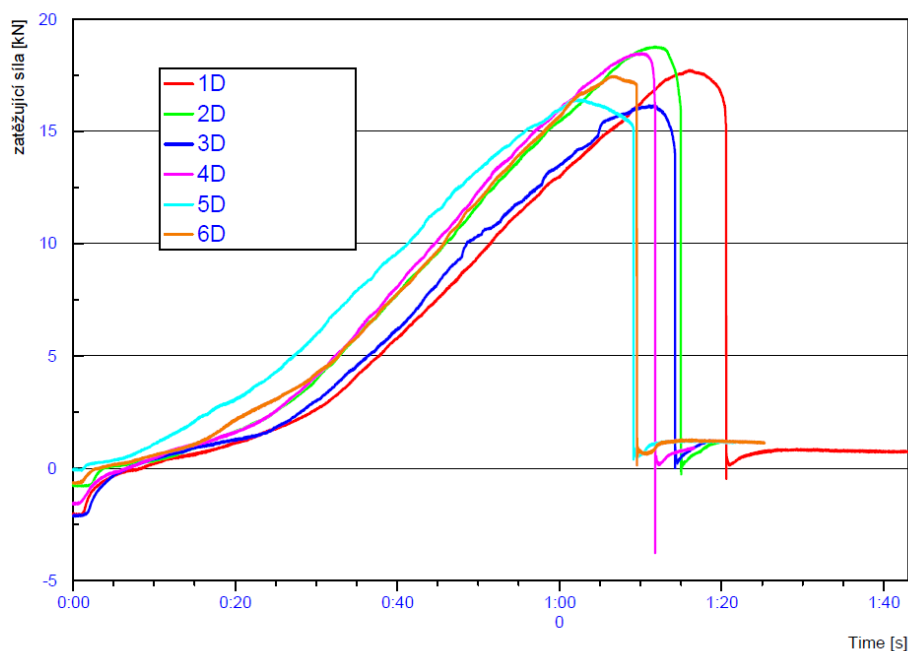
Tabulka 16 - Popis řady D

### 9.1 Průběh zkoušky

Zatěžování zkušebních vzorků probíhalo rychlostí 1mm/minutu za použití šroubů pevnostní třídy 12.9, použitých v předcházející zkoušce.

Číslo vzorku	Zatěžovací síla [kN]	Odchylka od průměru [kN]
1D	17,76	0,24
2D	<b>18,80</b>	1,27
3D	<b>16,16</b>	-1,36
4D	18,50	0,98
5D	16,44	-1,10
6D	17,49	0,04

Tabulka 17 - Tahová zkouška Typ D



Graf 4 - Tahová zkouška Typ D

## 9.2 Vyhodnocení zkoušky

Naměřené hodnoty dosáhly vyšších hodnot než bylo očekáváno. Tento nárůst přenesené zatěžovací síly může být opět způsoben vytečením lepidla do prostoru osazení nebo poddimenzováním hodnoty přenášeného napětí 32MPa. Hlavním úspěchem je dosažení stejné přenesené zatěžující síly u všech zkoušených vzorků.

Úspěch této zatěžující zkoušky nám potvrdil správnost metody při dodržení daného postupu do nejmenších detailů. Z důvodu eliminování případných problémů při opakovaném provádění lepeného spoje je mým dalším krokem zaručit 100% opakovatelnost.

## 10. Opakovatelnost

Z důvodu velikého množství lepených spojů na voze FS.06 je nutné zaručit dokonalé provedení lepeného spoje bez poklesu pevnosti při každém lepení. Z tohoto důvodu je nutné vypracovat metodiku provedení lepeného spoje. Proto provedu další zkoušku typu E, u které budu jednotlivé kroky pečlivě zaznamenávat a popisovat tak, aby bylo následně možné provést lepený spoj s danými parametry bez předchozích zkušeností jakýmkoliv členem týmu.

Jediné úpravy na vzorcích typu E budou u osazení, které se musí udělat s menší tolerancí.

## 11. Zkouška - Typ E

U této zkoušky byly použity stejné inserty, rozměry a úpravy povrchů jako u zkoušky typu D. Inserty jsou vyráběny s přesností osazení h6.

Řada E	
Délka insertu	15mm
Délka lepené plochy	10mm
Průměr lepené plochy	11,5mm
Plocha plochy	361,1mm <sup>2</sup>
technika	Navrtání - d=4mm
lepidlo	Spabond 345
Stěna trubky	Soustružena

Tabulka 18 - Popis řady E

### 11.1. Průběh zkoušky

Při provádění zkoušky byly vzorky 1D a 2D poškozeny špatným upnutím a přílišnou zatěžující rychlostí, tudíž jejich údaje nezapočítám do výsledků měření.

Číslo vzorku	Zatěžovací síla [kN]	Odchylka od průměru [kN]
<b>1E</b>	-	-
<b>2E</b>	-	-
<b>3E</b>	14,06	-0,69
<b>4E</b>	15,00	0,24
<b>5E</b>	14,86	0,10
<b>6E</b>	15,11	0,35

Tabulka 19 - Tahová zkouška Typ E

Průměr: 12mm

Délka insert: 10mm

Průměrná zatěžovací síla: 14,78kN

### 11.2 Vyhodnocení zkoušky

Nižší dosažené hodnoty oproti typu D jsou dány přesnějším osazením, lepidlo zůstalo pouze v prostoru pro lepenou plochu. Všechny zkušební měřené vzorky dosáhli naprosto identických hodnot a jejich odchylky od střední hodnoty jsou minimální. Navíc následovaly další úspěšné pokusy s typem F. Danou metodu tudíž považuji za dostatečně ověřenou a její opakovatelnost za prokázanou. Na základě těchto naměřených hodnot a aplikovaných postupů sestavím metodiku pro dosažení vždy stejných hodnot.

## 12. Metodika

Veškeré dokončovací operace a proces lepení musí být prováděn v ochranných pomůckách!

### Příprava insertů

- 1) Stanovení rozměrů
  - a) Ze zatížení působícího na lepený spoj stanovíme potřebnou velikost lepené plochy se zvolenou bezpečností. Napětí = 32 MPa.

$$\sigma = \frac{F}{S} * k \Rightarrow S = \frac{F}{\sigma} * k \Rightarrow S = f(d; l; \sigma; k; F)$$

- 2) Výroba
  - a) Nakreslíme výrobní výkres s vypočítanými rozměry dle potřebného zatížení. Mezeru mezi uhlíkovou trubkou a osazením pro lepenou plochu volíme do 0,5mm. Délka lepené plochy insertu je závislá na výpočtu. Na oba konce přidáme 2,5mm osazení, které zabrání vytékání lepidla mimo lepenou plochu a zaručí souosost.
  - b) Vyrobíme inserty na CNC obráběcím stroji. Při výrobě je nutné dbát především na co nej přesnější rozměry u středícího osazení, osazení pro lepidlo a délku lepené plochy.
- 3) Úprava povrchu
  - a) V prostoru lepené plochy povrch tryskáme.
- 4) Pasivace povrchu
  - a) Součást necháme povrchově upravit - hliník = Elox
- 5) Odmaštění
  - a) Připravené inserty umyjeme a zbavíme viditelných nečistot ( prach, zbytky materiálu).
  - b) Oschlý povrch očistíme acetonem a vatovými polštářky. Plochu lepeného spoje čistíme několikrát, pokaždé čistým polštářkem tak, aby na polštářku nezbyla žádná nečistota.
  - a) Insertů se snažíme co nejméně dotýkat a chráníme je před nečistotami ( prach, tekutiny).

### Příprava trubek

- 2) Krácení na potřebnou délku
  - a) Pomocí úhlové brusky s kotoučem na řezání uhlíku nařezeme tyče daného průměru na požadované rozměry s přídavkem na zbrúšení konců min: 5mm
- 3) Broušení konců trubky
  - a) Pomocí brusného papíru zbrúsíme oba konce trubky na potřebný rozměr.
  - b) Konce trubky musí dokonale dosedat na plochu insertu v celém obvodu.
- 4) Odstranění separační vrstvy
  - a) Trubku upneme pomocí sklíčidla nebo kleštiny do soustruhu. Utahovací síla musí být co nejmenší, aby nedošlo k popraskání pryskyřice.

- b) Vnitřní soustružnický nůž si nastavíme přesně do výšky osy dané trubky.
  - c) Otáčky soustruhu volíme okolo 400/min.
  - d) Odsadíme na začátku okraj pro osazení na insertech a soustružíme přesně v délce lepeného spoje po třísce 0,1mm do hloubky max 0,5mm - záleží na tloušťce stěny trubky, nutné je odstranit separační vrstvu po celé ploše lepeného spoje.
- 5) Navrtávání
- a) Podle velikosti trubky a délky lepené plochy zvolíme dostatečný počet děr, jejich umístění a průměr (1,2mm-4mm).
  - b) Díry navrtáváme rovnoměrně pomocí vrtáku vždy s dovnitř vloženým, přesně osoustruženým válečkem, tak aby se maximálně omezila delaminace.
- 6) Čištění
- a) Osoustružené trubky zbavíme pomocí pilníků a brusného papíru všech otřepů vzniklých při obrábění tak aby jsme měli co nejlepší povrch.
  - b) Obroušené trubky umyjeme a zbavíme viditelných nečistot ( prach, zbytky vláken)
  - c) Oschlý povrch očistíme acetonem a vatovými polštářky. Trubku čistíme několikrát, pokaždé čistým polštářkem tak, aby na polštářku nezbyla žádná nečistota.
  - d) Takto připravených trubek se snažíme co nejméně dotýkat a chráníme je před nečistotami ( prach, tekutiny )

### **Postup lepení a vytvrzení**

- 1) Lepidlo namícháme v poměru daném materiálovým listem.
- a) Důkladně promícháme obě složky dohromady.
  - b) Nepřipravujeme zbytečně velké množství lepidla najednou.
- 2) Injektáž
- a) Injekci naplníme lepidlem.
  - b) Insert opatrně vsuneme do trubky tak, aby jsme se nedotkly lepené plochy.
  - c) Zkontrolujeme přesné dosednutí konce insertu na hranu trubky.
  - d) Skrz navrtané otvory aplikujeme lepidlo do prostoru mezi osazením. Otvory postupně střídáme dokud lepidlo, při vtlačení, nevytéká ze všech otvorů.
  - e) Vyteklé lepidlo setřeme a povrch očistíme acetonem.
- 3) Vytvrzování
- a) Dle materiálového listu nastavíme pec na dané hodnoty a zalepené součásti necháme vytvrdit.
  - b) Pečlivě kontrolujeme čas a teplotu.
  - c) Po uplynutí potřebné doby vyndáme okamžitě součásti ven a necháme vychladnout
- 4) Zkoušení
- a) Zalepené tyče vizuálně zkontrolujeme.
  - b) Lepidlo v navrtaných dírách můžeme přebarvit na černo pro lepší vzhled.
  - c) Lepený spoj je možno otestovat na dané zatížení na trhacím stroji.

### 13. Použití lepeného spoje na voze FS.06

Daný postup byl použit na prvcích zadního a předního zavěšení kol. Dále se tato metoda použila při výrobě tyče řízení, kde bylo dosaženo snížení hmotnosti z 950g na 475g pouhým nahrazením ocelové části tyče uhlíkovou trubicí.



Obrázek 17 - Tyče řízení

Veškeré rozměry lepených ploch byly stanovovány s velikou bezpečností  $K > 5$ . Stanovení takto veliké bezpečnosti přineslo lehké zvýšení hmotnosti insertů. Toto zvýšení hmotnosti v řádech gramů bylo ovšem zanedbáno v zájmu vyšší pevnosti spojů. Samotný insert byl zmenšen a odlehčen o 10g/ks oproti nefunkčním insertům z minulé sezony.



Obrázek 18 - FS.06

## 14. Závěr

V této práci jsem se snažil přiblížit problematiku provedení lepeného spoje. Práce je vypracována v rozsahu zadání a doufám, že se mi podařilo dostatečně objasnit veškerá úskalí dané metody a mnou vypracovaný postup se osvědčí v praxi a stane se inspirací pro další vývoj. Během experimentálních zkoušek a samotného provedení lepení jsem se mnohému přiučil a zjistil, že na každém, i tom nejmenším detailu, závisí stejně jako všem ostatním, a že polevení a nedodržení přesného postupu může znamenat nefunkčnost a zhroucení celé metody.

Mnou vypracovaný postup jsem použil při výrobě součástí na vůz FS.06. Tyto součásti v době dokončování této bakalářské práce jsou již namontovány ve voze a čekají na svou první úspěšnou sezónu.



## 15. Použitá literatura

- [1] HRUŠKA, Jindřich. *Zadní náprava pro vůz Formula Student/SAE*: Diplomová práce. ČVUT v Praze, Fakulta strojní 2011.
- [2] J. Michalec a kol.: *Pružnost a pevnost I*, skriptum
- [3] *Gurit - Spabond 345 epoxy adhesive system, Switzerland*  
Dostupné online na <http://www.gurit.com/spabond-345.aspx>
- [4] *Henkel - Loctite EA 9394 (Hysol EA 9394)*  
Dostupné online na <http://www.henkelna.com/>

## 16. Seznam příloh

**Příloha 1 - Vzorok Typ A - F**

**Příloha 2 - Nefunkční vzorky sezóny 2013**

**Příloha na CD:**            Naměřené hodnoty zkušebních vzorků  
                                      Data tahových zkoušek  
                                      Fotodokumentace