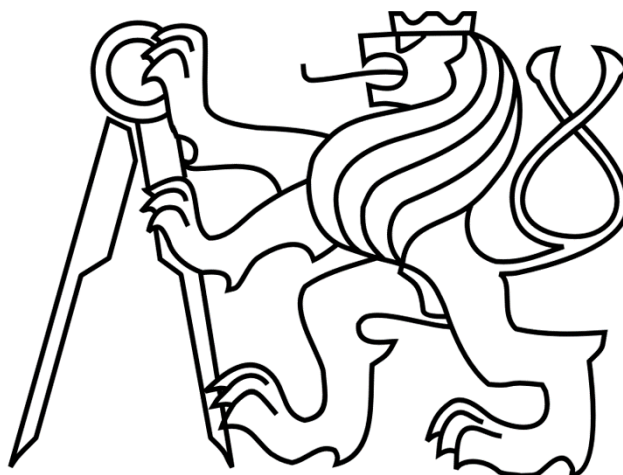


# České vysoké učení technické v Praze

## Fakulta strojní

12 120 – Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel



## Diplomová práce

**Návrh a zkoušky vložek monokoku vozu**

**Design and Testing of a Monocoque Inserts**

Student: Filip Tomasch

Vedoucí práce: Ing. Michal Vašíček

Studijní obor: Dopravní, letadlová a transportní technika

2018/2019

## **Zadání**

- 1) Proveďte rešerši realizací přípojných bodů do sendvičových struktur.
- 2) Navrhněte konstrukci vložek monokoku dle pravidel FSG.
- 3) Vytvořte výpočetní model pro pevnostní kontrolu vložek.
- 4) Popište výrobní postup vzorků.
- 5) Výpočetní model validujte pomocí experimentu.

## Poděkování

Jako první bych se chtěl poděkovat Fakultě strojní a Ústavu automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel za podporu týmu CTU Cartech, bez kterých by tento skvělý projekt nemohl fungovat. Hlavně děkuji mému vedoucímu, panu Ing. Michalu Vašíčkovi, Ph.D., za předání rad a podpoře při psaní této práce.

Dále děkuji členům týmu CTU Cartech, zejména Lukáši Pacoňovi, za pomoc při tvorbě výpočetního modelu. a zaměstnancům firmy LA Composite, za cenné rady a pomoc při výrobě kompozitních dílů. Díky patří také panu Ing. Karlu Doubravovi, Ph.D., za věnovaný čas a trpělivost při testování mých čtených kompozitních vzorků. Nakonec bych chtěl nejvíce poděkovat rodině a přítelkyni za psychickou podporu.

## Anotační záznam

Název práce:	Návrh a zkoušky vložek monokoku vozu
Autor:	Bc. Filip Tomasch
Rozsah práce:	stránky: 67 obrázky: 39 tabulky: 5 grafy: 7 přílohy: 1
Akademický rok:	2018/2019
Jazyk práce:	CZ
Ústav:	12 120 – Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel
Studijní program:	magisterský – Strojní inženýrství – Dopravní, letadlová a transportní technika
Vedoucí práce:	Ing. Michal Vašíček, Ph.D.
Abstrakt:	Diplomová práce se zabývá problémem, jak správně zavést zatížení do sendvičového kompozitu z uhlíkových vláken a strukturální pěny. Po představení problematiky kompozitů, popisu výpočtu laminátu, a rešerší realizací přípojných bodů se dále zabývá návrhem a MKP simulací chování vložek v sendviči. Ke konci popisuje výrobní proces vzorků a experiment pro validaci simulovaných dat.
Klíčová slova:	kompozit, vložky, sendvič, monokok, Formula Student

## Annotation

Title:	Design and Testing of a Monocoque Inserts
Author:	Bc. Filip Tomasch
Size:	pages: 67 figures: 39 tables: 5 graphs: 7 attachments: 1
Academic year:	2018/2019
Language:	CZ
Department:	12 120 – Department of Automotive, Combustion Engine and Railway Engineering
Study program:	Master's – Mechanical engineering – Transportation, Aerospace and Handling Technology
Supervisor:	Ing. Michal Vašíček, Ph.D.
Abstract:	Master's thesis handles the challenge of how to correctly apply forces into carbon composite and structural foam sandwich structure. After introduction into matters of composites, description of laminate calculation and a research of mounting points it carries on to FEM analysis of insert behavior in a sandwich. Towards the end it describes the manufacturing process of test specimens and their experimental testing as a validation of simulated data.
Keywords:	composite, inserts, sandwich, monocoque, Formula Student

## **Prohlášení o autorství**

Prohlašuji, že jsem tuto závěrečnou práci vypracoval samostatně a že jsem použil pouze podklady uvedené v závěru práce

V Praze dne .....

.....

Bc. Filip Tomasch

..

## Obsah

1. Úvod .....	9
1.1. Motivace, cíl a obsah práce.....	9
1.2. Formula Student a CTU CarTech .....	9
1.3. Monokok .....	11
1.3.1. Historie [1].....	11
1.3.2. Výhody a nevýhody [1].....	14
1.3.3. Podmínky návrhu .....	15
2. Zatížení samonosné struktury .....	16
2.1. Pravidla pro skořepinovou nosnou strukturu [2] .....	16
2.2. Neregulované zatížení a přípojný body .....	19
3. Teorie .....	23
3.1. Kompozit [3] a [4].....	23
3.1.1. Vláknové kompozity [5].....	24
3.1.2. Rozdělení laminátů [7] .....	26
3.1.3. Základní rovnice laminátů [6].....	28
3.2. Sendviče [1].....	30
3.3. Vložky [1].....	33
3.3.1. Typy vložek podle ESA [8] .....	34
3.3.1.1. Typ A.....	34
3.3.1.2. Typ B.....	34
3.3.1.3. Typ C.....	34
4. Návrh vložek.....	36
4.1. Úvod [2].....	36
4.2. Pevnost potahu ve stříhu [2].....	36
4.3. Navržené vložky .....	38
4.3.1. Uchycení ramen .....	39
4.3.2. Uchycení vahadla .....	39
4.3.4. Ramenní pás.....	40
4.3.5. Kyčelní a břišní pás .....	41
4.4. Materiál potahu .....	41
4.5. Materiál jádra.....	41
4.6. Vložky .....	42
5. Metoda konečných prvků .....	43

---

5.1. Geometrie .....	43
5.2. Síť .....	43
5.3. Model [9].....	44
5.4. Výsledky simulací .....	45
6. Výroba vzorků .....	49
6.1. Výrobní postup.....	49
7. Experiment .....	52
7.1. Břišní pás a kyčelní pás.....	52
7.2. Ramenní pás.....	55
8. Porovnání výsledků .....	57
9. Výhled do budoucna .....	59
10. Závěr.....	60
11. Seznam použitých zdrojů .....	61
12. Seznam obrázků .....	62
13. Seznam tabulek .....	63
14. Seznam grafů.....	63
15. Seznam příloh.....	63



## 1. Úvod

### 1.1. Motivace, cíl a obsah práce

Cílem této práce je lépe porozumět interakci lokalizovaných zátěží se sendvičovou strukturou, v tomto případě samonosnou strukturou – monokokem závodního vozu FS.10 týmu CTU CarTech. Důraz bude kladen na snížení rizik a optimalizaci návrhu přípojných bodů. Budeme se zaměřovat na technologii sendvičů, teorii vložek a technologii lepidel.

Podrobné úkoly této práce zahrnují:

- studii kompozitu, sendvičů a vložek
- modelování metodou konečných prvků
- výrobní proces vzorků pro experiment
- experimentální výzkum a zkoušení vzorků
- vyhodnocení výsledků

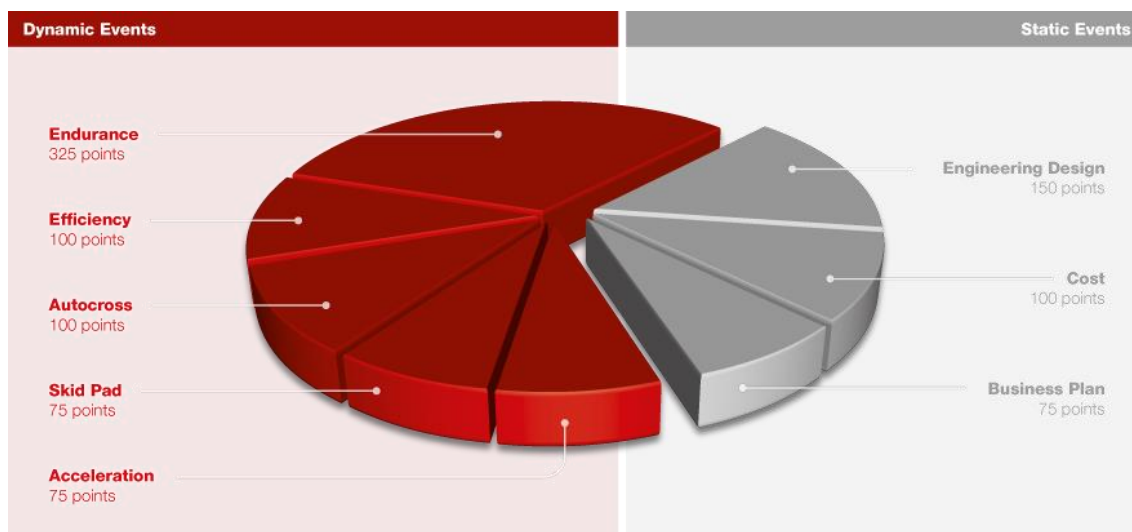
### 1.2. Formula Student a CTU CarTech

Formula Student je studentská inženýrská soutěž, která se koná každoročně v Evropě od roku 1998. Úlohou pro studenty je navrhnout, postavit a pak provozovat jednomístní závodní vůz formulového typu na závodech. Soutěže se konají na různých místech po celém světě. Největší z nich jsou v Německu, Anglii, a USA. Každoročně se této soutěže zúčastní kolem 200 000 studentů, a proto je jednou z největších studentských soutěží na světě.



Obrázek 1 Oficiální logo Formule Student/SAE Zdroj: <http://www.ebaracus.com/>

Soutěžní týmy jsou hodnocené jak podle znalostí problematiky stavby závodního vozu, tak podle samotného výkonu vozu na závodní trati. Závody se vždy skládají z pěti dynamických a tří statických disciplín, a jejich bodové ohodnocení je zobrazeno na obrázku 2 níže.



Obrázek 2 Rozdělení bodů Formula Student Zdroj: <http://electric.amzracing.ch/en/formula-student>

Dohromady je možné získat 1000 bodů, z toho 70 % v dynamických disciplínách, a 30 % v statických disciplínách. Aby bylo hodnocení v soutěžích co nejvyšší, je třeba mít hbité auto, které dokáže jet rychle po trati. Dva důležité faktory kritického zatížení nosných součástí je hmotnost a tuhost. Je žádoucí udržet nízkou hmotnost a zároveň rozumně vysokou tuhost. Závodní auto vždy zrychluje, brzdí nebo zatáčí.

Z druhého Newtonova zákona  $F=m \cdot a$ , lze jednoduše vyvodit, že těžké auto zrychluje pomaleji než lehčí, když mají obě k dispozici stejnou trakční sílu. Lehčí auto má také nižší požadavky na tuhost a pevnost nosných prvků.

Tým CTU CarTech byl založen v roce 2007, jako první tým v České Republice. První rok probíhala rešerše a technický návrh a v roce 2009 postavil svůj první vůz FS.01. Nyní je hotový návrh jedenáctého vozu FS.11 a tým začíná s jeho výrobou. První čtyři vozy byly postaveny na nosné struktuře svařeného trubkového rámu. Od pátého vozu dál už tým používá skořepinovou samonosnou strukturu neboli monokok. Pro srovnání, vůz FS.01 měl hmotnost 339 kg, vůz FS.10 pouze 192 kg. Nemalou roli v celkové hmotnosti

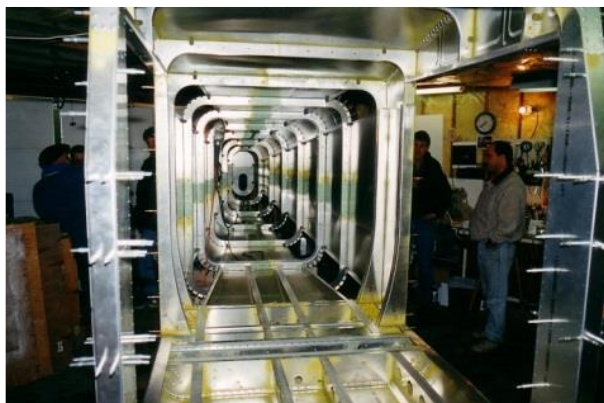
hraje právě nosná struktura. Ve voze FS.01 byla její hmotnost 57,8 kg, v FS.10 už pouze 28,2 kg.

### 1.3. Monokok

Tento název pochází z francouzštiny (Monocoque) a dá se volně přeložit jako skořepina pro jednoho.

#### 1.3.1. Historie [1]

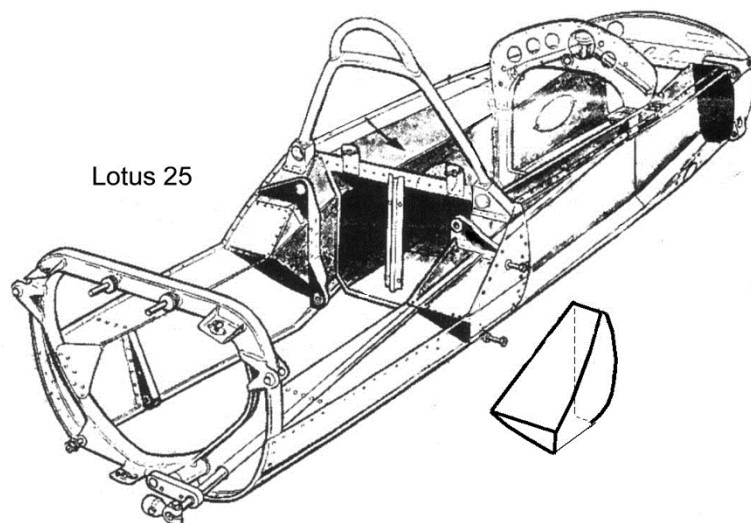
Samonosná struktura má své kořeny na počátku 20. století, kdy klesla cena hliníkových plechů, které dokázaly zvládnout namáhání kvůli zvýšenému výkonu nově navržených letadel. Na konci druhé světové války měla nejvyspělejší letadla monokokovou nebo semimonokokovou strukturu.



Obrázek 3 Stavba nosné struktury letadla Murphy Moose [1]

Použití samonosné struktury brzy postupovalo do automobilového průmyslu. První samonosná karoserie byla představena v roce 1923 ve voze Lancia Lambda, ale nebylo to až do představení Nash Motors model 600 v roce 1941, kdy se tento typ karoserie začal držet v automobilovém průmyslu. Díky samonosné struktuře vyrobila firma Nash motorové vozidlo, nejen silnější a tužší, ale současně o přibližně 240 kg lehčí, než bylo klasické vozidlo s nosným podvozkem a na něm namontovanou karoserií.

Cesta k současné "buňce přežití" ve Formuli 1 začala počátkem 80. let s přijetím kompozitních materiálů z uhlíkových vláken pro výrobu šasí, i když v přesné definici termínu, kompozity již byly v motorsportu již od padesátých let ve formě panelů z kompozitních materiálů ze skelných vláken.



Obrázek 4 Hliníkový monokok Lotusu 25

První vůz Formule 1, který závodil s kompozitním monokokem, byl Lotus 25 v roce 1962, z hliníkové voštiny obložené tenkým plechem. McLaren byl v roce 1981 prvním týmem Formule 1, který poslal své závodní vozy MP4/1 na trať s nově navrženými bezpečnostními buňkami. Je stále ještě debata o tom, který tým vyrobil uhlíkový monokok jako první. Lotus tajně prováděl podobný výzkum souběžně s McLarenem. Lotus následoval metodiku "cut and fold", tedy proces, kdy se rovinné panely nařezou na segmenty, které se následně spojí dohromady.



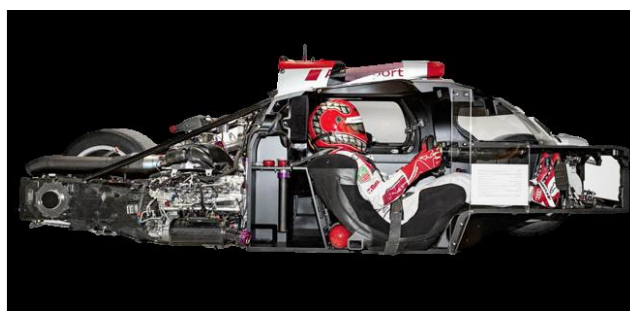
Obrázek 5 První uhlíkový monokok McLarenu MP4

Zatímco McLaren používal subdodavatele, Hercules Aerospace, pro výrobu jejich monokoku, Lotus se rozhodl vybudovat svůj vlastní. Monokok McLaren byl

vyroben pokládáním uhlíkových rohoží na pozitivní formy, před aplikací jádra a následně vnějšího potahu struktury. Lotus se rozhodl pro použití složených listů kompozitních materiálů podobně způsobu, jakým byl monokok dříve vyroben z hliníkových plechů a hliníkových plástů.

Dvě formy tvořily horní a dolní polovinu monokoku McLarenu a spojily se kolem přepážek k vytvoření konečného kompozitního dílu. Protože bylo potřebné zachovat přesné body pro uchycení zavěšení, byla použita pozitivní forma k položení vnitřního potahu přímo proti na ní, čímž se odstranila jakákoliv odchylka v tloušťce sendvičové vrstvy z konečné podoby geometrie zavěšení. To vedlo k tomu, že vnější potah byl položen na voštinu, a ne plochu formy, proto byla vnější úprava těchto dílů relativně špatná.

Hlavní zájem o monokok ve Formuli 1 byl z důvodu ochrany pilota i při velmi těžkých haváriích. Monokok z uhlíkových vláken prokázal svou neuvěřitelnou schopnost odolávat velkým nárazům. Na Velké Ceně Itálie v roce 1981 John Watson ztratil kontrolu nad jeho McLarenem a prudce narazil do bariér. Dokázal odejít z trosk vozu nezraněný. Tento incident odstranil zbytky jakýchkoli pochybností v myslích nepřesvědčených o bezpečnosti kompozitních materiálů z uhlíkových vláken. Vlastnost kompozitu pohltit nárazovou energii významně přispěl k bezpečnosti motorsportu.



Obrázek 6 Monokok vozu Audi R18 LMP

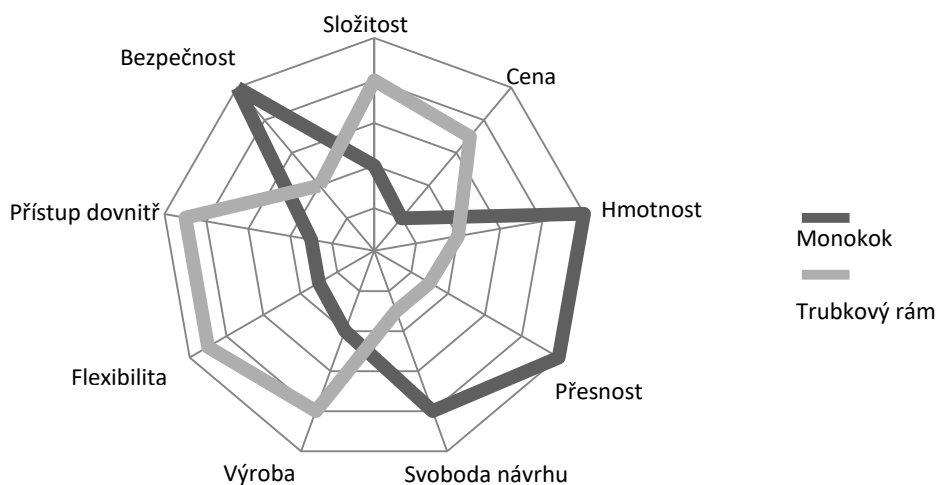
Ostatní týmy brzy následovaly cestu karbonových vláken téměř stejným způsobem, jako McLaren. Pak pro sezónu 1983, pod technickým vedením Gustava Brunnera vyrobil tým ATS první monokok, jako ho známe z dneška. Vyrobil negativní formu, a tím využil aerodynamicky výhodnější vnější povrch. Tímto se monokok zároveň

stal vnějším tvarem „karoserie“ a odpadla nutnost vyrobit další díly pro přední část vozu.

### 1.3.2. Výhody a nevýhody [1]

Jak bylo zmíněno, celkovým důvodem pro vývoj monokoku s uhlíkovými vlákny byla schopnost snížit hmotnost při zachování tuhosti a pevnosti. Tuhost je jeden z nejdůležitějších parametrů při navrhování závodního automobilu, protože poddajnost ovlivní chování auta při různých zátěžných stavech, a tím pádem znesnadní řidiči ovládat auto. Tuhost a pevnost jsou klíčovými prvky při návrhu bezpečné nosné struktury. Naši jezdci závodí autem i v rychlostech nad 110 km/h, tedy bezpečnost vozu je zásadní konstrukční výzvou.

Existuje však mnoho dalších parametrů, které se změní, když je ocelový prostorový rám nahrazen monokokem z uhlíkových vláken. Složitost návrhu, svoboda návrhu, přesnost, jsou jen některé z nich.



Obrázek 7 Porovnání monokoku a trubkového rámu

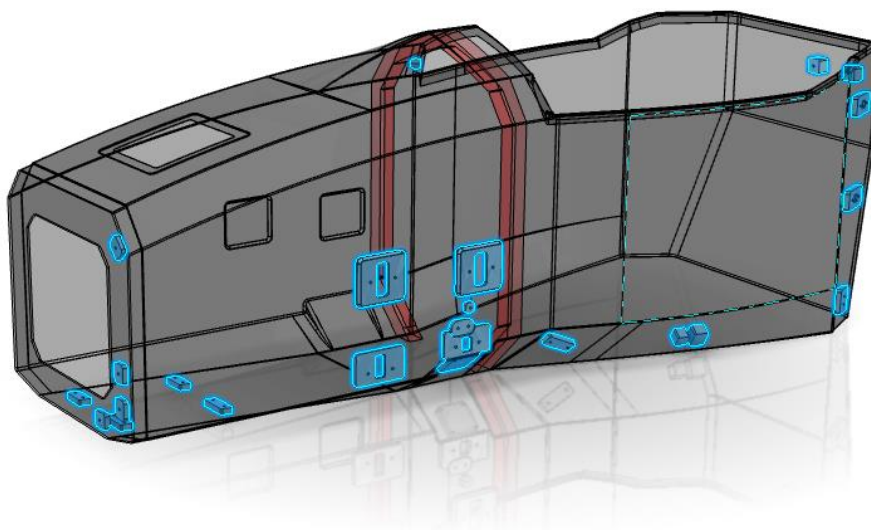
Jak je vidět z obrázku 7, monokok se podstatně liší od ocelového rámu. Je patrné, že náklady na výrobu jsou podstatně vyšší ve srovnání s ocelovým rámem. Totéž platí o náročnosti výroby a přístupu k interiéru. Co monokok postrádá v těchto ohledech je násobně vyváжено svobodou návrhu a přesností výroby. Svoboda návrhu dává příležitost navrhnout monokok pro všechny zátěžné stavy, pro všechny připojované součásti a pro každou funkci, a umožňuje přidávat tuhost tam, kde je to žádoucí. Přesnost v místech uchycení předního zavěšení je velice důležitá, s cílem získat rychlý a říditelný vůz, který

se chová tak, jak je navržen. Navíc, geometrie zavěšení je kritickým parametrem pro zatížení působící na nosnou strukturu. Změna geometrie zavěšení změní dráhu zatížení do šasi, což může vést k výsledku, kdy je nosná struktura nad-, nebo poddimenzovaná. To snižuje hmotnostní účinnost.

Celkově jsou pro nás nejdůležitější parametry, jakými jsou hmotnost, svoboda návrhu, přesnost a bezpečnost nejlépe zastoupeny v monokoku.

### 1.3.3. Podmínky návrhu

Jedním z hlavních problémů je, jak vhodně distribuovat zatížení z připojených prvků do sendvičové struktury. Lehká sendvičová struktura se nejčastěji skládá z relativně slabého jádra, které znemožňuje jednoduchý přenos koncentrovaných sil. Jako řešení se použije lokalizovaná výztužná / zesilující vložka. Celkově se v monokoku vozu FS.10 nachází 42 vložek.



Obrázek 8 Vložky uvnitř monokoku FS.10

## 2. Zatížení samonosné struktury

Jako hlavní nosná konstrukce vozu musí být monokok schopen zvládnout veškerá zatížení od vnějších sil. U monokoku Formule Student lze zatížení rozdělit do dvou kategorií, zatížení regulovaných pravidly soutěže a neregulovaných. Většina regulovaných oblastí monokoku je spojená s bezpečností, jakou jsou přední a boční nárazové struktury a upevnění bezpečnostních pásů. Tyto části konstrukce vyžadují experimentálního otestování vzorků, na kterých se prokáží požadované vlastnosti. Zatížení od zavěšení jsou nejdůležitější neregulovaná zatížení působící na nosnou konstrukci.

### 2.1. Pravidla pro skořepinovou nosnou strukturu [2]

Základní pravidla „Formula Student Rules 2018“ pro nosnou strukturu jsou zadána s uvažováním svařeného příhradového rámu z ocelových trubek. V této kapitole představuji vybraná pravidla, která se týkají nabízené alternativy – skořepinové nosné struktury neboli monokoku, s výpočtem ekvivalence:

#### T3.1 Definice nosné struktury

Primární nosná struktura – skládá se z následujících komponentů:

- 1) Hlavní oblouk
- 2) Přední oblouk
- 3) Výztuhy obou oblouků
- 4) Boční nárazová přepážka (Side Impact Structure, SIS)
- 5) Přední nárazová přepážka (Front Bulkhead, FBH) a její podpěra (Front Bulkhead Support Structure, FBHS)

#### T3.2.4 Obecné požadavky monokoku

Všechny kalkulace ekvivalence se vztahují k oceli s minimálními vlastnostmi:

- Youngův modul ( $E$ ) = 200 GPa
- Mez kluzu ( $S_y$ ) = 305 MPa
- Mez pevnosti ( $S_u$ ) = 365 Mpa

Pro výpočet v oblasti svarů:

- Mez kluzu ( $S_y$ ) = 180 MPa



- Mez pevnosti ( $S_u$ ) = 300 Mpa

### T3.4 Kompozitní struktury

Kde je uvedeno v pravidlech, tuhost profilu EI v monokoku musí být počítána, jako plochý nosník stejného složení podle neutrální osy ohybu. Zakřivení panelu a geometrický průřez monokoku musí být pro tyto výpočty zanedbán.

### T3.5 Testování laminátu

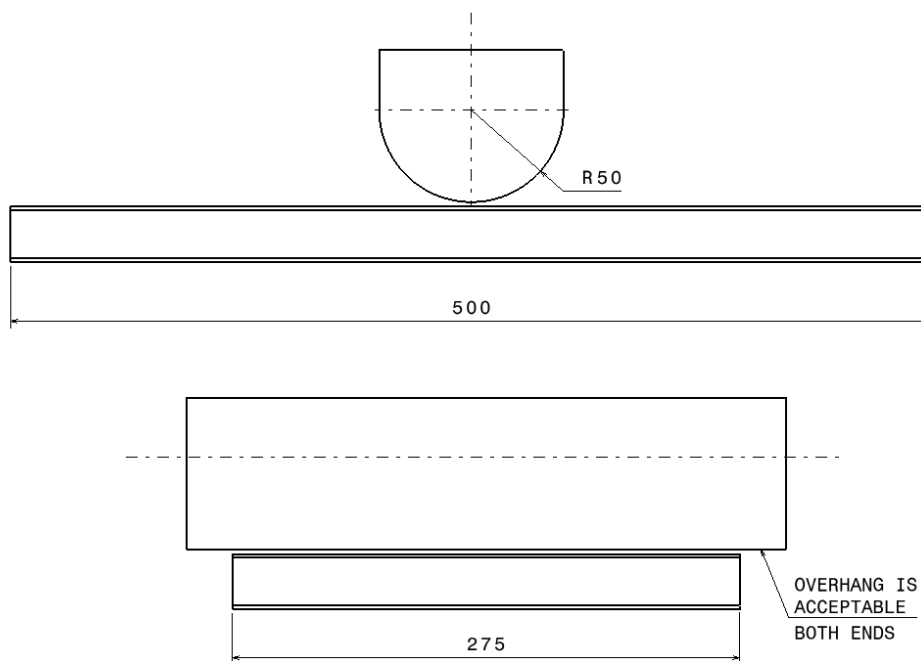
T3.5.1 Laminát SIS – Tým musí vyrobit reprezentativní vzorek se stejným složením laminátu, a výrobní metodou, jaká je použita v SIS monokoku, a provést na něm test tříbodovým ohybem. Fyzickým testem na vzorku o rozměrech 275 mm x 500 mm musí být prokázány stejné hodnoty modulu v ohybu, meze kluzu, meze pevnosti a absorbované energie, jaké by měli dvě nahrazené ocelové trubky dle T3.27.

T3.5.2 Tým musí provést kontrolní test na dvou ocelových trubkách, kvůli jakékoliv nepřesnosti testovacího zařízení a naměření absorbované energie.

T3.5.3 Primární nosná struktura jiná, jako SIS – Tým musí vyrobit reprezentativní vzorky pro každou skladbu potahů, použitých v ostatních kontrolovaných komponentech nosné struktury a provést na nich testy tříbodovým ohybem. Naměřené sloužit k odvození.

T3.5.6 Přípravek pro testování dle T3.5.3, musí být z kovu a mít poloměr 50 mm. Přípravek má přesahovat testovaný vzorek, aby se zamezilo namáhání hranou. Není povoleno přidat jakýkoli materiál mezi přípravek a vzorek.

T3.5.9 Stříhová zkouška zahrnuje měření síly nutné k protlačení plochého válcového indentoru o průměru 25 mm přes testovaný laminát. Vzorek o rozměrech minimálně 100 mm x 100 mm musí být vyroben se stejnou skladbou, a stejnou výrobní metodou, jako laminát v monokoku. Přípravek musí podepřít celý vzorek, až na kruhovou díru o průměru 32 mm, souose nastavenou k indentoru. Globální maximum v grafu zatížení k deformaci musí splnit požadavky pravidla T3.15.2/T3.14.4 níže.



Obrázek 9 Ilustrace pravidel T3.5.6 [2]

### T3.13 Přední nárazová přepážka

Tato oblast nahrazuje 4 ocelové trubky průměru 25 mm s tloušťkou stěny 1,2 mm, dle minimálních požadavků. Na tuto přepážku je následně přišroubován čtyřmilimetrový hliníkový plech s deformačním prvkem pro pohlcení energie při případném čelním nárazu vozu. Navíc přední nárazová přepážka musí mít pevnost ve stříhu ekvivalentní k 1,5 mm hrubému ocelovému plechu stejného obvodu.

### T3.14 Podpěra přední nárazové přepážky

T3.14.1-2 Je definována jako oblast mezi předním obloukem, a přední nárazovou přepážkou. Tato struktura musí nahradit dohromady šest ocelových trubek průměru 25 mm s tloušťkou stěny 1,2 mm, dle minimálních požadavků. Na tuhle strukturu se také připevňuje přední náprava vozu.

T3.14.3 Pevnost ve stříhu v této oblasti musí být minimálně 4 kN dle testu T3.5.9.

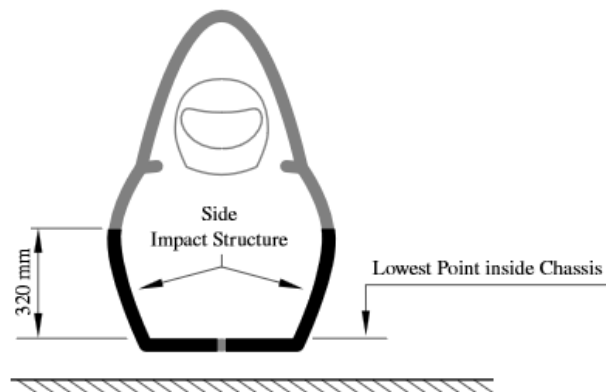
### T3.15 Boční nárazová přepážka

T3.15.2 Je definována jako oblast mezi hlavním a předním obloukem podélně, a od horní strany podlahy do výšky 320 milimetrů svisle. Tuhost tohoto profilu musí být ekvivalentní k tuhosti dohromady tří ocelových trubek průměru 25 mm s tloušťkou stěny 1,2 mm.

Svislá část této oblasti od horní strany podlahy do výšky 320 milimetrů od země musí nahradit dvě a podlaha jednu ocelovou trubku dle minimálních požadavků.

Svislá část této oblasti od horní strany podlahy do výšky 350 milimetrů od země musí být schopna absorbovat deformační energii vyšší, než absorbují dvě ocelové trubky, které nahrazuje. Důkazem je fyzické testování dle T3.5.1 a T3.5.3.

Pevnost ve stříhu v této oblasti musí být minimálně 7,5 kN dle testu T3.5.9.



Obrázek 10 Ilustrace pravidel T3.15 [2]

#### T4.5 Přípojné body bezpečnostních pásů

T4.5.2 Přípojné body pro uchycení ramenních a břišních bezpečnostních pásů musí být schopny přenést zatížení silou 13 kN.

Přípojné body pro uchycení kyčelních pásů, které zabraňují dopřednímu posunutí pilota musí být schopny přenést zatížení silou 6,5 kN.

T4.5.4 Pravidlo T4.5.2 musí být ověřeno fyzickým testem vzorků na trhacím zařízení. Hrana podpěry vzorku musí být vzdálená minimálně 125 mm od místa působení síly.



Obrázek 11 Uchycení pilota pomocí šestibodových pásů [3]

## **2.2. Neregulované zatížení a přípojné body**

Jedním z nejdůležitějších faktorů závodního šasí je optimální tuhost v oblasti

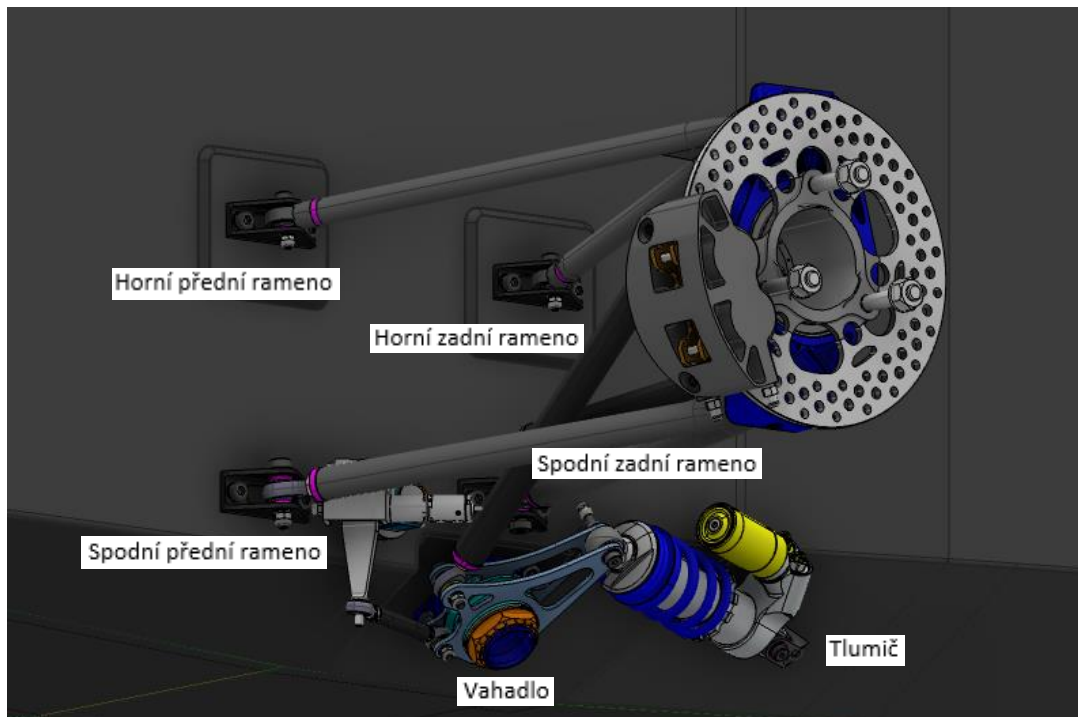
přípojných bodů zavěšení. Nadměrná poddajnost v těchto oblastech se přenesou do prvků zavěšení, což bude mít za následek nesprávné nastavení kol a ztrátu přilnavosti. Při navrhování šasi je důležité znát vnější síly a jejich vliv. Zatímco pravidly regulovaná zatížení poskytují přímý zatěžovací stav, to samé nelze říci o zatížení od zavěšení. K identifikaci sil, které působí od kol prostřednictvím závěsných spojů je nutné znát takzvané zatížení kola. Z informací o pneumatikách, celkové hmotnosti vozidla, výšky těžiště, aerodynamické přítlačné síly a očekávaného nejhoršího nárazového zatížení od nerovnosti, je možné provést dobrý odhad zatížení kola při různých situacích během jízdy. Je třeba zmínit, že kola jsou vysoce dynamická a plně pochopit pneumatiky je velice komplikovaná oblast. Proto je nutné učinit některá zjednodušení při analýze různých zátěžných stavů.

Hmotnost s jezdcem [kg]	263
Celkové rozměry D/Š/V [mm]	2930/1390/1180
Rozvor [mm]	1530
Rozchod kol P/Z [mm]	1140/1100
Výška těžiště [mm]	270
% statické zátěže na zadní kola	52
Přítlačná síla při 80 km/h [N]	925
Maximální výkon motoru [kW]	61

Tabulka 1 Vlastnosti vozu FS.10

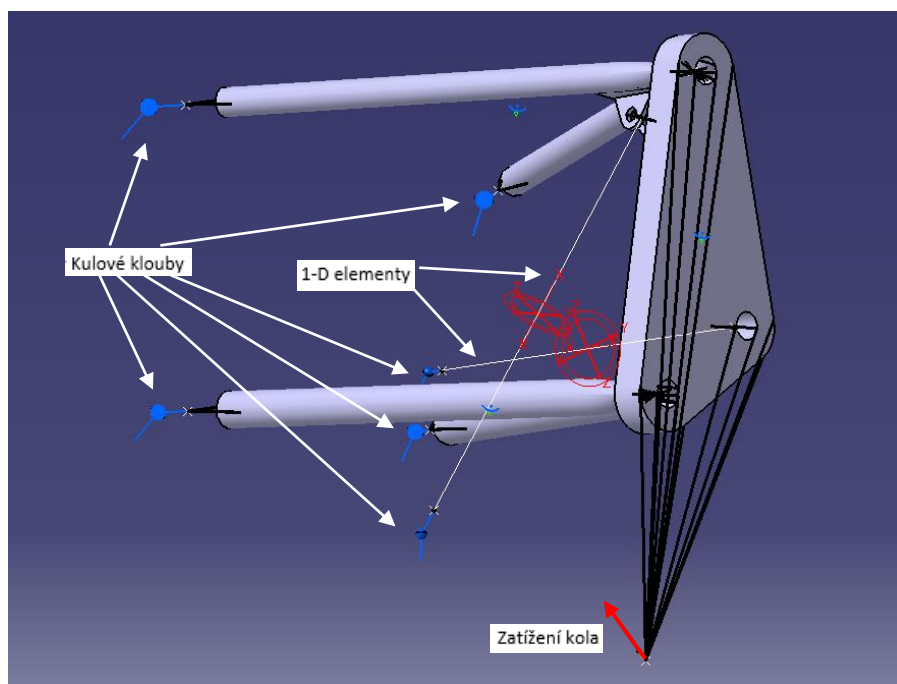
Na základě údajů uvedených v tabulce 1, dat ze zkoušky pneumatik a údajů shromážděných během testování s předchozím vozem, byl sestaven soubor realistických zátěžných stavů. Zátěžové stavy jsou indikovány násobkem tíhového zrychlení  $g$  působícího v těžišti, a k němu odpovídající zatížení kol. Referenční zatížení je síla působící na auto ve stacionárním stavu, která se rovná  $1 g$ .

- $2 g$  zatáčení s  $2 g$  nárazem (boční a vertikální síla)
- $2 g$  brzdění s  $3 g$  nárazem (podélná a vertikální síla)



Obrázek 12 Model zavěšení levého předního kola FS.10

X je podélný směr, Y je boční směr a Z je vertikální směr. Jedná se o pětivrzkové zavěšení. V softvéru CATIA V5 byl následně sestaven výpočetní model. Horní a spodní ramena jsou svařence, takže byla modelována jako solid, pouze jejich připojení na kulový kloub bylo nahrazeno virtuálním elementem. Čistě prutové prvky, jakými jsou pull-rod a tyč řízení byly nahrazeny 1-D elementy s parametrem průřezu.



Obrázek 13 Simulační model v CATIA V5

V tabulce 2 níže jsou výsledky výpočtu. Zeleně je vyznačené zatížení od kola, červeně pak normalizované zatížení jednotlivých přípojných bodů jako výsledek výpočtu.

First case (Braking max, downforce 35m/s, 3g bump):					Second case (Roll max, downforce 15m/s, 2g bump):						
Static+aeromax+pitchno anti:				FNz=	1512 N	Static+aero15m/s+Rollmax:				FNz=	1251 N
	X [N]	Y [N]	Z [N]	Norm [N]		X [N]	Y [N]	Z [N]	Norm [N]		
Zatížení od kola	-4839	0	3024	5706	Zatížení od kola	0	-4377	2501	5041		
Horní přední	-3291	7168	923	7941	Horní přední	57	-102	-6	117		
Horní zadní	-912	-3506	-636	3679	Horní zadní	212	803	148	843		
Spodní přední	6875	-17261	-1404	18633	Spodní přední	-924	2399	195	2578		
Spodní zadní	2306	11521	392	11756	Spodní zadní	553	2831	104	2887		
Vahadlo	546	5437	336	5475	Vahadlo	208	2326	20	2335		
Tlumič	-28	-3359	-2742	4336	Tlumič	-105	-3730	-3048	4818		

Tabulka 2 Síly od zatížení kol pro dva zátěžové stavy

### 3. Teorie

V této kapitole se budu věnovat popisu vlastností kompozitů, sendvičovým strukturám a vložkám.

#### 3.1. Kompozit [3] a [4]

Kompozitním materiálem rozumíme heterogenní systém složený minimálně ze dvou fází. Jednotlivé fáze mají rozdílné mechanické, chemické a fyzikální vlastnosti. Základní vlastností kompozitních materiálů je tzv. synergismus. Synergismus spočívá v tom, že vlastnosti výsledného kompozitu jsou vyšší, než kdybychom v poměru jednotlivých fází sečetli vlastnosti těchto fází. Toto nám umožňuje vyvíjet a vytvářet materiály, jejichž vlastnosti si do jisté míry můžeme určovat a měnit dle naší potřeby, například skrze skladbu kompozitu, pomocí orientace jednotlivých složek či volbou materiálu matrice či výztuže. Toto je způsobeno brzděním lomové trhliny na rozhraní matrice a výztuže. Na tomto rozhraní dochází k odklonu směru šíření trhliny a k intenzivnímu tření mezi maticí a výztuží. Kvalita tohoto rozhraní a vzájemná adheze mezi maticí a výztuží má tedy určující vliv na výsledné vlastnosti kompozitu. Z tohoto důvodu jsou vlákna určená pro kompozitní výrob u povrchově upravována, aby bylo dosaženo co nejlepších vlastností na rozhraní matrice–výztuž.

Jak bylo řečeno výše, kompozitní materiály jsou tvořeny dvěma základními složkami: maticí (pojivem) a výztuží. Matrice je spojitá fáze kompozitu, která slouží jako pojivo a zajišťuje dostatečné prosycení přítomné výztuže, čímž je zaručen spojitý přenos napětí na rozhraní fází. Úkolem matrice je také zajištění geometrické polohy vláken a tvarové stálosti výrobku při současné ochraně kompozitu proti vnějším vlivům. Z tohoto důvodu jsou matrice obvykle chemicky stálé látky s odolností proti různým druhům chemického prostředí. Optimálního efektu matrice je dosaženo tehdy, dojde-li ke smáčení výztuže bez jakýchkoliv defektů (např. vzduchové bubliny či hromadění výztuže v jednom místě) a k maximální možné adhezivě rozhraní matrice a výztuže. V tomto případě dojde k ideálnímu přenesení působících sil z matrice, která má horší mechanické vlastnosti, na částice či vlákna výztuže, která má výrazně lepší mechanické charakteristiky.

Nespojitou fází kompozitu tedy nazýváme výztuž. Oproti maticí bývá pevnější a dosahuje mnohem lepších mechanických vlastností. Výztuž je ovšem zpravidla mnohem náchylnější na vlivy okolního prostředí a současně je ve srovnání s maticí mnohem křehčí. V porovnání s pojivem bývá také výztuž výrazně dražší.

### Rozdělení kompozitů podle geometrického tvaru výztuže

- částicové – kulovité, destičkovité, tyčinkovité
- vláknové – výztuž je v jednom směru výrazně delší než v ostatních směrech
  - s krátkými vlákny – délka vláken je výrazně menší ve srovnání s délkou daného výrobku
  - s dlouhými vlákny – délka vláken je srovnatelná s délkou výrobku



Tabulka 3 Síly od zatížení kol pro dva zátěžové stavy

#### 3.1.1. Vláknové kompozity [5]

Vlastnosti výsledného kompozitu jsou tedy ovlivněny mechanickými, fyzikálními a chemickými vlastnostmi matrice a vláken. Další faktor výrazně ovlivňující výsledné vlastnosti je objemový podíl vláken a v neposlední řadě jejich uspořádání. Jsou-li vlákna uspořádána v jednom směru, pak dosahují v tomto směru také nejlepších vlastností. Požadujeme-li vysokou pevnost a tuhost ve dvou směrech, pak používáme struktury vyztužené spletenými vlákny.

Známe-li moduly pružnosti matrice a vláken  $E_M$ ,  $E_V$ , pak pro modul pružnosti kompozitu  $E_K$  v kompozitu s dlouhými vlákny v jednom směru platí směšovací pravidlo:

$$E_{K1} = E_V V_V + E_M V_M \quad (1)$$

kde objemový podíl vláken  $V_V = 1 - V_M$  a  $E_{K1}$  je modul pružnosti ve směru shodném se směrem vláken. Vztah platí pouze pro dokonalou adhezi mezi vláknem a matricí a za předpokladu stejné deformace těchto složek. Pro reálné vztahy se do vztahu (1) zavádí tzv. adhezní koeficient  $A \in \langle 0; 1 \rangle$  u běžných kompozitů je  $A \approx 0,8$ .

$$E_{K1} = A E_V V_V + E_M V_M \quad (2)$$

Pro smykový modul pružnosti  $G_{K12}$  v rovině vláken a příčný modul pružnosti  $E_{K2}$  platí:

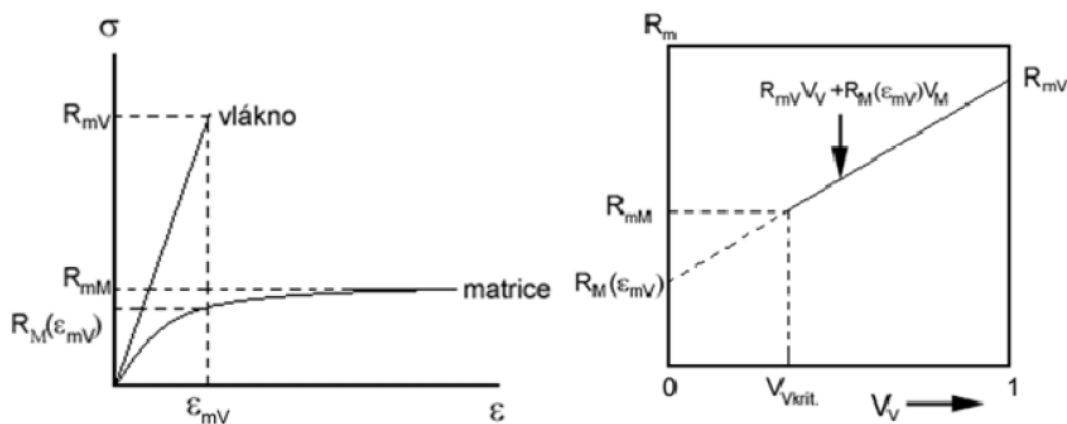


$$\frac{1}{G_{K12}} = \frac{V_M}{G_M} + \frac{V_V}{G_V} \quad (3)$$

$$\frac{1}{E_{K2}} = \frac{V_M}{E_M} + \frac{V_V}{E_V} \quad (4)$$

Dalším základním parametrem kompozitů je jejich pevnost  $R_{mK}$ . Napětí ve vláknech v okamžiku lomu je rovno pevnosti vláken  $R_{mV}$ , napětí v matrici je však nižší než pevnost matrice  $R_{mM}$ . Důvodem je, že deformace matrice je shodná s deformací vláken i kompozitu, z toho vyplývá, že je výrazně nižší než mezní deformace matrice. Napětí v matrici v okamžiku lomu označujeme  $R_M$  a lze je definovat jako napětí v matrici odpovídající kritické deformaci vláken. Pro pevnost kompozitu s dlouhými vlákny platí ve směru vláken směšovací pravidlo podobné vztahu (1)

$$R_{mK} = R_{mV} \cdot V_V + R_M \cdot V_M \quad (5)$$

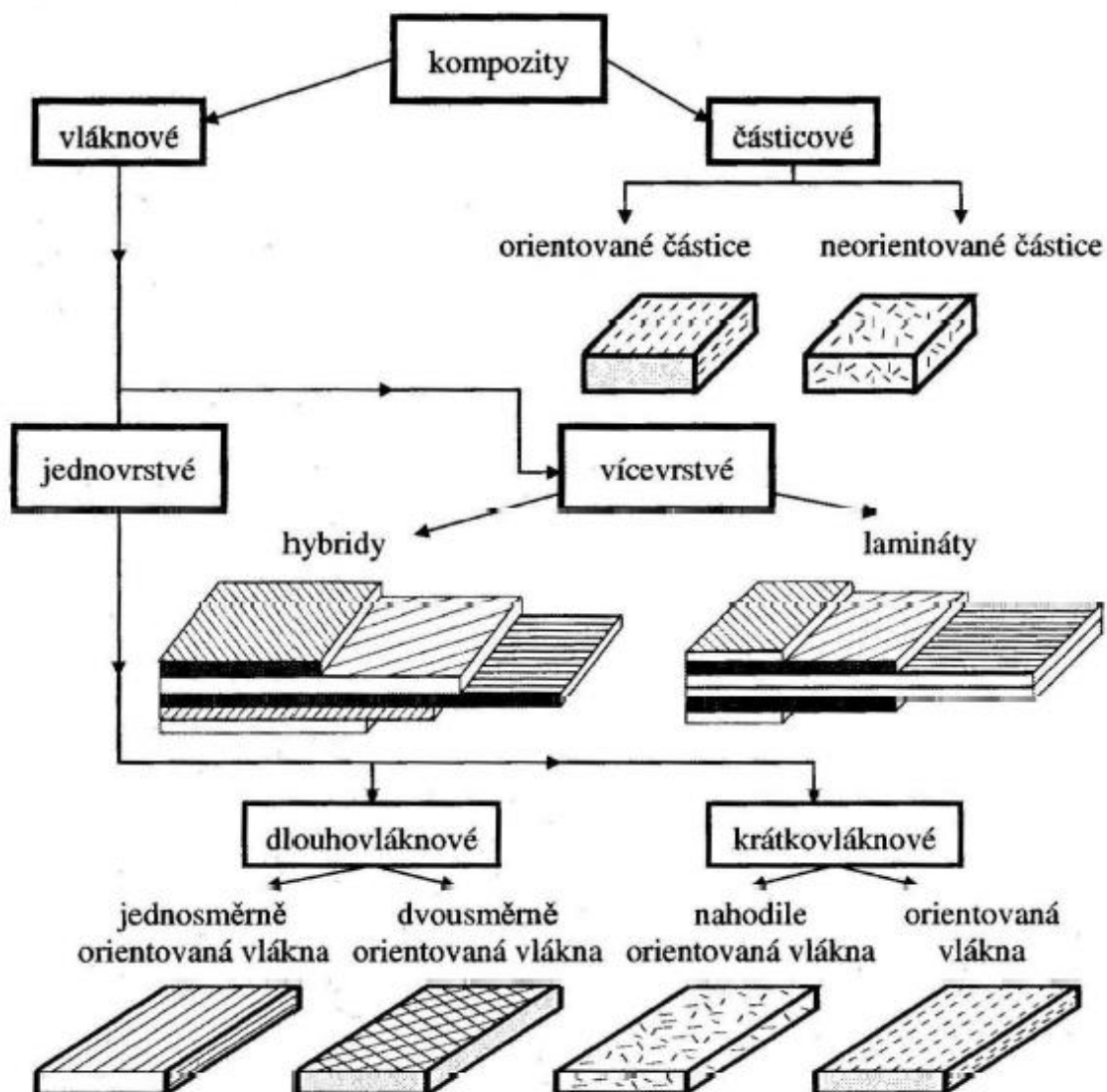


Obrázek 14a) Tahový diagram vlákna a matrice b) Závislost pevnosti kompozitu na objemovém podílu vláken [5]

K tomu, aby došlo ke zvýšení pevnosti kompozitu oproti samotné matrici, je třeba určitého minimálního podílu vláken. viz. obr. 15. Pokud je objemový podíl vláken příliš nízký, je jejich působení neúčinné z důvodu rychlého dosažení kritické deformace vláken. V takovém případě by pevnost kompozitu byla dána pouze pevností matrice. Minimální objemový podíl vláken vedoucí ke zpevnění matrice se nazývá kritický objemový podíl vláken  $V_{Vkrit}$  a lze ho vypočítat tak, že pravou stranu rovnice (6) položíme rovnu pevnosti

matrice  $R_{mM}$ . Pro kritický objemový podíl vláken tedy platí:

$$V_{Vkrit} = \frac{R_{mM} - R_M}{R_{mV} - R_{mM}} \quad (6)$$

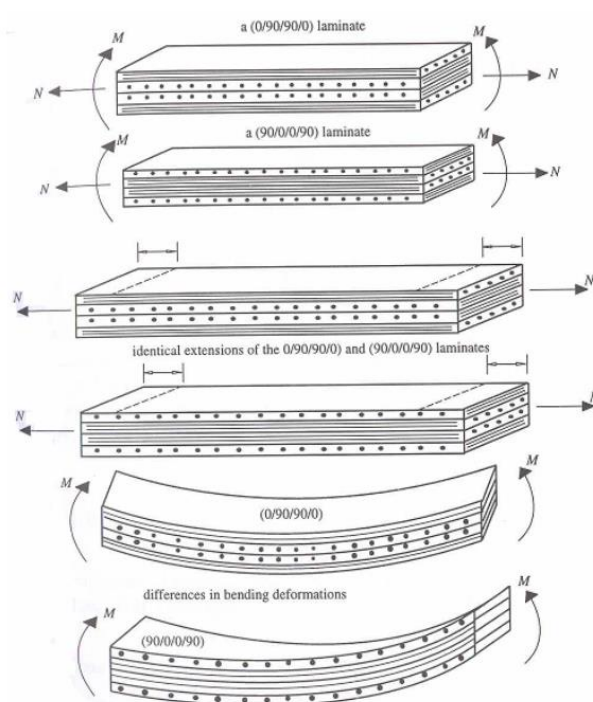


Obrázek 15 Hlubší rozdělení kompozitů [6]

### 3.1.2. Rozdělení laminátů [7]

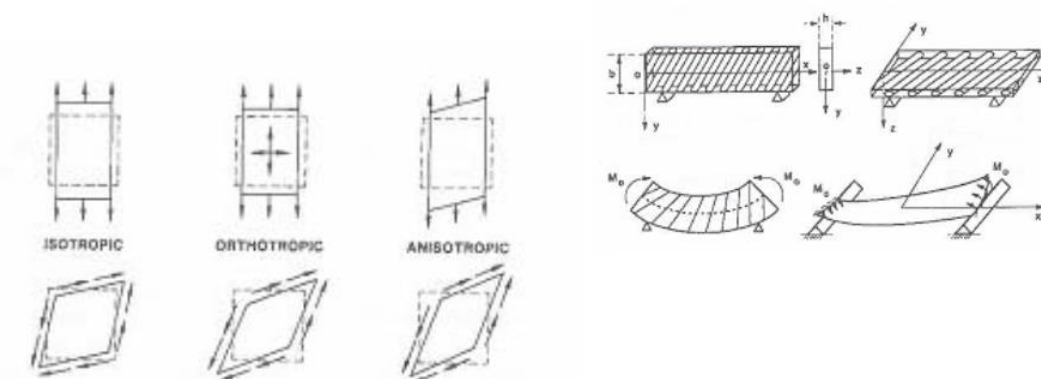
Konstrukční kompozitní laminát je vytvořen nakladením jednotlivých vrstev vyztužených lamin na sebe a jejich následným permanentním spojením (slepením) za působení tepla a tlaku (vakuování, autokláv, pŕltruze, atd.). Použitím klasické laminační teorie (CLT) lze odvodit tuhost výsledného komp. laminátu z jeho jednotlivých vrstev (lamin). U kompozitních materiálu se setkáváme s množstvím zajímavých jevů, které u

klasických izotropních materiálů nemohou nastat. Například pouhou záměnou posloupnosti skladby jednotlivých vrstev dosáhneme odlišných mechanických vlastností. Na obr. 16 jsou ukázány dva kompozitní lamináty se skladbou (0/90/90/0) a (90/0/0/90). Oba mají stejnou geometrii, čtyři vrstvy stejné tloušťky a působí na ně stejná axiální síla  $N$  a ohybový moment  $M$ . Avšak (0/90/90/0) vykazuje tužší chování v ohybu, než (90/0/0/90) kvůli větší efektivní vzdálenosti vrstev ve směru 0. Tento příklad ukazuje velkou výhodu kompozitních materiálů, pouhou záměnou skladby a orientace vláken můžeme měnit a optimalizovat mechanickou odezvu konstrukce.



Obrázek 16 Podélná a ohybová deformace dvou „cross-ply“ laminátů s různou posloupností skladby vrstev [7]

S různou skladbou a orientací dostaneme různou odezvu na zatížení.



Obrázek 17 Izotropní, ortotropní, anizotropní materiál, efekt zdvojení (coupling) ohybové/kroucí deformace [7]

Rozeznáváme:

- Symetrický laminát: laminát je symetrický, když ke každé vrstvě na jedné straně od střednice existuje další vrstva stejné tloušťky, materiálových vlastností a orientace ve stejné vzdálenosti na druhou stranu od střednice např. (+45/-45/0/90/90/0/-45/+45).
- Balanced (vyvážený) laminát: laminát je vyvážený, když pro každou vrstvu specifické tloušťky, materiálových vlastností a směru vláken existuje další vrstva někde v laminátu se stejnou tloušťkou, materiálem, ale opačnou orientací vláken. Jak (0/45/90/-45) tak (0/-30/60/30/90/-60) jsou vyvážené (úhly 0 a 90 jsou vzájemně opačné).
- Angle-ply laminát: každá vrstva má buď  $+\theta$  nebo  $-\theta$  např. (30/-30/30-30).
- Cross-ply laminát: každá vrstva má buď 0 nebo 90 (0/90/0/90).
- Quasi isotropic laminát: každá vrstva má buď 0, 90, +45 nebo -45 symetricky složených vzhledem ke střednici (+45/-45/0/90/90/0/-45/+45) (tato skladba je vždy symetrická a vyvážená).

### 3.1.3. Základní rovnice laminátů [6]

Klasická laminační teorie:

- vztah mezi silovými účinky a deformacemi laminátu
- stav rovinné napjatosti v lamině
- zanedbává příčná smykové napětí
- normála ke střednici zůstává normálou i po deformaci
- tloušťka laminy podstatně menší než ostatní rozměry

- dokonale tuhé rozhraní mezi vrstvami

Konstitutivní rovnice laminátové desky vyjadřuje síly a momenty v závislosti na deformacích ve střední rovině a na křivosti. Matice vyjadřující vazbu mezi těmito veličinami se nazývá celková matice tuhosti nebo globální matice tuhosti. Ze vztahu je zřejmé, že matice **A** váže složky sil s deformacemi ve střední rovině. Matice **D** vyjadřuje vazbu mezi složkami momentů a křivostí plochy. Matice vazební tuhosti **B** váže složky momentů a složky deformace ve střední rovině a zároveň složky vektorů vnitřních sil se složkami křivosti plochy. Znamená to, že normálové a smykové síly působící ve střední rovině způsobí nejen přetvoření ve střední rovině, ale také ohýbání a zkroucení střední plochy. A zároveň složky ohybového momentu způsobí přetvoření ve střední rovině laminátu. Protože matice **A** a **D** mají všechny prvky nenulové, existuje také vazba mezi normálovými silami  $N_x$ ,  $N_y$  a smykovou deformací  $\gamma_{xy}^\circ$ . a zároveň mezi ohybovými momenty  $M_x$ ,  $M_y$  a zkroucením  $k_{xy}$ .

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \\ M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} & B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ A_{21} & A_{22} & A_{26} & B_{21} & B_{22} & B_{26} \\ A_{61} & A_{62} & A_{66} & B_{61} & B_{62} & B_{66} \\ B_{11} & B_{12} & B_{16} & D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ B_{21} & B_{22} & B_{26} & D_{21} & D_{22} & D_{26} \\ B_{61} & B_{62} & B_{66} & D_{61} & D_{62} & D_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx}^\circ \\ \varepsilon_{yy}^\circ \\ \gamma_{xy}^\circ \\ k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{bmatrix} ; \text{ nebo } \begin{bmatrix} \mathbf{N} \\ \dots \\ \mathbf{M} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \vdots & \mathbf{B} \\ \dots & \vdots & \dots \\ \mathbf{B} & \vdots & \mathbf{D} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{\varepsilon}_m^\circ \\ \dots \\ \mathbf{k} \end{bmatrix} \quad (7)$$

Kde **A** je matice tahové tuhosti,  
**B** je matice vazební tuhosti,  
**D** je matice ohybové tuhosti.

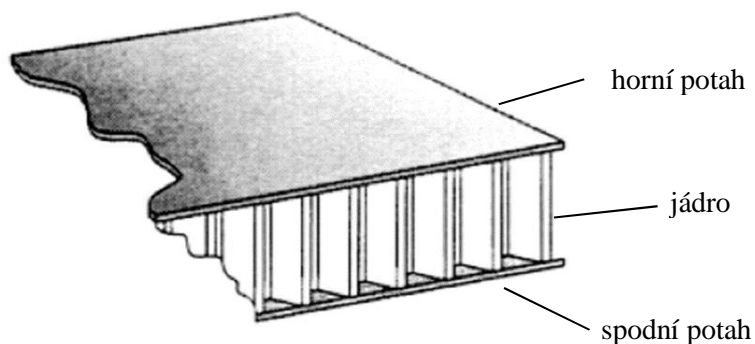
Vztah (7) slouží k výpočtu sil a momentů v závislosti na deformacích a křivostech. Ve většině případů je cílem vyšetřit napětí a deformaci v každé lamině tvořící laminát v závislosti na vnějším zatížení. Vektor deformace  $\boldsymbol{\varepsilon}_m^\circ$  a křivosti  $\mathbf{k}$  lze získat inverzí vztahu (7).

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{xx}^{\circ} \\ \varepsilon_{yy}^{\circ} \\ \gamma_{xy}^{\circ} \\ k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{A}_{11} & \bar{A}_{12} & \bar{A}_{16} & \bar{B}_{11} & \bar{B}_{12} & \bar{B}_{16} \\ \bar{A}_{21} & \bar{A}_{22} & \bar{A}_{26} & \bar{B}_{21} & \bar{B}_{22} & \bar{B}_{26} \\ \bar{A}_{61} & \bar{A}_{62} & \bar{A}_{66} & \bar{B}_{61} & \bar{B}_{62} & \bar{B}_{66} \\ \bar{B}_{11} & \bar{B}_{12} & \bar{B}_{16} & \bar{D}_{11} & \bar{D}_{12} & \bar{D}_{16} \\ \bar{B}_{21} & \bar{B}_{22} & \bar{B}_{26} & \bar{D}_{21} & \bar{D}_{22} & \bar{D}_{26} \\ \bar{B}_{61} & \bar{B}_{62} & \bar{B}_{66} & \bar{D}_{61} & \bar{D}_{62} & \bar{D}_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \\ M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} \quad (8)$$

Matice  $\mathbf{A}^*$ ,  $\mathbf{B}^*$ ,  $\mathbf{D}^*$  jsou v tomto případě matice poddajnosti.

### 3.2. Sendviče [1]

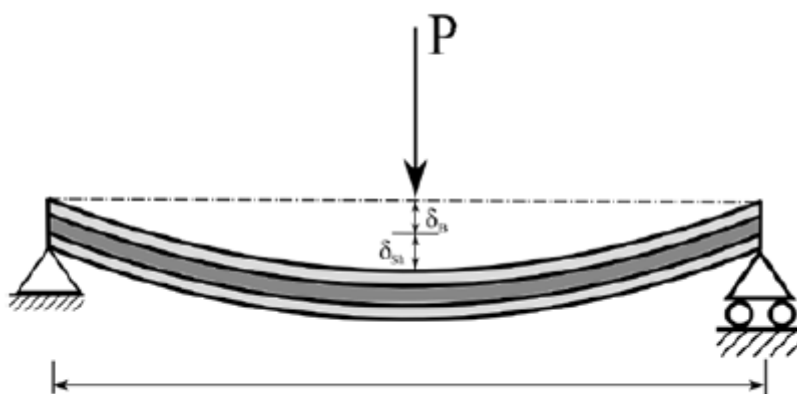
Konstrukční sendvič je speciální formou laminovaného kompozitu sestaven z kombinace různých materiálů, které jsou spojeny k sobě navzájem tak, aby využívaly vlastnosti jednotlivých prvků ke zlepšení vlastností celé sestavy. Monokok z uhlíkových vláken je lehká sendvičová struktura s vložkami v zátěžově intenzivních přípojních bodech. Kombinace tuhosti a nízké hmotnosti sendvičové struktury je nejvhodnější pro toto použití.



Obrázek 18 Sendvičová konstrukce [3]

Obr. 16 Sendvičová konstrukce [3]

Sendvičový panel je tvořen silným (tlustým) jádrovým materiálem, na kterém jsou z obou stran připevněny vnější potahy. Jádro je obvykle materiál s nízkou pevností a hustotou, typické jádrové materiály bývají různé typy pěn nebo materiál ve tvaru voštiny. Lamináty ze sklených nebo uhlíkových vláken jsou běžně používány jako potahy, ale také je možné použít tenký plech. Úlohou jádra je odolávat smykovému zatížení mezi potahy a tím zvyšuje tuhost konstrukce tím, že dává panelu tloušťku a drží potahy od sebe. Když je vystaven ohybu, potahy jsou zatíženy tahem a tlakem. Jak je znázorněno na obr. 17, vychýlení sendvičového paprsku je tvořeno jak ohybem, tak smykem. Velikost vychýlení od smyku v sendvičovém laminátu závisí od modulu ve smyku jádra a jeho tloušťky.



Obrázek 19 Ohyb sendvičového panelu [1]

Tím, že provedeme některá zjednodušení a ignorujeme efekty vyššího řádu, lze předpokládat, že platí teorie prostého nosníku. Tato metoda sice není stoprocentně přesná, je ale pro naše použití dostatečná. Pro ozřejmění, klasická teorie ignoruje lokální účinky v okolí bodových zatížení nebo oblastí podpory. Klasická teorie také ignoruje účinky nesymetrického laminátu. Odvozené diferenciální rovnice pro sendvičové nosníky tedy následovně:

$$D_s d^4 \frac{wb}{dx^4} = 0 \quad (\text{deformace ohybem prostého nosníku}) \quad (7)$$

$$\frac{dw_s}{dx} = \frac{-F}{2A_s G_c} \quad (\text{deformace od smyku}) \quad (8)$$

Když aplikujeme okrajové podmínky pro třibodový ohyb, dostaneme rovnici průhybu v místě působení síly:

$$\delta_{\text{Tot}} = \delta_B + \delta_{\text{Sh}} = \frac{Pl^3}{48D} + \frac{Pl}{4S} \quad (9)$$

D je tuhost profilu:

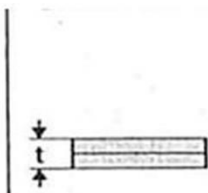
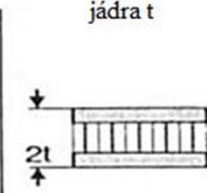
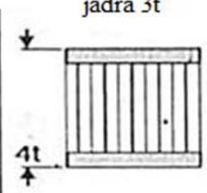
$$D = EI = \frac{Eftfh^2b}{2} \quad (10)$$

S je smyková tuhost:

$$S = bhGc \quad (11)$$

Z rovnic (9), (10) a (11) je zřejmé, že výška jádra má největší dopad na ohybovou tuhost. Lepený spoj mezi prvky sendviče zaručuje, že se struktura chová, jako jednotný díl s vysokou tuhostí. Další důležitou vlastností je, že má panel po celé svojí délce stejnou tuhost, pokud se neporuší.

Potahy jsou zatěžované tlakovým a tahovým napětím, jádro zase smykovým. Pokud má jádro nízkou pevnost ve smyku, k poruše sendviče dojde smykovou poruchou jádra. Pokud má jádro vysokou pevnost ve smyku, k poruše sendviče dojde pravděpodobně na horním potahu, na němž působí tlakové napětí.

		tloušťka jádra t	tloušťka jádra 3t
			
tuhost	1.0	7.0	37.0
ohybová pevnost	1.0	3.5	9.2
váha	1.0	1.03	1.06

Obrázek 20 Vizualizace přínosu jádra [3]

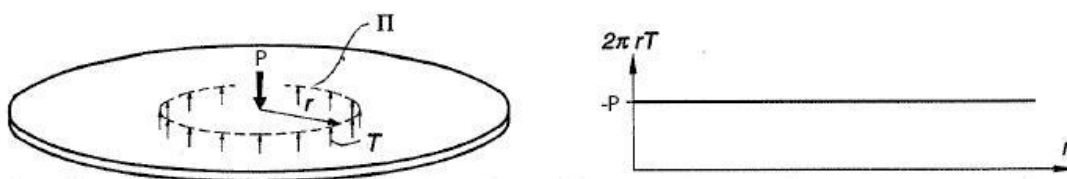


### 3.3. Vložky [1]

Je třeba poznamenat, že předložené výpočty pevnosti vložky jsou z velké části založeny na empirických zkušenostech. Zkoušky byly provedeny různými organizacemi a institucemi a návod se tím pádem bude lišit v různých vzdělávacích a obchodních kruzích. Existují solidní a spolehlivé příručky a návody k návrhu vložek jak od Evropské kosmické agentury (ESA), tak od firmy Boeing. Svoji podstatou sendvičové panely snáší koncentrované zatížení špatně, protože vnější potahy jsou velmi tenké, zatímco jádro je obvykle z materiálu se špatnými vlastnostmi.

Tato kombinace způsobuje nedostatečnou schopnost efektivně přenést lokalizovanou zátěž do struktury. Téměř všechna zatížení působící na monokok můžou být považována za bodová / koncentrovaná zatížení. S ohledem na tuto skutečnost je potřeba navrhnout řešení pro přenos lokalizovaných zatížení do struktury. Představme si lokalizované nebo koncentrované zatížení sendvičového panelu. Na všech místech kolem zatížení musí být splněna podmínka rovnováhy. Označme obvod a uzavřený úsek kolem vložky  $\Pi$ , a mimo rovinné zatížení jako  $P$ , viz obrázek 19 níže.

Pak se příčné síly podél obvodu  $\Pi$  musí rovnat reakční síle (-)  $Q$ . Čím se poloměr úseku zvětšuje, obvod  $\Pi$  se zvyšuje a z toho vyplývá, že  $T$  klesá. Už v této fázi lze vidět, že reakční síla potřebná pro odolání lokalizovaných zátěží je nepřímo úměrná poloměru  $r$  úseku. Pro zatížení, které mají za následek momenty, bude reakční síla  $T$  nepřímo úměrná  $k r^2$ . Tyto závislosti naznačují, že postižená oblast je poměrně malá, a proto v budoucích výpočtech a simulacích obecně není zapotřebí výpočetní model pro celý panel.



Obrázek 21 Úsek ovlivněn lokálním zatížením [1]

Při normálovém zatížení dochází nejprve k poruše spojení mezi vložkou a okolitým jádrem, následně ke sřížné poruše potahu na vnějším obvodu vložky.

### 3.3.1. Typy vložek podle ESA [8]

Vložky rozdělujeme na tři typy podle způsobu, jakým se integrují do struktury sendviče:

- Typ A se vkládá přímo do skladby při výrobním procesu sendviče
- Typ B se do předem vyrobeného sendviče připojuje pomocí termosetové pryskyřice a to:
  - Procesem „pottingu“, neboli zalévání standartních vložek
  - Ekvivalentním vlepáním pro nestandardní vložky
- Typ C mechanickým připevněním, a to lisovaným, nebo šroubovým svěrným spojem

#### 3.3.1.1. Typ A

Vložky typu A se používají u relativně tenkých sendvičů. Jedná se pouze o monolitický kus materiálu s dírou. Nenabízí žádný způsob pojištění proti uvolnění. Umožňují nám ale rychlý proces výroby. Zároveň tento typ vložky vykazuje nejlepší vlastnosti (pevnost, tuhost). Tento typ vložky bude následně použit pro náš návrh.

#### 3.3.1.2. Typ B

Zalévané vložky s pomocí epoxidové pryskyřice jsou preferovaný typ pro ESA. Nabízí ušetření hmotnosti při sendvičích velké tloušťky, protože neprochází celým průřezem sendviče, jsou pouze vlepěné do předvrtané slepé díry z jedné strany sendviče.

#### 3.3.1.3. Typ C

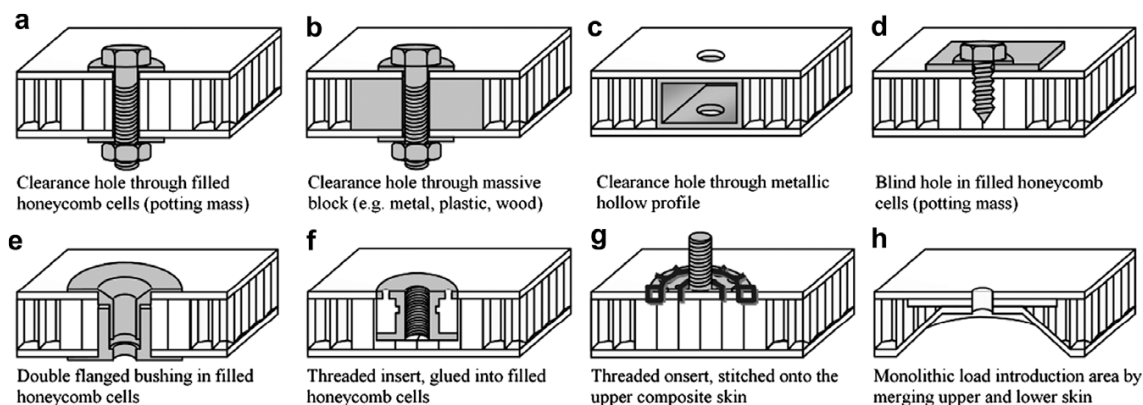
Mechanicky připojené vložky mají signifikantní nevýhody:

- Neexistující přímé spojení mezi vložkou a jádrem způsobuje slabé mechanické vlastnosti
- Musí být vyrobeny na míru podle tloušťky dané oblasti
- Nedokáže dobře přenést případný kroutící moment v spojení

Type	Shape	Diameter (mm)	Material	Potting Considerations	Torque Locking	Thread Locking	Floating Nut Exchange Capability	Standards	Comments
<b>Type A: Bonding during sandwich manufacture</b>									
1		17 to 30	Al	Full bonded with core filler	None or square shape	e.g. Locktite	No	-	The bore hole is drilled after sandwich bonding. Only for small core height.
<b>Type B: Potting (or equivalent non-standard procedure)</b>									
2		11 to 22	Al (St) (Ti)	Partially or fully potted	Planes or riffls	Deformation of tread	No	NAS 1832 NSA 5135 PA 3825 ENN 3GG/386	Al insert can be used with St or Ti screws. Most common type.
3		11 to 22	Al (St) (Ti)	Partially or fully potted	Planes or riffls	Deformation of tread	No	-	Rarely used
4		11 to 14	Al	Fully potted only	Planes or riffls	e.g. Locktite	No	NAS 1832 TAN 16489 PAN 3827 NSA 5071	Available with and without thread.
5		6 to 14	St Ti	Partially or fully potted	Planes or riffls	e.g. Locktite	No	ERNO No. R 000/095.000	Rarely used.
6		3 to 6	St Ti	Partially or fully potted	Planes or riffls	e.g. Locktite	No	-	Only for very low loads. Rarely used.
7		19 to 70	Al	Partially or fully potted	Planes or riffls	e.g. Locktite	No	-	For high loads
8		19 to 25	Al: Insert Ti: Nut	Partially or fully potted	Planes or riffls	Deformation of thread	Yes	NAS 1835 PAN 3829 ENN 379 NSA 5072	Extended and heavy type for applying floating nuts and exchanging capacity.
9		7 to 20	CFRP / Al	Carbon fibre tube bonded into core	N/A	e.g. Locktite, helicoils.	No	No	Carbon fibre tube inserts, [See also: A.3 and F.6]
10		-	-	-	-	-	-	-	[See also 10.3] [Ref. [5-2]]
<b>Type C: Mechanically clamped or screwed</b>									
11		14 to 22	Al (St) (Ti)	-	Adhesive bonding	Deformation of thread	No	TAN 16485	Low pull-out strength, if no connection with core.
		14 to 22	Al (St) (Ti)	-	Adhesive bonding	-	No	-	-

Key: St: steel; Ti: titanium; CFRP: carbon fibre-reinforced plastic

Tabulka 4 Typy vložek podle ESA [8]



Obrázek 22 Další možnosti realizace přípojných bodů Zdroj: <https://www.journals.elsevier.com/composite-structures>

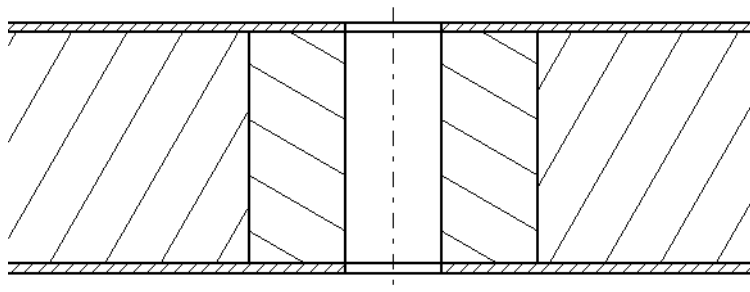
## 4. Návrh vložek

### 4.1. Úvod [2]

Jak už bylo zmíněno v kapitole 3, pro naši sendvičovou strukturu použijeme vložku typu A, a to z dvou důvodů:

- Možnost snadnější a rychlejší výroby výsledného dílu
- Pravidla FSG pro kritické šroubové spoje pravidlem T10.2 předepisují požadavek pojištění proti uvolnění a to způsoby:
  - Pojistným drátem
  - Závlačkou
  - Pojistnou maticí s nylonem (do 80 °C)
  - Lisovanou pojistnou maticí
  - Pojistnou podložkou
  - KM maticí + MB podložkou

Pro naše potřeby je nejvhodnějším způsobem pojištění spoje pojistnou maticí s nylonem (na povrchu monokoku nepředpokládáme vysoké teploty). Vložka typu A nám tento způsob spolu se snadnou výrobou pomocí pozicovacích kolíčků umožňuje.

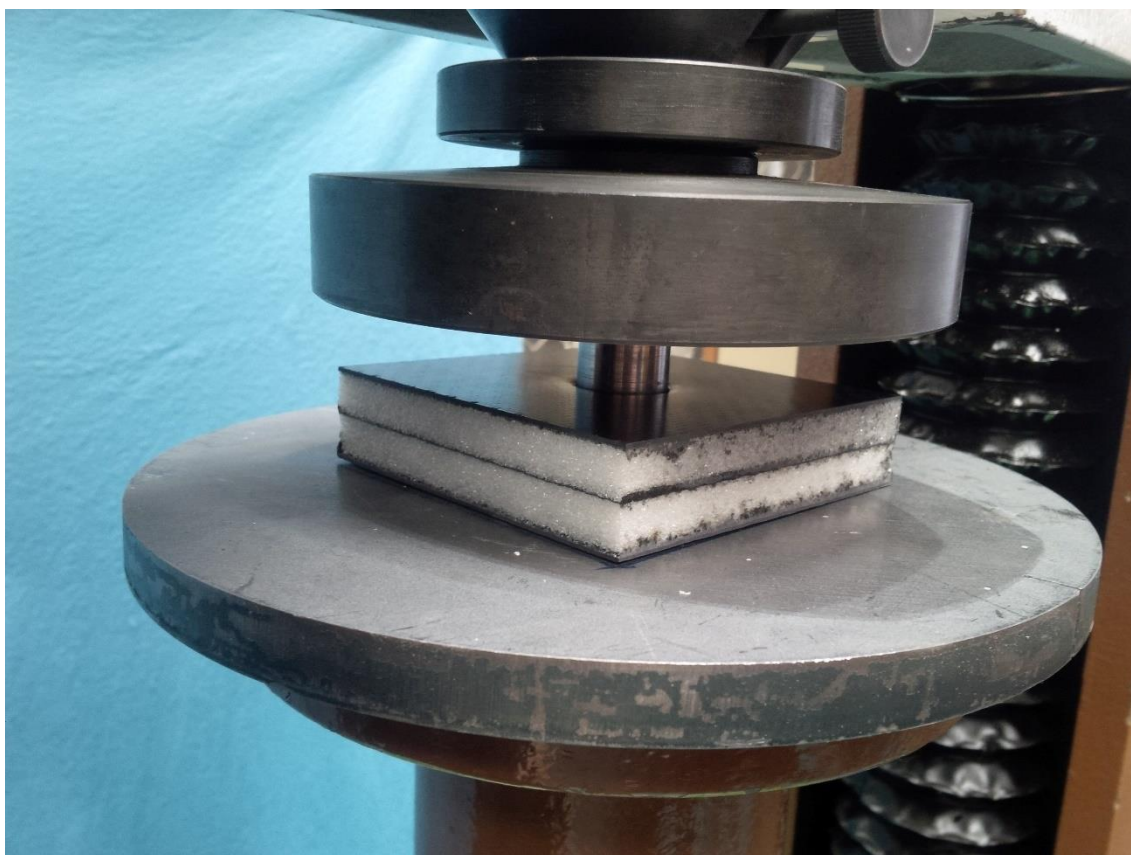


Obrázek 23 Řez v oblasti vložky typu A

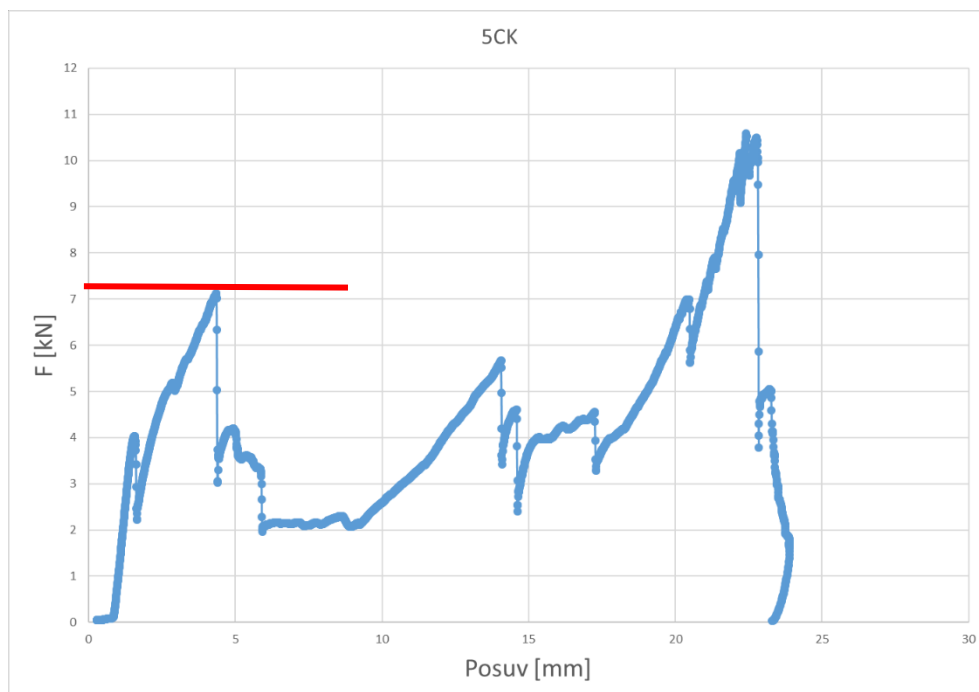
### 4.2. Pevnost potahu ve stříhu [2]

Kromě pravidly regulovaných zatížení pro uchycení bezpečnostních pásů z kapitoly 2.1 a neregulovaných zatížení od předního zavěšení z kapitoly 2.2 potřebujeme k návrhu vložek znát ještě jeden parametr. Tím je takzvaná pevnost ve stříhu a tento jsme získali z předepsané zkoušky podle pravidla T3.5.9. Při této zkoušce se plochý válcový indentor průměru 25 mm protlačí v normálovém směru k vnějšímu potahu sendvičového vzorku. Měří se přitom síla potřebná k prostřížení potahu obvodem indentoru, který následně stlačuje jádro až do okamžiku, než se spodní potah prostříhne o hranu kruhové

díry průměru 32 mm v podpoře, nastavené koaxiálně s osou indentoru. Viz obrázek 23.



Obrázek 24 Střihová zkouška



Graf 1 Výstupní graf střihové zkoušky, červeně vyznačená síla při prostřihení

Pevnost potahu ve střihu dostaneme z nepřímé úměry síle vůči vnějšímu obvodu vložky z kapitoly 3.3:

$$\tau_D = \frac{F_{MAX}}{O \cdot t} = \frac{7124 N}{2\pi 25 mm \cdot 1 mm} = 90,7 MPa \quad (12)$$

### 4.3. Navržené vložky

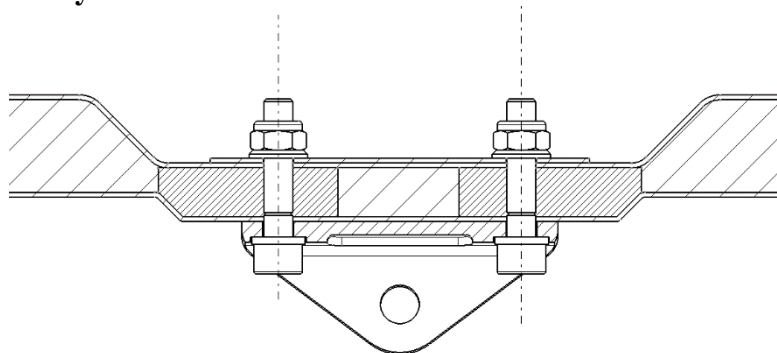
Jak již bylo dříve zmíněno, monokok je samonosnou konstrukcí, což znamená, že ostatní komponenty jsou připojeny přímo k němu. Všechna tato přípojná místa bylo potřeba navrhnout a dimenzovat tak, aby monokok nepřibíral zbytečně na hmotnosti, ale zároveň vydržel působení vnějších sil do něj vnesených přes ostatní komponenty vozu. Jako materiál pro výrobu vložek byl zvolen Ertalon 66GF30. S minimální požadovanou bezpečností  $k=1.2$  jsem navrhnul vložky a počet vrstev v potahu pro všechny body uchycení předního zavěšení a bezpečnostních pásů.

Tau_d=	90,7	Mpa
Tloušťka vrstvy=	0,25	mm
Požadovaná bezp.=	1,2	

	F_x	F_y	F_z	F_red [N]	Vrstvy	Plocha [mm <sup>2</sup> ]	Obvod [mm]	A_strana [mm]	R_roh [mm]	B_strana [mm]	Skutečný obvod [mm]	K_bezpečnost
Spodní přední	6874	-17261	-1403	18632,3	8	205,4	102,7	100	5	60	311,4	3,03
Spodní zadní	2305	11521	392	11755,9	8	129,6	64,8	100	5	50	291,4	4,50
Horní přední	-3291	7167	922	7940,2	5	87,5	70,0	90	10	80	322,8	4,61
Horní zadní	-911	-3506	-636	3677,8	5	40,5	32,4	90	10	80	322,8	9,95
Uchycení vahadla	546	5436	336	5473,7	5	60,3	48,3	60	5	60	231,4	4,79
Uchycení tlumiče	-28	-3359	-2742	4336,2	5	47,8	38,2	80	3	30	214,8	5,62
Ramenní pás	13000	0	0	13000,0	6	143,3	95,6	35	5	35	131,4	1,38
Bedrový pás	13000	0	0	13000,0	6	143,3	95,6	35	5	35	131,4	1,38
Kyčelní pás	6500	0	0	6500,0	6	71,7	47,8	25	5	25	91,4	1,91

Tabulka 5 Rozměry vložek a počet potahů pro jednotlivé uchycovací body

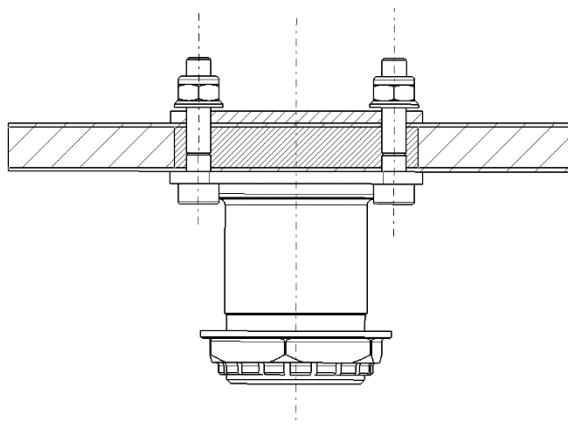
### 4.3.1. Uchycení ramen



Obrázek 25 Řez v místě uchycení

- Skladba [0 45 90 -45 0]<sub>s</sub> u horních ramen, resp. [0 45 90 -45 0 0 0]<sub>s</sub> u spodních
- 2x šroub M6x35 ISO 4762
- 4x podložka 7 ISO 7089
- 2x matice samojistná ISO 10512
- Ocelová 2 mm tlustá podložka

### 4.3.2. Uchycení vahadla

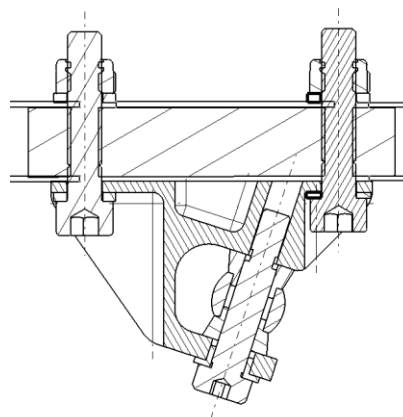


Obrázek 26 Řez v místě uchycení

- Skladba [0 45 90 -45 0]<sub>s</sub>
- 4x šroub M6x40 ISO 4762
- 4x podložka 7 ISO 7089
- 4x matice samojistná ISO 10512
- Ocelová 2 mm tlustá podložka

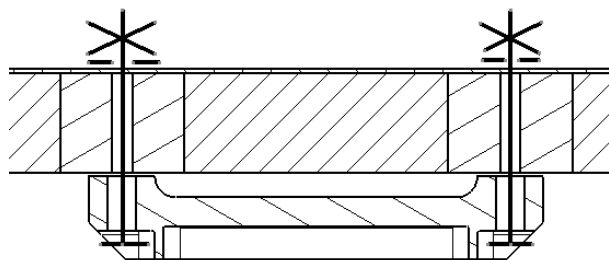
### 4.3.3. Uchycení tlumiče

- Skladba [0 45 90 -45 0]<sub>s</sub>
- 2x šroub M6x45 ISO 4762
- 4x podložka 7 ISO 7089
- 4x matice samojistná ISO 10512
- Ocelová 2 mm tlustá podložka



Obrázek 27 Řez v místě uchycení

### 4.3.4. Ramenní pás

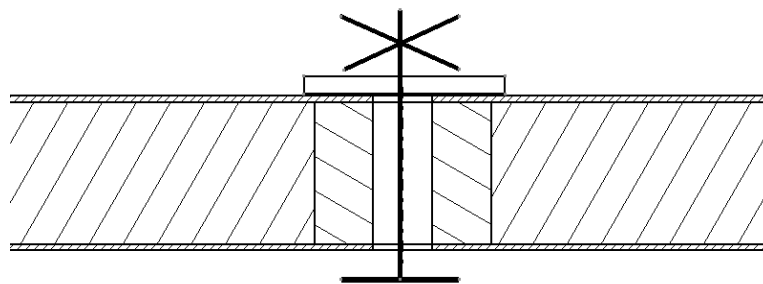


Obrázek 28 Řez v místě uchycení

- Skladba [0 45 90 -45 0 0]<sub>s</sub>
- 2x šroub M6x45 ISO 4762
- 4x podložka 7 ISO 7089
- 2x matice samojistná ISO 10512
- Ocelová 2 mm tlustá podložka



#### 4.3.5. Kyčelní a břišní pás



Obrázek 29 Řez v místě uchycení

- Skladba [0 45 90 -45 0 0]<sub>s</sub>
- 1x šroub M10x40 ISO 4762
- 1x podložka 11 široká DIN 440
- 1x matice samojistná ISO 10512

#### 4.4. Materiál potahu

Na potahy sendvičové struktury byl použit prepreg od německé firmy SGL Group typu SIGRAPREG C W200-TW2/2-E323/45%. Jedná se o uhlíkovou tkaninu s keprovou vazbou 2x2 a třemi tisíci vláken v pramenci. Gramáž suché uhlíkové tkaniny je 200 g/m<sup>2</sup>. Tato tkanina je prosycena epoxidovou pryskyřicí E323, která je určena pro vytvrzování při teplotě 125 °C po dobu 90 minut. Tento typ uhlíkového prepregu byl zvolen podle předešlých zkušeností, dostupnosti a nízké ceně.

#### 4.5. Materiál jádra

Pro jádra sendvičové struktury se použila strukturální pěna Rohacell 71WF, a to z důvodu kombinace dostupnosti, relativně nízké ceny a dobrých materiálových vlastností. Termoplastická strukturální pěna má zároveň pro výrobní proces tu výhodu, že se dá za pomoci tepla před formovat do tvaru sendvičového panelu. Při samotné skladbě vrstev prepregu, technologických vrstev a finálním vakuování se pak nenapíná, a to přispívá ke správnému dotlačení vrstev do formy. Výrobce v technickém listu udává, že tento typ pěny je vhodný k vysokotlakovému vytvrzení. Z minulých zkušeností už ale víme, že je vhodnější toto jádro vytvrzovat při sníženém tlaku (cca 3 bar).

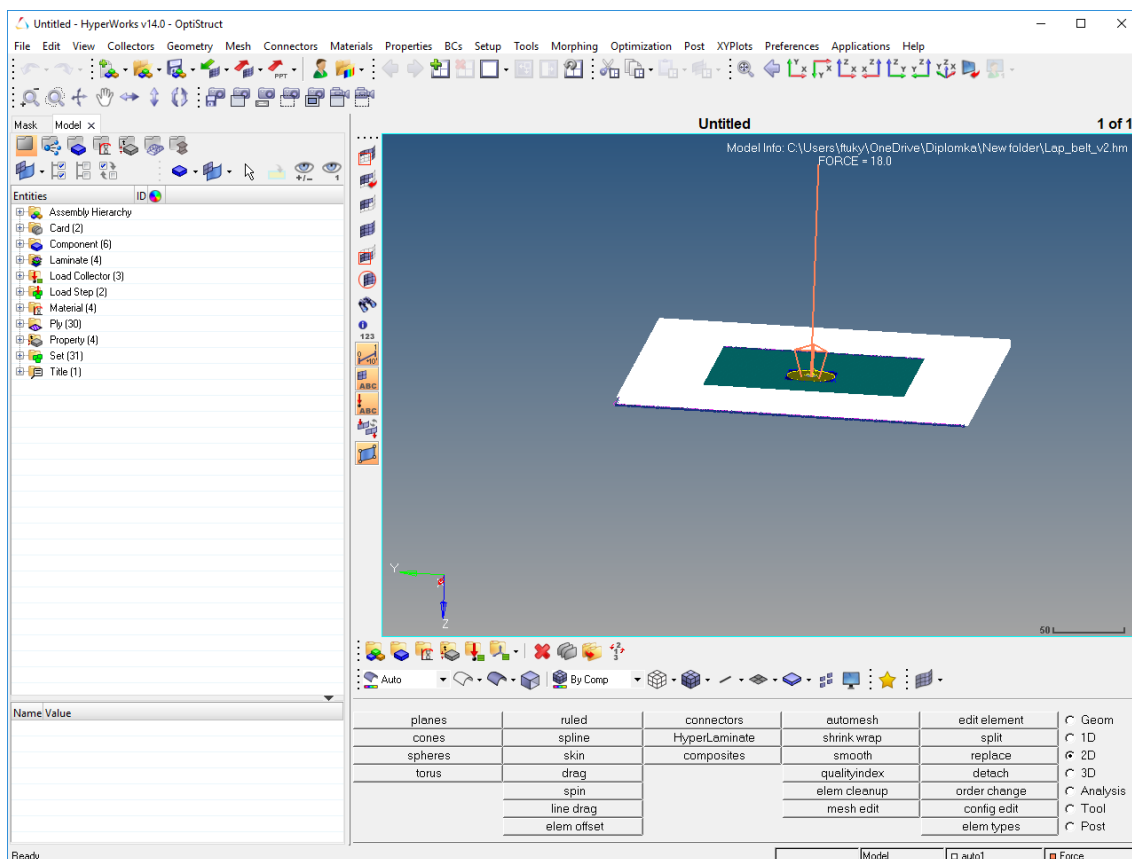
#### 4.6. Vložky

V předešlé kapitole jsme se seznámili se standardizovaným rozdělením vložek podle ESA. Rozhodli jsme se pro typ A, tedy plnou vložku přes celou tloušťku jádra. ESA standardně u tohoto typu jako materiál používá pouze slitiny hliníku. V široké praxi se ale používá celá řada materiálů, které se výrazně liší ve všech ohledech. Od nejlevnějších materiálů, jakými jsou například dřevo, MDF (medium density fibreboard), přes různé polymery, kovy až samotné uhlíkové kompozity s krátkými vlákny.

Pro naše požadavky jsme se rozhodli pro léty osvědčený materiál s obchodním názvem Ertalon PA66GF-30. Jedná se o skleněná vlákna, která tvoří 30% objemu materiálu a jsou zalita v nylonu. Tento materiál byl zvolen kvůli vhodným mechanickým vlastnostem, především vysoké pevnosti v tlaku 604 MPa a nízké hustotě 1183 g/cm<sup>3</sup>. Dalšími výhodami tohoto materiálu jsou jeho snadná obrobitelnost a tepelná odolnost do 255°C.

## 5. Metoda konečných prvků

Pro pevnostní kontrolu třech navrhovaných uchycení bezpečnostních pásů byly sestaveny MKP modely v programu Optistruct v prostředí HyperWorks 14.0 od americké firmy Altair Engineering. Je to moderní řešič pevnostních analýz pro lineární a nelineární strukturální problémy při statických a kvazistatických zatíženích.



Obrázek 30 Prostředí HyperWorks

### 5.1. Geometrie

Geometrický model byl vytvořen v programu CATIA V5, a vždy pozůstává z plochy celého vzorku, rozdělené na regiony pro zavazbení, a popis různých skladeb. Modely byly z programu vyexportovány ve formátu STEP a tento je možné naimportovat do pre-processoru HyperMesh na vytvoření sítě a zátěžných stavů.

### 5.2. Síť

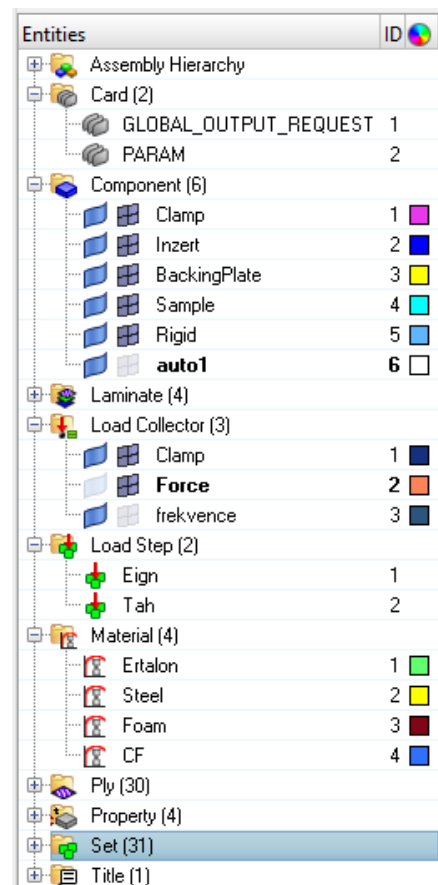
Pozůstává z 2D elementů kombinace čtyřúhelníkových elementů a

trojúhelníkových elementů pro lepší popis rádiusů v geometrii. Velikost elementu byla nastavená na 1 mm. Jednotlivé díly jsou po vysíťování postupně vzájemně polohovány posuvy a rotacemi tak, aby výsledná sestava odpovídala reálnému tvaru vzorku.

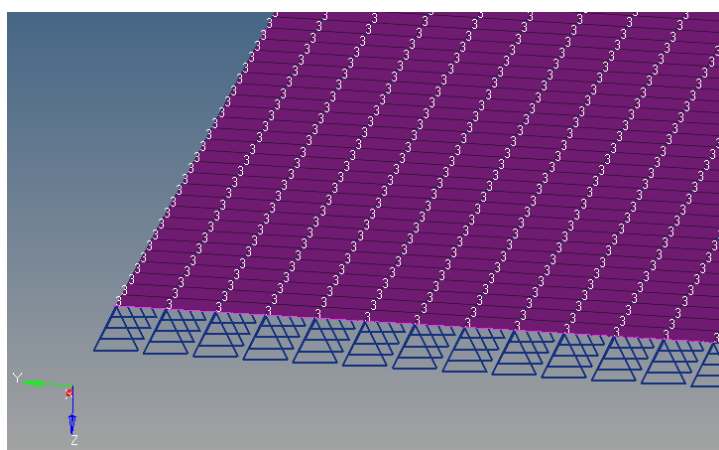
### 5.3. Model [9]

Důležité části stromu:

- „Card“ popisuje skrývá informace o výstupních datech a informace pro post-processor. Setkáme se tu například s dobou trvání výpočtu, a v jakém formátu má být výstup z výpočtu a co všechno má obsahovat.
- „Component“ rozděluje geometrii na oblasti, jakými jsou oblast podpěry, volná oblast, oblast pod podložkou svěrného spoje, oblast vložky a oblast zavedení zatížení
- „Laminate“ obsahuje definice propojení dílů mezi sebou. Nahrazuje spojení lamin k sobě pomocí matrice. Je v něm zapsaná skladba.
- „Load Collector“ obsahuje informace o zavazbení a působení sil. V našem případě jsme uzlům v oblasti podpěry odebrali možný posuv v ose Z a do kolektoru zavedli zatěžovací sílu (13 kN pro ramenní a břišní, 6,5 kN pro kyčelní pás)



Obrázek 31 Strom Modelu



Obrázek 32 Zavazbení uzlů v ose Z

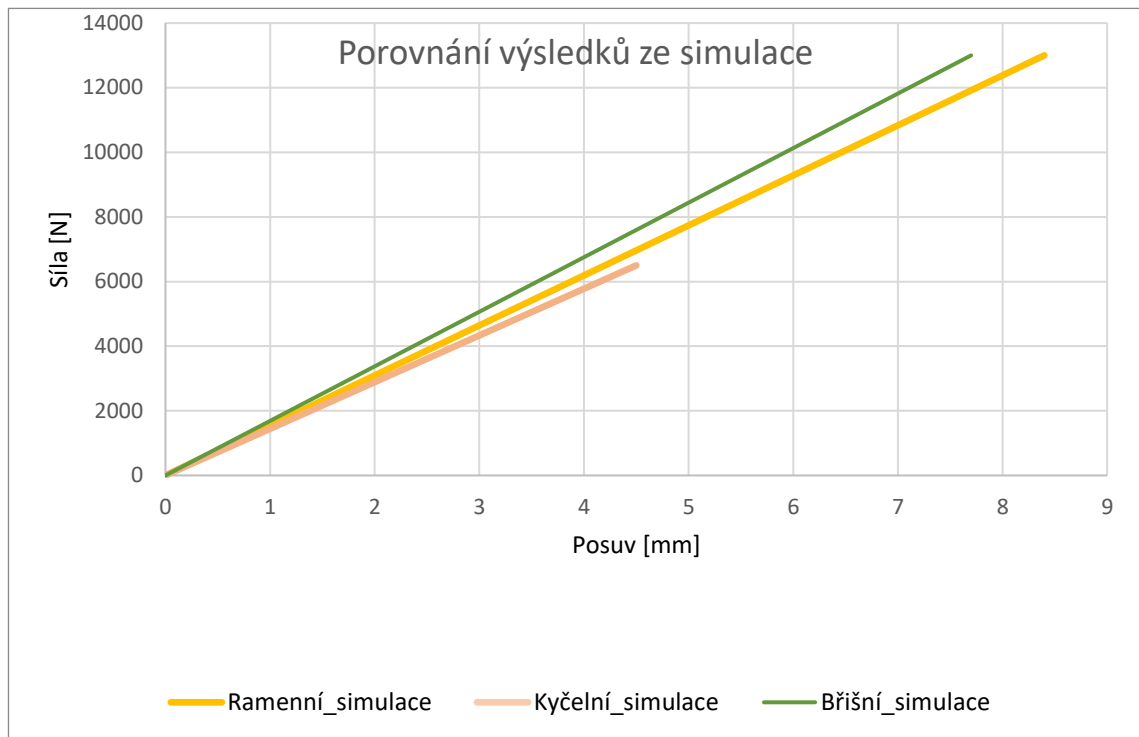
- „Load Step“ je takzvaný krok. Může obsahovat sekvenci různých typů zátěží, předeprnutí, nebo tepelného namáhání. V našem případě jenom vyětření vlastních frekvencí pro prvotní kontrolu modelu, a následně zátěž od síly z „Load Collector“
- „Material“ obsahuje informace o všech použitých materiálech. Pro izotropní materiály, jakými jsou v našem případě Ertalon, pěna jádra a ocel podložky je použita karta MAT1, ve které jsou uvedeny pouze Youngův modul, modul ve smyku, Poissonovo číslo a hustota. Pro anizotropní materiál, uhlíkový laminát je použita karta MAT8, ve kterém jsou uvedeny Youngovi moduly pro směr osnovy a útku, smykové moduly pro všechny tři roviny, Poissonovo číslo, hustota, a poměrná prodloužení odpovídající poruše pro oba směry, a to jak v tahu, tak tlaku. Všechny tyto hodnoty jsou vybrány buď z materiálového listu, nebo získané z normalizované tahové, tlakové zkoušky.
- „Ply“ popisují jednotlivé vrstvy a jejich orientace
- „Property“ popisují způsob, jak se laminát sestavuje v programu. Vybraný mód PCOMP rozděluje laminát na zóny a pro každou se pak určí skladba.
- „Set“ už představuje soubor všech vlastností dohromady.

#### 5.4. Výsledky simulací

V grafu níže zaznamenány posuvy pro příslušná zatížení. Z nich jsme získali směrnice tuhosti, které budeme po zkouškách vzorků srovnat s reálně naměřenými daty. Vychýlení v ose Z pro ramenní pás, a břišní pás, tedy při zatížení na 13 kN bylo 8,4 mm, resp. 7,7 mm. Vychýlení pro kyčelní pás, tedy při 6,5 kN bylo 4,5 mm.

Maximální poměrné prodloužení ve směru 1 pro břišní pás bylo 0,512%, pro ramenní pás 0,455%. Podle teoretického kritéria poruchy by tato měla nastat při hodnotě 0,7 %. Předpokládáme tedy, že k poruše na vzorcích dojde až při vyšším zatížení.

Nicméně hodnoty smykového napětí 94,8 MPa břišní, a 81,9 MPa ramenní by směřovali k závěru, že k poruše už není daleko.



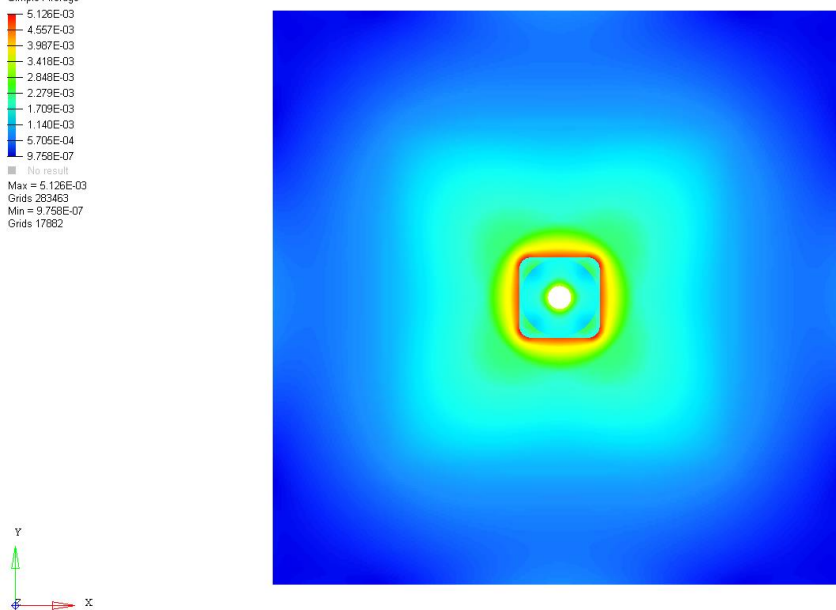
Graf 2 Výsledky simulace

Contour Plot  
Composite Strains(P1 (major) Strain, Max)  
Simple Average

- 5.126E-03
- 4.557E-03
- 3.987E-03
- 3.418E-03
- 2.848E-03
- 2.279E-03
- 1.709E-03
- 1.140E-03
- 5.705E-04
- 9.758E-07

■ No result  
Max = 5.126E-03  
Grids 283463  
Min = 9.758E-07  
Grids 17882

1:1  
Subcase 2 (Tah) : Static Analysis : Frame 0



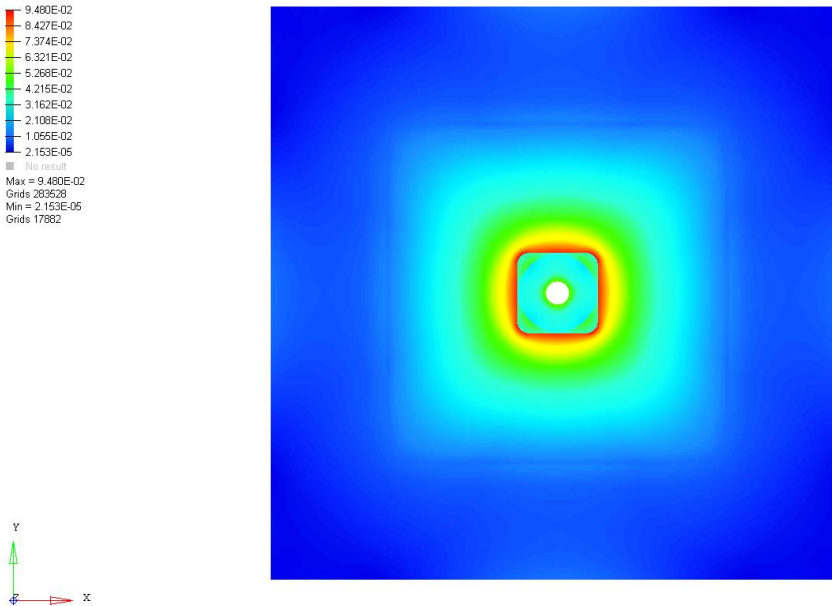
Obrázek 33 Poměrné prodloužení na vzorku břišního pásu

Contour Plot  
Composite Stresses(P1) (major Stress, Max)  
Simple Average

9.480E-02
8.427E-02
7.374E-02
6.321E-02
5.268E-02
4.215E-02
3.162E-02
2.108E-02
1.055E-02
2.153E-05
No result

Max = 9.480E-02  
Grids 283528  
Min = 2.153E-05  
Grids 17882

1: 1  
Subcase 2 (Tah) : Static Analysis : Frame 0



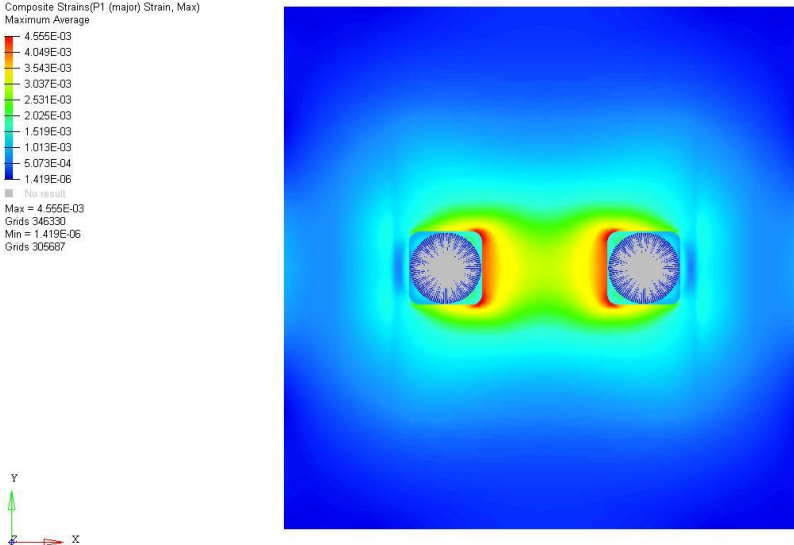
Obrázek 34 Napětí ve směru osnovy na vzorku břišního pásu

Contour Plot  
Composite Strains(P1) (major Strain, Max)  
Maximum Average

4.555E-03
4.049E-03
3.543E-03
3.037E-03
2.531E-03
2.025E-03
1.519E-03
1.013E-03
5.073E-04
1.419E-06
No result

Max = 4.555E-03  
Grids 346330  
Min = 1.419E-06  
Grids 305687

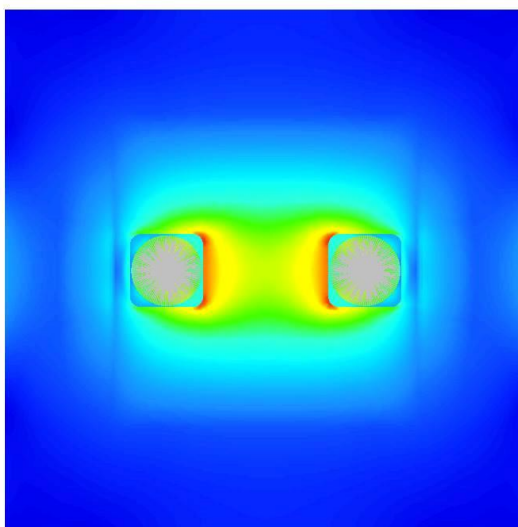
1: 1  
Subcase 2 (Tah) : Static Analysis : Frame 0



Obrázek 35 Poměrné prodloužení na vzorku ramenního pásu

Contour Plot  
Composite Stresses(P1 (major Stress, Max)  
Maximum Average  
8.192E-02  
7.282E-02  
6.372E-02  
5.462E-02  
4.552E-02  
3.642E-02  
2.732E-02  
1.822E-02  
9.124E-03  
2.400E-05  
No result  
Max = 8.192E-02  
Grids 367576  
Min = 2.400E-05  
Grids 305688

1: 1  
Subcase 2 (Tab) : Static Analysis : Frame 0



Obrázek 36 Napětí ve směru osnovy na vzorku ramenního pásu



## 6. Výroba vzorků

Podle pravidel Formula Student musí být vzorky vyrobené stejným postupem, jakým je vyrobena reprezentovaná oblast v monokoku. Laminát monokoku je z technologických důvodů vytvrzován na tři-krát:

- Vytvrzení prvních dvou pohledových vrstev uhlíkového prepregu vysokotlakovým cyklem v autoklávu. Vysoký tlak při tomto procesu zajišťuje co nejlepší dotlačení vrstev do geometrie formy. Zároveň tak vznikne pohledově hezký laminát.
- Vytvrzení zbylých vrstev vnějšího potahu, jader, vložek a jedné vrstvy vnitřního potahu při sníženém přetlaku v autoklávu. Použití nižšího tlaku je zde odůvodněno tím, že pěna by se při vysokém přetlaku mohla propadnout, laminát by ztratil průřezovou charakteristiku a tím požadované vlastnosti. Ze zkušeností nám je známo, že k malému stlačení jádra 71WF dochází při vysokotlakovém vytvrzování často. Tento risk si z hlediska jak časového, tak cenového nemůžeme dovolit, i když vysokotlakové vytvrzování nabízí lepší spojení všech vrstev mezi sebou a taky jádrem. Z tohoto důvodu při druhém vytvrzování aplikujeme zevnitř pouze jednu vrstvu prepregu, tím minimalizujeme pnutí mezi vrstvami a umožníme lepšímu dosednutí jádra na vnější potah.
- Vytvrzení zbylých vrstev laminátu vnitřního potahu.

### 6.1. Výrobní postup

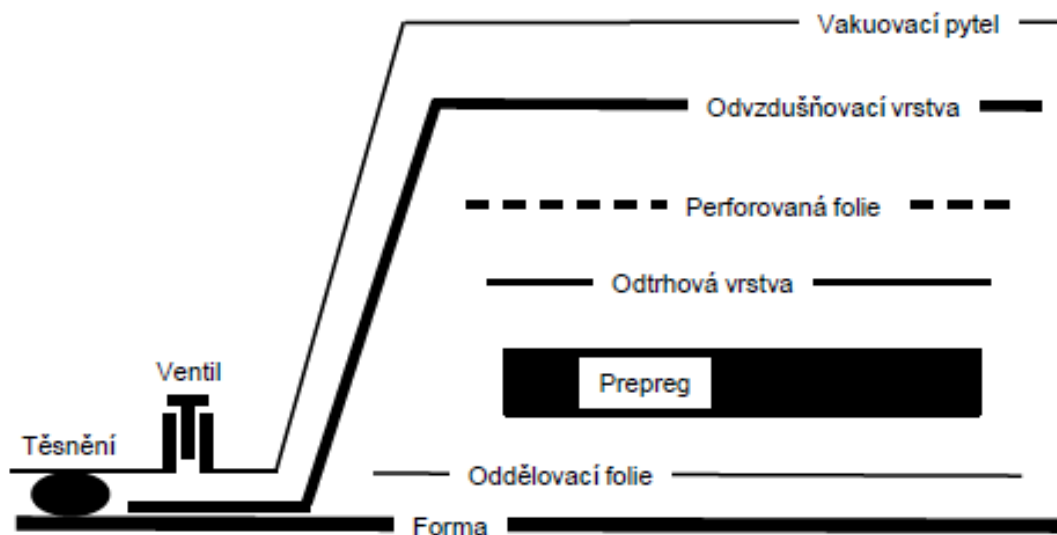
Nejprve si připravíme všechny materiály na skladbu. V případě prepregu se jedná o technologicky nejnáročnější a nejsložitější technologii používanou především pro sériovou výrobu. Pod pojmem prepreg rozumíme tkaninu prosycenou speciální pryskyřicí, která se nachází ve stavu takzvaného rezistolu – v této fázi již v pryskyřici vzniklo zesítnění molekul, ale síť má zatím velmi malou hustotu, takže pryskyřice setrvává ve stavu lepivého gelu. Prepregy jsou opatřeny z jedné strany tzv. nosnou a z druhé strany separační folii. Podle použitého systému pryskyřice – tvrdidlo mají prepregy při pokojové teplotě různě dlouhou životnost. Při jejich ponechání v pokojové teplotě prepregy postupně přicházejí o svou lepivost, tedy vlastnost velice důležitou z technologického

hlediska, protože ta zabraňuje vzájemnému posouvání kladených vrstev a zmenšuje možnost tvorby vzduchových polštářů mezi jednotlivými vrstvami. Při delším stárnutí prepregů dochází k jejich postupnému vytvrzení. Stárnutí prepregů účinně zpomaluje nízká skladovací teplota. Z tohoto důvodu je nutné prepregy uchovávat v mrazících boxech zabalené ve vodotěsných obalech při teplotách okolo  $-20^{\circ}\text{C}$ . Ertalon na vložky se nechal nařezat na vodním paprsku ve Firmě Stelis. Jádru Rohacell bylo nařezáno ručně.

Výroba vzorků podle průmyslových standardů probíhá následovně:

- Vyjmout materiál z mrazícího boxu.
- Nevyndávat materiál z plastického pytle, dokud se nesrovná teplota materiálu s teplotou v místnosti (záleží od tloušťky role). Tento krok zamezuje kondenzaci vzdušné vlhkosti na zmrznutém povrchu prepregu. Vlhost působí nepříznivě při vytvrzovacím cyklu.
- Z role prepregu nařezat nástřihy.
- Připravit vytvrzovací přípravek (30 mm tlustý hliníkový plech)
- Na přípravek položit neperforovanou separační fólii, aby pryskyřice z prepregu nepřilnula k povrchu ocelové desky.
- Nanesení dvou vrstev prepregu s orientací vláken  $0^{\circ}$  a  $45^{\circ}$
- Položit odtrhovou tkaninu a zabalit do perforované separační fólie, položit rozváděcí textilii.
- Zakrýt vakuovou plachetkou a zatěsnit těsnicí páskou.
- Vakuovat přípravek, únik měřit vakuometrem, kontrolovat max. pokles vakua.
- Vytvrdit v autoklávu při přetlaku 6 bar a teplotě  $125^{\circ}\text{C}$  po dobu dvou hodin na vytvrzovací teplotě, s přidaným podtlakem na formě 0,8 baru.
- Stržení technologických vrstev.
- Nanesení zbylých vrstev spodního potahu ( $-45^{\circ}$ , 90, 0, 0) jader a první vrstvy horního potahu (0).
- Nanesení technologických vrstev pro vakuování.
- Vakuovat a následně vytvrdit v autoklávu při přetlaku 3 bar a teplotě  $125^{\circ}\text{C}$  po dobu dvou hodin na vytvrzovací teplotě, s přidaným podtlakem na formě 0,8 baru
- Stržení technologických vrstev.
- Nanesení zbylých vrstev horního potahu (0, 90,  $-45^{\circ}$ , 45, 0).
- Nanesení technologických vrstev pro vakuování.

- Vakuovat a následně vytvrdit v autoklávu při přetlaku 3 bar a teplotě 125 °C po dobu dvou hodin na vytvrzovací teplotě, s přidaným podtlakem na formě 0,8 baru
- Stržení technologických vrstev.
- Obrobení vzorků (zbavení ostrých hran, vyvrtání příslušných děr.
- Přichycení jednotlivých úchytů bezpečnostních pásů.



Obrázek 37 Schéma skladby [9]



Obrázek 38 a) Prepreg SIGRAPREG Zdroj: <https://shop1.r-g.de/art/CS-200120-T-PP>; b) Ertalon Zdroj: Vlastní; c) Rohacell Zdroj: <http://www.emkayplastics.co.uk/emailshots/mar-15-newsletter/index.html>

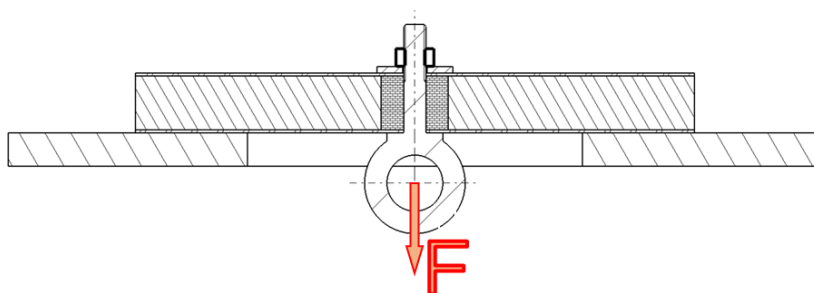
## 7. Experiment

Testování všech vzorků probíhalo v laboratoři Ústavu mechaniky, biomechaniky a mechatroniky. K těmto zkouškám není potřeba nijak speciální vybavení. Testovací stroj je řízen posuvem, a sílu pouze měří, proto se jedná prakticky úplně bezpečnou zkoušku. Posuv příčnicku byl navržen na 3 mm za minutu.

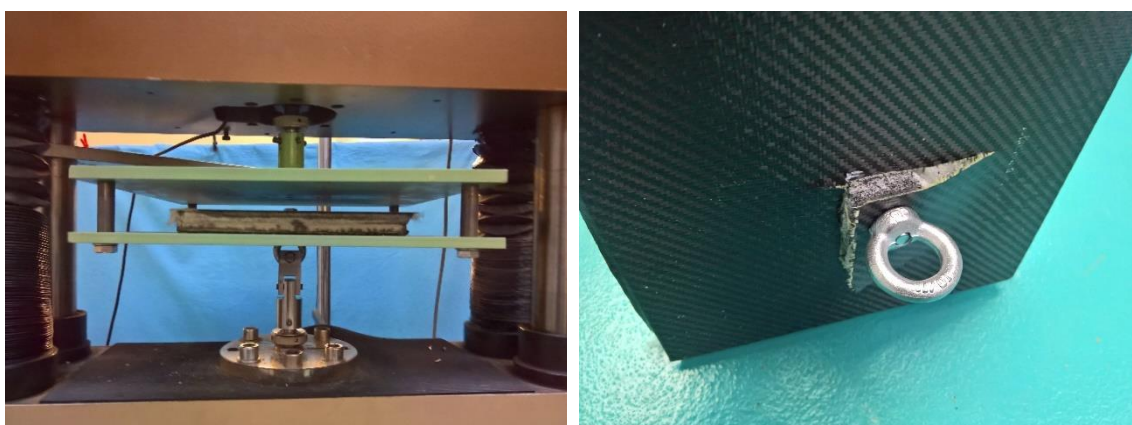
### 7.1. Břišní pás a kyčelní pás

Z pohledu testovací sestavy se zkouška uchycení břišního a kyčelního pásu v ničem neliší. Jediným rozdílem mezi těmito zkouškami jsou rozměry vložky uvnitř sendviče. Tato sestava pak vypadá následovně:

- oko M10 DIN 580, matice M10 DIN 934
- podložka široká DIN 440
- ocelová podpora s otvorem 150 mm x 150 mm

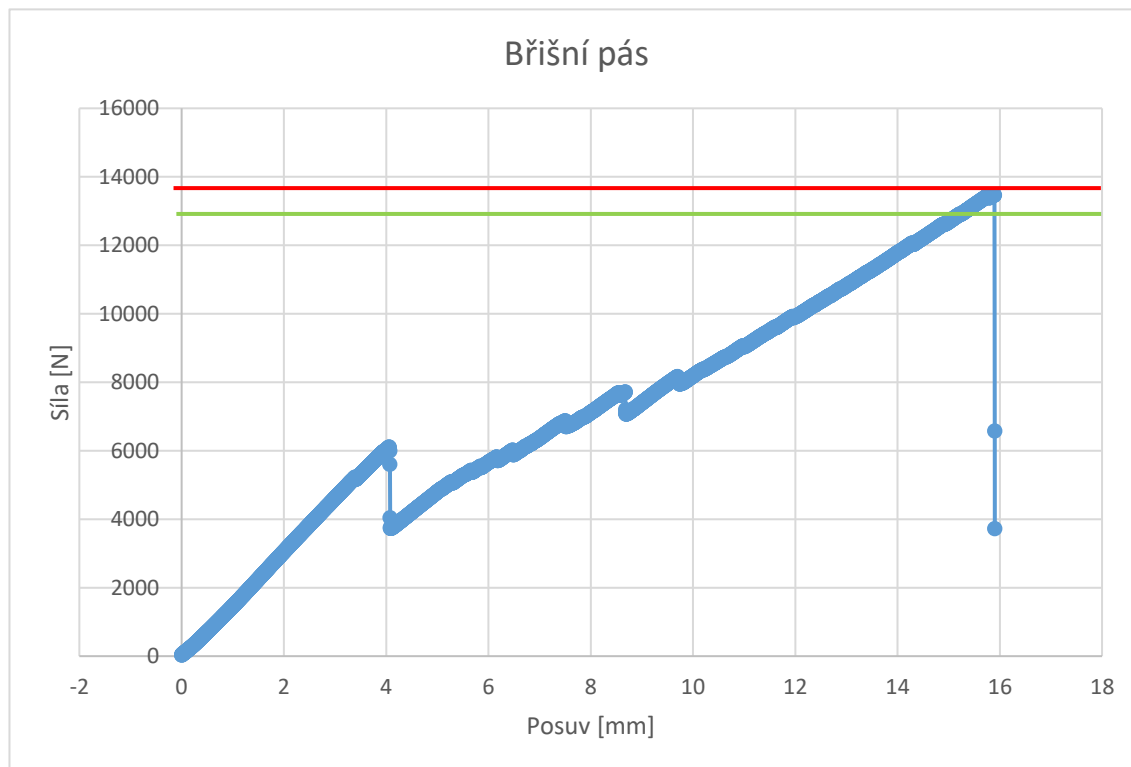


Obrázek 39 Schéma testovací sestavy v řezu Zdroj: Vlastní



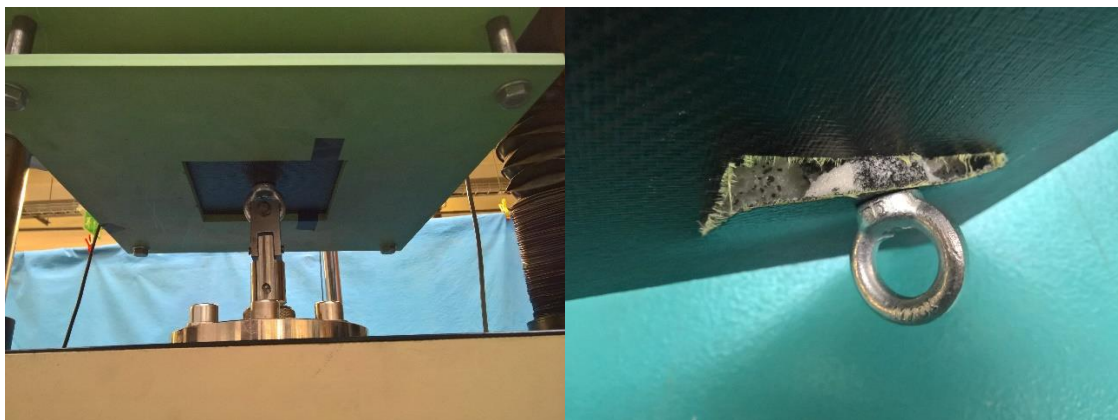
Obrázek 40 a) Sestava připravená na zkoušku a b) vzorek po zkoušce

Z grafu lze poznat několik skutečností:

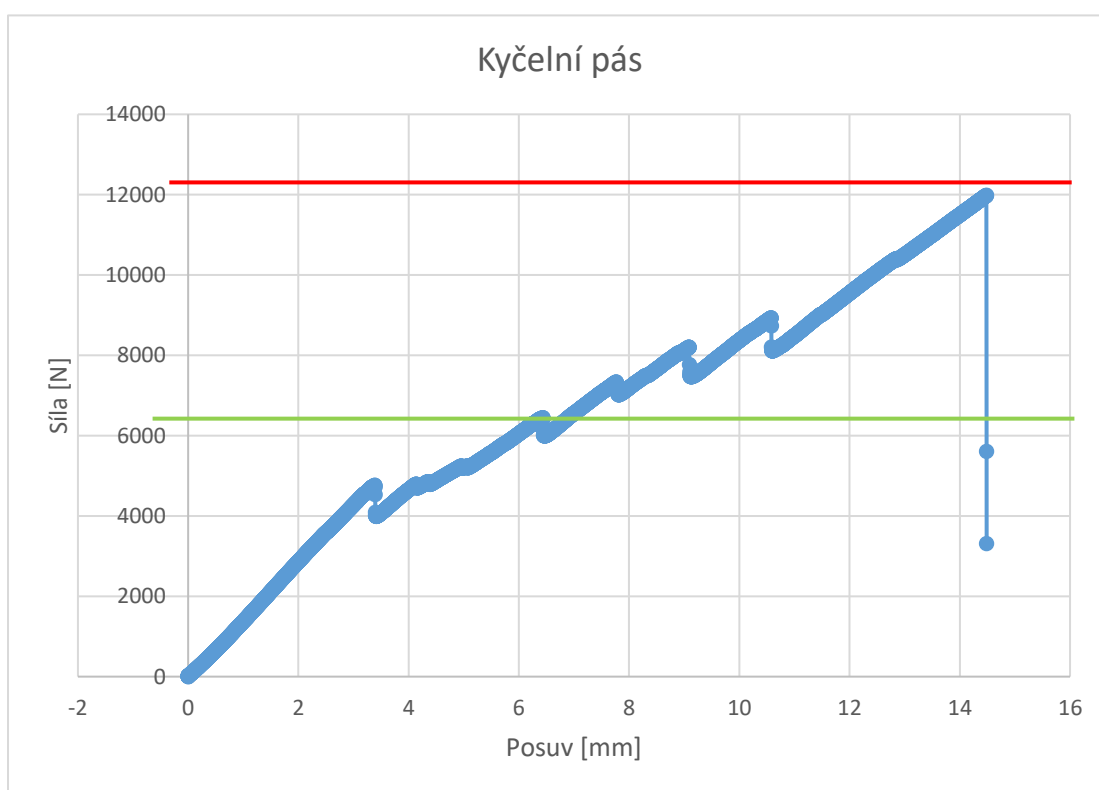


Graf 3 Výstupní graf měření, červenou vyznačená maximální síla, zelenou minimální požadovaná hodnota podle pravidel FS

- Maximální zátěžná síla byla naměřena na 13.47 kN, takže uchycení odpovídá pravidlům FS
- V první části grafu (začátek zkoušky až cca 4 mm) lze rozeznat, že se vzorek chová lineárně
- Pak dochází k přestřižení spodního potahu o hranu podložky (skokový pokles síly a také změna sklonu směrnice), poté přenáší zatížení pouze horní potah
- Další „zuby“ v grafu se dají vysvětlit tím, že horní potah se pak postupně odlepjuje od jádra až do momentu, kdy dojde k jeho poruše, a to na předpokládaném místě, tedy na hraně vložky.



Obrázek 41 a) Sestava připravená na zkoušku a b) vzorek po zkoušce



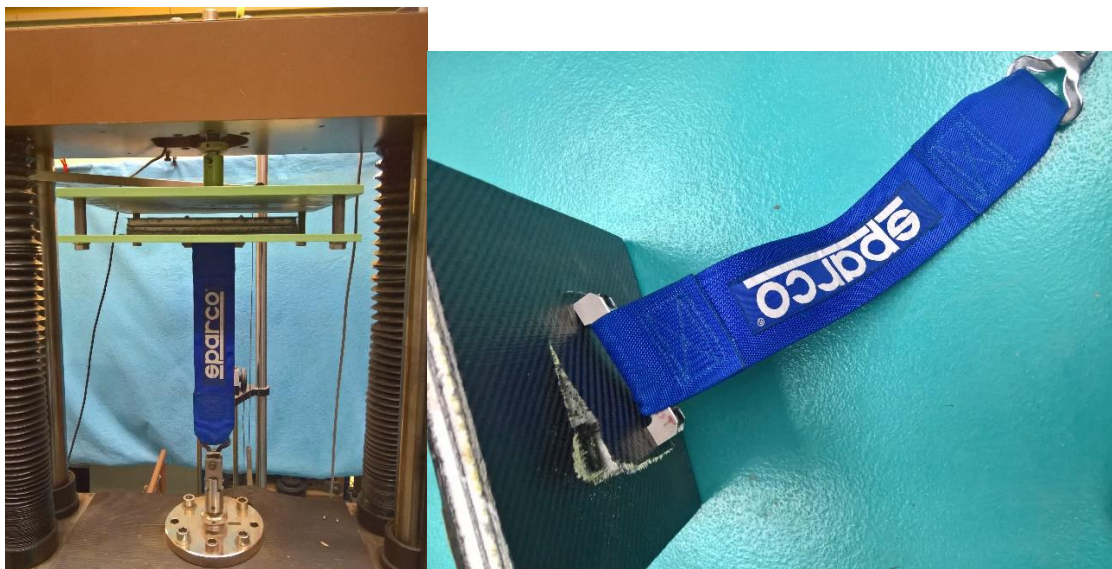
Graf 4 Výstupní graf měření, červenou vyznačená maximální síla, zelenou minimální požadovaná hodnota podle pravidel FS

Souhrnně stejná zkouška jako u břišního pásu až na pár detailů:

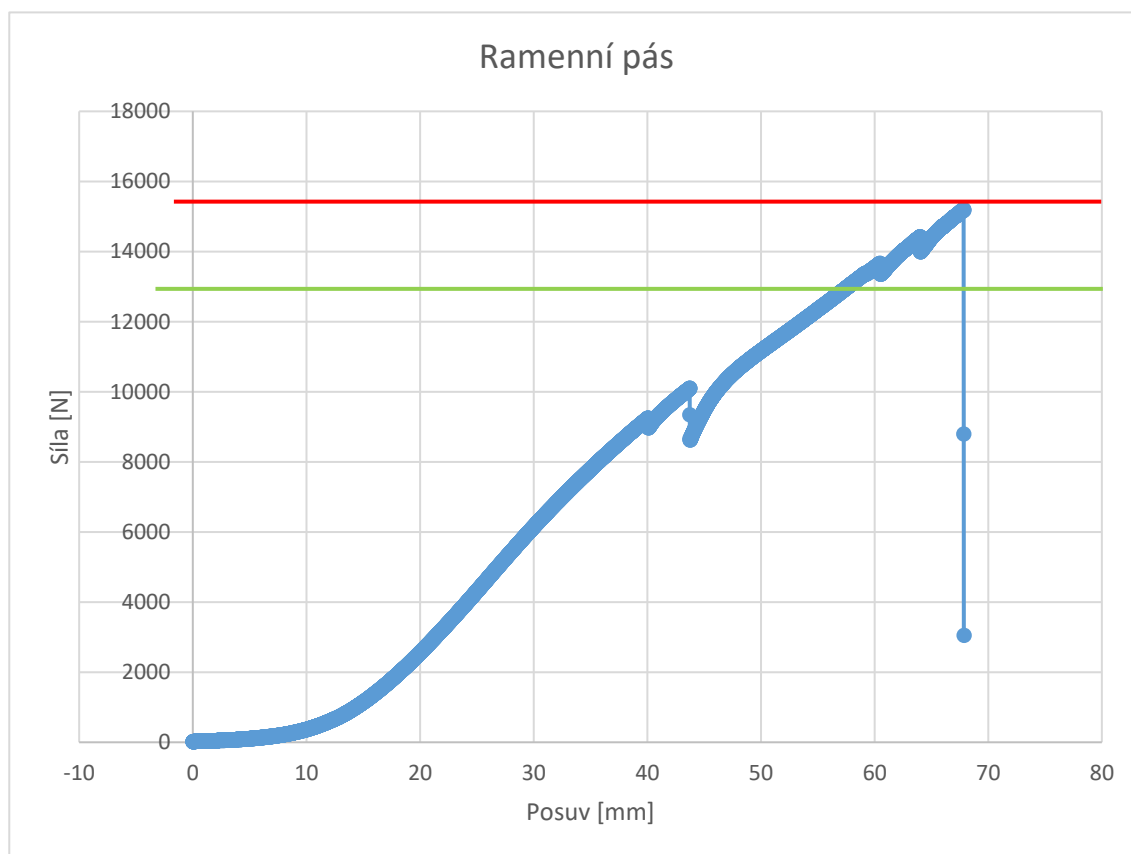
- Maximální zátěžná síla byla naměřena na 11.98 kN, takže uchycení také odpovídá pravidlům FS
- Lze tady mnohem lépe poznat postupné skokové odlepování horního potahu od jádra
- Po každém skoku odlepení se sklon křivky o něco sklopí, protože se vzorek postupně chová méně, jako sendvič a tím ztrácí na tuhosti

## 7.2. Ramenní pás

Změnou oproti sestavě břišního a kyčelního pásu je u ramenního pásu způsob vnesení zátěže. Jelikož podle pravidel musí vzorek plně odpovídat realizaci na formuli, zátěž je do vzorku aplikovaná skrz z předešlých let použitý kus bezpečnostního pásu s hliníkovým nosičem, stejným, jaký používáme na FS.10.



Obrázek 42 a) Sestava připravená na zkoušku a b) vzorek po zkoušce



Graf 5 Výstupní graf měření, červenou vyznačená maximální síla, zelenou minimální požadovaná hodnota podle pravidel FS

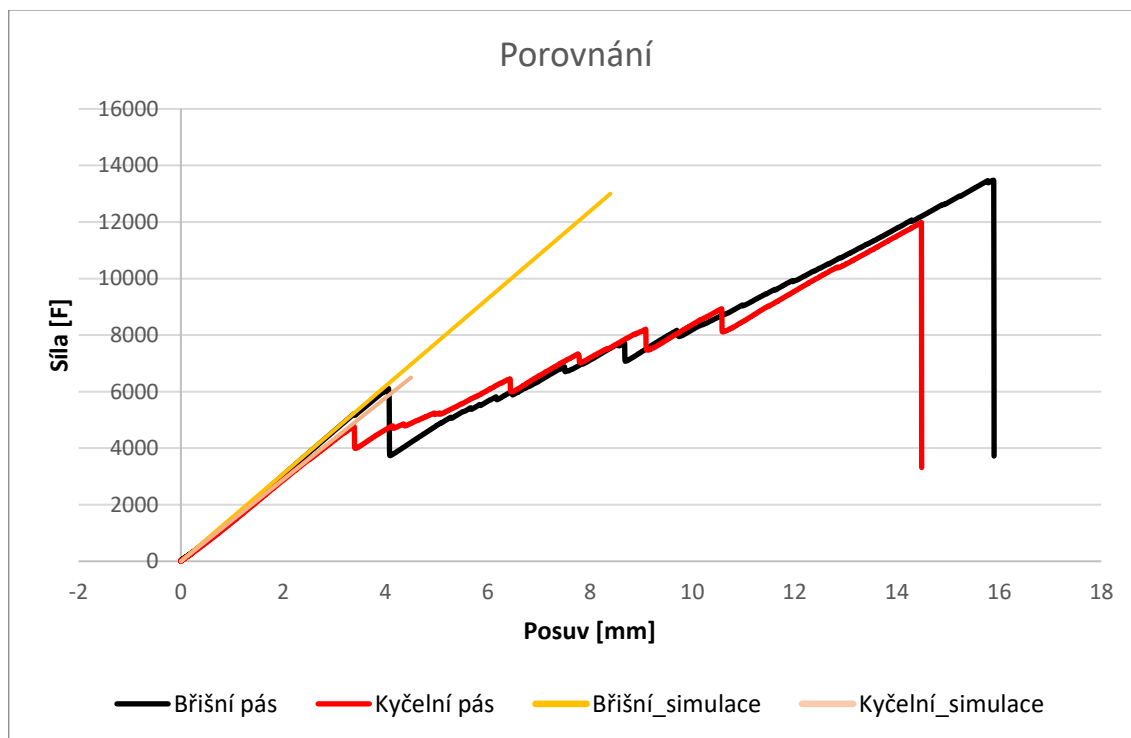
Opět podobná zkouška jako u předešlých dvou pásů až na pár detailů:

- Maximální zátěžná síla byla naměřena na 15,19 kN, takže uchycení také odpovídá pravidlům FS
- Nelineární část na začátku (posuv 0 až 20 mm) odpovídá postupnému napnutí bezpečnostního pásu, než se začal chovat, jako „tuhý“ prvek
- Bohužel právě kvůli neznámému modulu v tahu materiálu a tkaniny bezpečnostního pásu nejsme schopni dostat směrnici elastické části



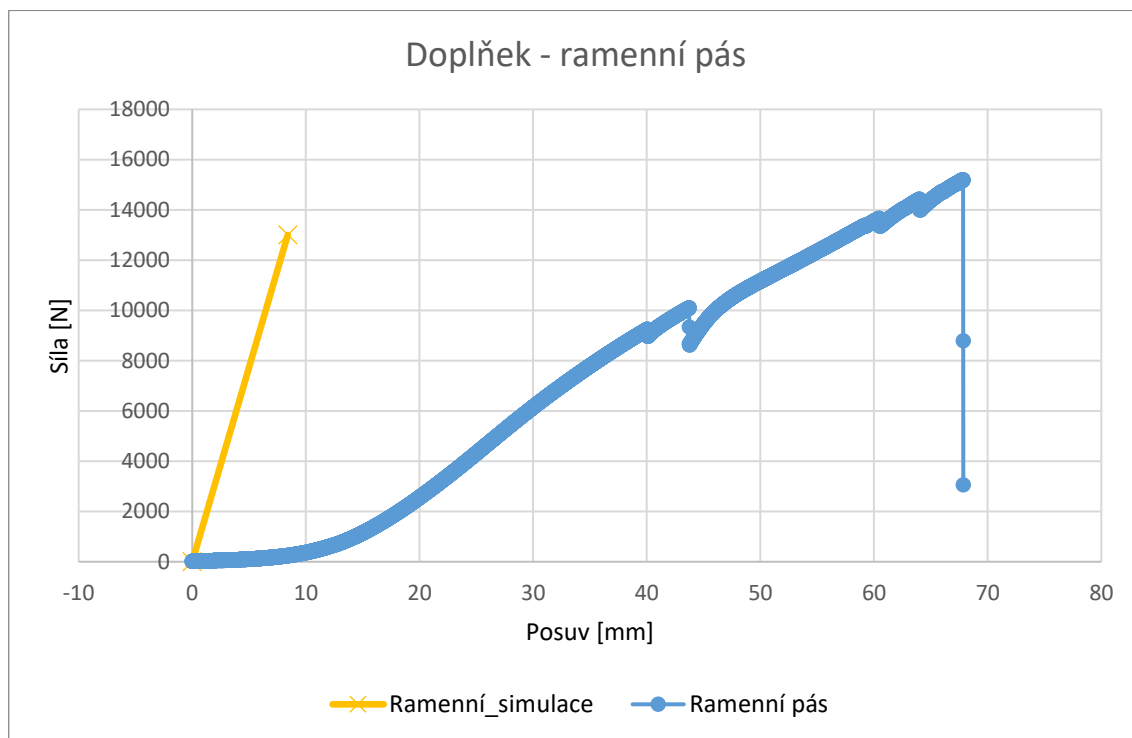
## 8. Porovnání výsledků

Po zkouškách můžeme do jednoho grafu vynést všechny nasbíraná data, a to jak ze simulací, tak z experimentálních měření.



Graf 6 Finální porovnávací graf

V tomto grafu jsme vynechali data z měření ramenního pásu, aby šlo lépe rozeznat směrnice podle simulací versus měření. Z této vizualizace se dá rozeznat, že lineární model dostatečně věrně odpovídá lineární části naměřených dat. V grafu 6 už můžeme jasně vidět, že z důvodu nedokonalého zavedení zatížení (přes předepsaný bezpečnostní pás) se směrnice lineární části měření absolutně neshoduje se simulovanou hodnotou.



Graf 7 Nepovedená validace

## 9. Výhled do budoucna

Nyní bychom se měli podívat na možnosti, jak ve problematice úchytných bodů na monokoku pokračovat dál:

- Po zkušenostech s vnitřními poruchami v regionu uchycení předního zavěšení by bylo vhodné aspoň lineárně nasimulovat pole vložek v sendviči celé bočnice monokoku, protože ovlivněné oblasti v okolí jednotlivých vložek se velice pravděpodobně překrývají a jejich vzájemné chování je nám doposud neznámé
- Poruchové chování je u sendvičového kompozitu s vložkou zajímavé, a proto by další výzvou mohla být nelineární simulace celé poruchy
- Nasimulovat průběh únavy od cyklického namáhání (opět pro uchycení zavěšení)
- Zlepšit proces validace (zvýšit počet vzorků a měření, a tím zvýšit vypovídající hodnotu)

## 10. Závěr

V této práci jsme se nejprve seznámili se soutěží Formula Student a s historií použití samonosné struktury, a pak přímo ve formě monokoku z kompozitu z uhlíkových vláken. Dále jsme se seznámili s pravidly Formula Student přímo týkajícími se našeho zadání. Provedli jsme analýzu působení přední nápravy do struktury monokoku. Zjistili jsme z ní zatížení jednotlivých úchytných bodů.

Následně jsme si popsali vlastnosti kompozitu se zaměřením na uhlíkové kompozity. Dalším krokem bylo popsat matematické vztahy pro výpočet napětí a deformací kompozitních laminátů a poté sendvičů.

Po rešerši realizací přípojných bodů podle ESA, a popisu výpočtu únosnosti jsme spolu s předepsanými zátěžemi mohli přistoupit k návrhu vložek pro bezpečnostní pásy a úchytné body předního zavěšení. Na tři návrhy vložek pro bezpečnostní pásy jsme vytvořili model těchto zátěžných stavů MKP v prostředí HyperWorks.

V další kapitole jsme sepsali proces výroby těch tří vzorků. Vzorky jsme vyskládali a nechali vytvrdit v autoklávu ve firmě LA Composite v Letňanech. Vzorky jsme poté otestovali podle pravidel FS. Tady je nutno podotknout, že úspěšná validace proběhla pouze na dvou z nich, způsob uchycení ramenního pásu, který odpovídá pravidlům vnáší do měření nelinearitu a maží tak možnost odečíst správně data. Všechny tyto vzorky úchytných bodů pro bezpečnostní pásy ale z hlediska pravidel prošly, takže je smíme přesně takto použít i na monokoku FS.10.

## 11. Seznam použitých zdrojů

- [1] HAUGUM, Henrik; PLØEN, Morten. *Dimensjonering, analyse og testing av inserts i karbonfiber kompositt sandwich chassis*. Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet, Trondheim, 2014.
- [2] 2018 *Formula Student Rules v1.1*. [cit. 2019-01-05] Dostupné na URL: <<https://www.formulastudent.de/>>
- [3] ZAVADIL, Filip. *Skořepinová nosná struktura vozu Formula Student*. České vysoké učení technické v Praze, 2013.
- [4] VASIL, Tomáš. *Řešení adheze u kompozitů s polymerní matricí*. České vysoké učení technické v Praze, 2017.
- [5] ZAVADIL, Filip. *Vývoj monokoku FS.03*. České vysoké učení technické v Praze, 2011.
- [6] LAŠ, Vladislav. *Mechanika kompozitních materiálů*. Západočeská univerzita v Plzni, 2008.
- [7] BAUMRUK, Martin. *Mechanika kompozitních materiálů, analytické metody výpočtu stabilitních úloh kompozitních desek a sendvičových panelů a jejich porovnání s MKP*. České vysoké učení technické v Praze, Zpráva – neznámé datum publikace. [cit. 2019-02-08] Dostupné na URL: <[http://www.kompozity.info/clanky/compdb/ztrata\\_stability\\_kompozitu.pdf](http://www.kompozity.info/clanky/compdb/ztrata_stability_kompozitu.pdf)>
- [8] *Insert Design Handbook, ECSS-E-HB-32-22A*, ESA Requirements and Standards Division, Noordwijk, 2011.
- [9] *OptiStruct 2017 Tutorials and Examples*. [cit. 2019-02-08] Dostupné na URL: <[http://www.academia.edu/36174200/OptiStruct\\_2017\\_Tutorials\\_and\\_Examples](http://www.academia.edu/36174200/OptiStruct_2017_Tutorials_and_Examples)>

## 12. Seznam obrázků

Obrázek 1 Oficiální logo Formule Student/SAE Zdroj: <a href="http://www.ebaracus.com/">http://www.ebaracus.com/</a> .....	9
Obrázek 2 Rozdělení bodů Formula Student Zdroj: <a href="http://electric.amzracing.ch/en/formula-student">http://electric.amzracing.ch/en/formula-student</a> .....	10
Obrázek 3 Stavba nosné struktury letadla Murphy Moose [1] .....	11
Obrázek 4 Hliníkový monokok Lotusu 25 .....	12
Obrázek 5 První uhlíkový monokok McLarenu MP4 .....	12
Obrázek 6 Monokok vozu Audi R18 LMP .....	13
Obrázek 7 Porovnání monokoku a trubkového rámu.....	14
Obrázek 8 Vložky uvnitř monokoku FS.10.....	15
Obrázek 9 Ilustrace pravidel T3.5.6 [2] .....	18
Obrázek 10 Ilustrace pravidel T3.15 [2] .....	19
Obrázek 11 Uchycení pilota pomocí šestibodových pásů [3] .....	19
Obrázek 12 Model zavěšení levého předního kola FS.10 .....	21
Obrázek 13 Simulační model v CATIA V5 .....	21
Obrázek 14a) Tahový diagram vlákna a matrice b) Závislost pevnosti kompozitu na objemovém podílu vláken [5].....	25
Obrázek 15 Hlubší rozdělení kompozitů [6].....	26
Obrázek 16 Podélná a ohybová deformace dvou „cross-ply“ laminátů s různou posloupností skladby vrstev [7] .....	27
Obrázek 17 Izotropní, ortotropní, anizotropní materiál, efekt zdvojení (coupling) ohybové/kroucí deformace [7] .....	28
Obrázek 18 Sendvičová konstrukce [3] .....	30
Obrázek 19 Ohyb sendvičového panelu [1] .....	31
Obrázek 20 Vizualizace přínosu jádra [3] .....	32
Obrázek 21 Úsek ovlivněn lokálním zatížením [1] .....	33
Obrázek 22 Další možnosti realizace přípojných bodů Zdroj: <a href="https://www.journals.elsevier.com/composite-structures">https://www.journals.elsevier.com/composite-structures</a> .....	35
Obrázek 23 Řez v oblasti vložky typu A.....	36
Obrázek 24 Stříhová zkouška .....	37
Obrázek 25 Řez v místě uchycení.....	39
Obrázek 26 Řez v místě uchycení.....	39
Obrázek 27 Řez v místě uchycení.....	40
Obrázek 28 Řez v místě uchycení.....	40
Obrázek 29 Řez v místě uchycení.....	41
Obrázek 30 Prostředí HyperWorks .....	43
Obrázek 31 Strom Modelu .....	44
Obrázek 32 Zavazbení uzlů v ose Z.....	44
Obrázek 33 Poměrné prodloužení na vzorku břišního pásu .....	46
Obrázek 34 Napětí ve směru osy na vzorku břišního pásu .....	47
Obrázek 35 Poměrné prodloužení na vzorku ramenního pásu .....	47
Obrázek 36 Napětí ve směru osy na vzorku ramenního pásu.....	48
Obrázek 37 Schéma skladby [9] .....	51
Obrázek 38 a) Prepreg SIGRAPREG Zdroj: <a href="https://shop1.r-g.de/art/CS-200120-T-PP">https://shop1.r-g.de/art/CS-200120-T-PP</a> ; b) Ertalon Zdroj: Vlastní; c) Rohacell Zdroj: <a href="http://www.emkayplastics.co.uk/emailshots/mar-15-newsletter/index.html">http://www.emkayplastics.co.uk/emailshots/mar-15-newsletter/index.html</a> .....	51
Obrázek 39 Schéma testovací sestavy v řezu Zdroj: Vlastní .....	52
Obrázek 40 a) Sestava připravená na zkoušku a b) vzorek po zkoušce .....	52
Obrázek 41 a) Sestava připravená na zkoušku a b) vzorek po zkoušce .....	54

Obrázek 42 a) Sestava připravená na zkoušku a b) vzorek po zkoušce ..... 55

### 13. Seznam tabulek

Tabulka 1 Vlastnosti vozu FS.10 ..... 20  
Tabulka 2 Síly od zatížení kol pro dva zátěžové stavy ..... 22  
Tabulka 3 Síly od zatížení kol pro dva zátěžové stavy ..... 24  
Tabulka 4 Typy vložek podle ESA [8] ..... 35  
Tabulka 5 Rozměry vložek a počet potahů pro jednotlivé uchycovací body ..... 38

### 14. Seznam grafů

Graf 1 Výstupní graf stříhové zkoušky, červeně vyznačená síla při prostřížení ..... 37  
Graf 2 Výsledky simulace ..... 46  
Graf 3 Výstupní graf měření, červenou vyznačená maximální síla, zelenou minimální požadovaná hodnota podle pravidel FS ..... 53  
Graf 4 Výstupní graf měření, červenou vyznačená maximální síla, zelenou minimální požadovaná hodnota podle pravidel FS ..... 54  
Graf 5 Výstupní graf měření, červenou vyznačená maximální síla, zelenou minimální požadovaná hodnota podle pravidel FS ..... 56  
Graf 6 Finální porovnávací graf ..... 57  
Graf 7 Nepovedená validace ..... 58

### 15. Seznam příloh

Příloha 1 Materiálové vlastnosti uhlíkového prepregu ..... 64  
Příloha 2 Vytvrzovací graf pro pryskyřici prepregu ..... 65  
Příloha 3 Materiálové vlastnosti strukturálního jádra Rohacell ..... 66  
Příloha 4 Materiálové vlastnosti PA66 GF-30 ..... 67



## TECHNICAL DATA SHEET

### SIGRATEX PREPREG CE 8201-200-45S

Type of prepreg:	Fabric Twill 2/2 ( KDK 8042 )
Resin system:	Epoxy (201)
Type of fibre:	Warp and Weft: 5 threads/cm CF 3K (200 tex)
Fiber area weight:	200 g/m <sup>2</sup>
Prepreg weight:	364 g/m <sup>2</sup>
Resin content:	45 % +- 3 %
Width:	119 cm
Roll length:	50 and 100 m
Thickness in laminate:	0,19 mm

**SGL TECHNOLOGIES GmbH**





SGL epo GmbH  
Siemensring 24  
D-47877 Willich  
Phone: +49 (2154) 9238-0  
Fax: +49 (2154) 9238-44  
[www.sglcarbon.com](http://www.sglcarbon.com)

Epoxy Prepreg E201/E201S

## Fabrication

### Curing

E201/E201S was formulated for autoclave-, press- or vacuum-only processing. It's a versatile cure system for curing temperatures of 80 °C to 160 °C. The recommended heat up rate is 1 °C/min to 4 °C/min.

The E201/E201S resin system is also offering a two-step-processing with an initial curing and a stand-alone post-curing. Parts can be demoulded after the initial cure at a shorter cure cycle in order to increase tooling availability. The combined time of both cure cycles should not fall short of the total recommended duration of a one-step cure cycle which is depending on lay-up procedure, part design and tooling properties and therefore needs to be evaluated individually on a case-by-case-basis by carrying out internal tests.

The recommended pressure during curing can vary between vacuum pressure (>0.7 bar) and a positive pressure of approx. 8 bar. This depends on the specific application and the kind of reinforcement.

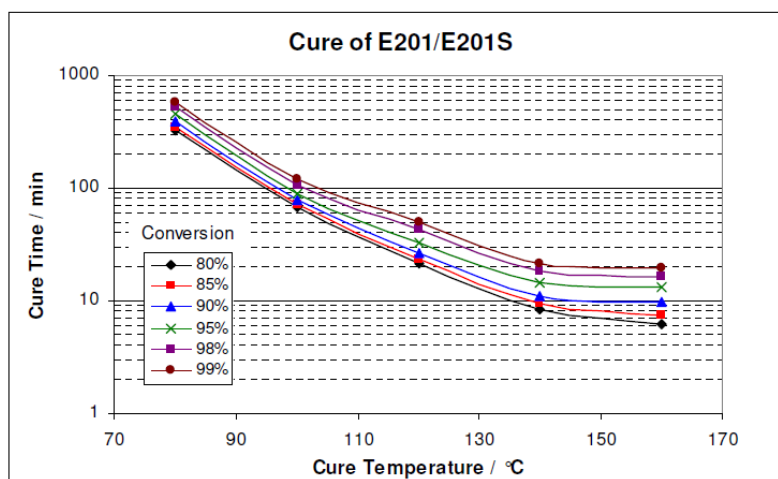


Fig 1. Time/turnover plot of E201/E201S

Příloha 2 Vytvrzovací graf pro pryskyřici prepregu

**ROHACELL®**

Product Information

**ROHACELL® WF**

**FOAM FOR THE MOST DEMANDING MANUFACTURING PROCESS CONDITIONS**

ROHACELL® WF foam core has been specifically designed for use in aerospace applications.

Based on polymethacrylimide (PMI) chemistry, it is engineered to meet demanding requirements from aircraft manufacturers and has led to many specifications for more than 30 years, including MIL, CMS and others.

**PROCESSING AND PRODUCTION**

ROHACELL® core makes it possible to produce sandwich components in a single step (co-curing), resulting in reduced overall production time.

ROHACELL® WF can take curing temperatures up to 130 °C (266 °F) and pressures up to 0.7 MPa (102 psi).

After heat treatment, ROHACELL® WF-HT can even be used at curing temperatures of 180 °C (356 °F) and at pressures of 0.7 MPa (102 psi).

ROHACELL® WF is highly suited to autoclave technologies and vacuum infusion processes, including RTM and VARTM processes.

**WEIGHT SAVINGS**

When building composite sandwich components, lightweight ROHACELL® WF has a closed cell structure that ensures resin stays exactly where you want it – in the interface. This eliminates excess and unnecessary resin that adds undesirable weight to the finished part.

**THERMOFORMING AND SHAPING**

ROHACELL® WF can be easily thermoformed or CNC machined to meet customer requirements, bringing tremendous manufacturing advantages.

High precision, pre-shaped and ready-to-use foam cores in complex or simple geometries can be supplied by the ROHACELL® Shapes Department.

Property	Test Method	Unit	ROHACELL® 51 WF	ROHACELL® 71 WF	ROHACELL® 110 WF	ROHACELL® 200 WF	ROHACELL® 300 WF
Density	ISO 845	kg/m³ lbs/ft³	52 3.25	75 4.68	110 6.87	205 12.8	300 18.7
Compressive Strength	ISO 844	MPa psi	0.8 116	1.7 246	3.6 522	9.0 1,305	17.8 2,580
Tensile Strength	ISO 527-2	MPa psi	1.6 232	2.2 319	3.7 536	6.8 986	12.0 1,740
Tensile Modulus	ISO 527-2	MPa psi	75 10,870	105 15,220	180 26,100	350 50,760	578 83,830
Elongation at Break	ISO 527-2	%	3.0	3.0	3.0	3.5	2.8
Shear Strength	DIN 53294	MPa psi	0.8 116	1.3 188	2.4 348	5.0 725	8.3 1,200
Shear Modulus	DIN 53294	MPa psi	24 3,480	42 6,090	70 10,150	150 21,750	364 52,790
Coefficient of Thermal Expansion		1/K*10E-5	3.11	3.09	3.07	3.76	3.50

Technical data values presented above are typical for nominal density at room temperature, subject to normal manufacturing variations.  
All ROHACELL® products are closed-cell rigid foams based on polymethacrylimide (PMI) chemistry and contain no CFCs.

Příloha 3 Materiálové vlastnosti strukturálního jádra Rohacell

## Ultramid<sup>®</sup> A3WG6



Typical values at 23°C <sup>1)</sup>	Test method	Unit	Condition	Values
<b>Properties</b>				
Abbreviated term	ISO 1043	-	-	PA66-GF30
Density	ISO 1183	g/cm <sup>3</sup>	-	1.36
Viscosity number (solution 0.005 g/ml sulfuric acid)	ISO 307	ml/g	-	145
Colour: natural (n), coloured (c), black (bk)	-	-	-	n,bk
Water absorption, equilibrium in water at 23°C	ISO 62	%	-	5.20 - 5.80
Moisture absorption, equilibrium 23°C/50% r.h.	ISO 62	%	-	1.50 - 1.90
<b>Processing</b>				
Melting temperature, DSC	ISO 3146	°C	-	260
Melt volume rate MVR 275/5	ISO 1133	cm <sup>3</sup> /10 min	-	40
Melt temperature, injection moulding/extrusion	-	°C	-	280 - 300
Mould temperature, injection moulding	-	°C	-	80 - 90
Moulding shrinkage, constrained <sup>6)</sup>	-	%	-	0.55
<b>Flammability</b>				
UL94 rating at 1.6 mm thickness	UL 94	class	-	HB
Automotive materials (thickness d ≥ 1mm)	FMVSS 302	-	-	+
<b>Mechanical properties</b>				
Tensile modulus	ISO 527-2	MPa	dry/cond.	10000/7200
Yield stress (v = 50 mm/min), Stress at break (v = 5 mm/min)*	ISO 527-2	MPa	dry/cond.	190*/130*
Yield strain (v = 50 mm/min)	ISO 527-2	%	dry/cond.	
Nominal strain at break, Strain at break*	ISO 527-2	%	dry/cond.	3.0*/5.0*
Tensile creep modulus, 1000 h, strain ≤ 0.5%, +23°C	ISO 899-1	MPa	cond.	5300
Flexural modulus	ISO 178	MPa	dry/cond.	8600/6500
Flexural strength	ISO 178	MPa	dry/cond.	280/210
Charpy unnotched impact strength <sup>3)</sup> +23°C	ISO 179/1eU	kJ/m <sup>2</sup>	dry/cond.	85/100
Charpy unnotched impact strength -30°C	ISO 179/1eU	kJ/m <sup>2</sup>	dry	70
Charpy notched impact strength <sup>3)</sup> +23°C	ISO 179/1eA	kJ/m <sup>2</sup>	dry/cond.	13.0/22.0
Charpy notched impact strength -30°C	ISO 179/1eA	kJ/m <sup>2</sup>	dry	10.0
Izod notched impact strength 1A <sup>3)</sup> +23°C	ISO 180/1A	kJ/m <sup>2</sup>	dry/cond.	11.5/15.5
Izod notched impact strength 1A -30°C	ISO 180/1A	kJ/m <sup>2</sup>	dry	
Ball indentation hardness H 358/30, H 961/30*	ISO 2039-1	MPa	dry/cond.	240*/190*
<b>Thermal properties</b>				
Deflection temperature 1.8 MPa (HDT A)	ISO 75-2	°C	-	250
Deflection temperature 0.45 MPa (HDT B)	ISO 75-2	°C	-	250
Max. service temperature (short cycle operation) <sup>2)</sup>	-	°C	-	240
Temperature index at 50% loss of tensile strength after 20000 h / 5000 h	IEC 216-1	°C	-	145 / 175
Thermal coefficient of linear expansion, longitudinal / transverse (23-80)°C	DIN 53752	10 <sup>-4</sup> /K	-	0.2 - 0.3 / 0.6 - 0.7
Thermal conductivity	DIN 52 612	W(m · K)	-	0.35
Specific heat capacity	-	J(kg · K)	-	1500.00
<b>Electrical properties</b>				
Dielectric constant at 1 MHz	IEC 60250	-	dry/cond.	3.5/5.6
Dissipation factor at 1 MHz	IEC 60250	10 <sup>-4</sup>	dry/cond.	140/3000
Volume resistivity	IEC 60093	Ω · m	dry/cond.	10 <sup>13</sup> /10 <sup>10</sup>
Surface resistivity	IEC 60093	Ω	dry/cond.	10 <sup>12</sup> /10 <sup>10</sup>
CTI, solution A	IEC 60112	-	cond.	450

Footnotes:

1) for uncoloured product, unless defined otherwise in the product name

2) Empirical values determined on articles repeatedly subjected to the temperature concerned for several hours at a time over a period of several years. The proviso is that the articles were properly designed and processed according to our recommendations.

3) N = no break.

6) Test box with central gating, dimensions of base (107-47-1,5) mm,

processing conditions: T<sub>M PAGE</sub> = 260 °C, T<sub>M PAGE</sub> = 290 °C, mould surface temp. MST = 60 °C for unreinforced, MST = 80 °C for reinforced.

Příloha 4 Materiálové vlastnosti PA66 GF-30