



**FAKULTA
STROJNÍ
ČVUT V PRAZE**

Ústav letadlové techniky

**Experimentální ověření mechanických
vlastností insertů v kompozitních
materiálech**

**Experimental evaluation of mechanical
properties of inserts in composite materials**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2023

Jan Cába

Studijní program: B2342 Teoretický základ strojího inženýrství

Studijní obor: 2301R000 Studijní program je bezoborový

Vedoucí práce: Ing. Jiří Teichman



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Cába** Jméno: **Jan** Osobní číslo: **501488**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav letadlové techniky**
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**
Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Experimentální ověření mechanických vlastností insertů v kompozitních materiálech

Název bakalářské práce anglicky:

Experimental evaluation of mechanical properties of inserts in composite materials

Pokyny pro vypracování:

- 1) Proveďte rešerši v oblasti mechanických spojů kompozitních materiálů
- 2) Experimentálně ověřte mechanické vlastnosti jednotlivých spojů
- 3) Porovnejte výsledky měření a navrhnete nejlepší typ insertu

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Jiří Teichman ústav letadlové techniky FS


Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:


Datum zadání bakalářské práce: **28.04.2023**

Termín odevzdání bakalářské práce: **26.05.2023**

Platnost zadání bakalářské práce: _____


Ing. Jiří Teichman
podpis vedoucí(ho) práce



Ing. Milan Dvořák, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry


doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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.

24.4.2023
Datum převzetí zadání


Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou/diplomovou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu, projekty, SW atd.) uvedené v příloženém seznamu.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č.121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne

.....

podpis

Poděkování

V první řadě bych chtěl poděkovat vedoucímu mé práce, panu Ing. Jiřímu Teichmanovi, za možnost pracovat na tomto tématu a také za jeho ochotu při vedení mé práce. Další poděkování si zaslouží pan Ing. Karel Doubrava, Ph.D. za pomoc při provádění jednotlivých zkoušek. Dále bych chtěl poděkovat celému týmu eForce FEE Prague Formula, bez kterého by tato práce nemohla vzniknout. Poděkování patří také mým přátelům a rodině, kteří při mně po celou dobu studia stáli a podporovali mě.

Anotační list

| | |
|-----------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|
| Autor: | Jan Cába |
| Název BP: | Experimentální ověření mechanických vlastností insertů v kompozitních materiálech |
| Rok vyhotovení: | 2023 |
| Studijní program: | B2342 Teoretický základ strojního inženýrství |
| Obor studia: | 2301R000 Studijní program je bezoborový |
| Ústav: | Ústav letadlové techniky |
| Vedoucí BP: | Ing. Jiří Teichman |
| Bibliografické údaje: | Počet stran: 37 Počet Obrázků: 34 Počet grafů: 3 Počet tabulek: 3 Počet příloh: 0 |
| Klíčová slova: | Inserty, Sendvičová kompozitní struktura, Monokok, Formula Student |

Anotace:

Tato práce se zabývá zkoumáním mechanických vlastností různých typů insertů v kompozitní sendvičové struktuře pro závodní vůz v kategorii Formula Student týmu eForce FEE Prague Formula. Jednotlivé typy insertů byly otestovány na vzorcích, které jsou shodné s přesnou skladbou monokoku a jsou testovány na trhacím stroji dle pravidel Formula Student Germany. Na základě výsledků byl zvolen ideální typ insertu podle potřebného využití.

Anotation list

Author: Jan Cába

Title of Bachelor's thesis: Experimental evaluation of mechanical properties of inserts in composite materials

Academic year: 2023

Study program: B2342 Theoretical Fundamentals of Mechanical Engineering

Field of study: 2301R000 No Special Fields of Study

Department: Department of Aerospace Engineering FME

Supervisor: Ing. Jiří Teichman

Bibliographic data:

| | |
|---------------------|----|
| no. of pages: | 37 |
| no. of pictures: | 34 |
| no. of graphs: | 3 |
| no. of tables: | 3 |
| no. of attachments: | 0 |

Key words: Inserts, Composite sandwich structure, Monocoque, Formula Student

Anotation:

This thesis deals with the examination of the mechanical properties of different types of inserts in a composite sandwich structure for a racing Formula Student car of the eForce FEE Prague Formula team. Individual types of inserts were tested on samples that were identical to the exact composition of the monocoque and were tested on a tear machine according to Formula Student Germany rules. Based on the results, an ideal insert type was chosen according to the required usage.

Obsah

| | |
|---------------------------------------------------|----|
| Použité zkratky a symboly | 1 |
| 1. Úvod | 2 |
| 2. Formula student | 3 |
| 2.1. Disciplíny | 4 |
| 2.2. eForce FEE Prague Formula | 5 |
| 3. Kompozitní Materiály | 7 |
| 3.1. Matrice | 8 |
| 3.2. Výztuže | 9 |
| 3.3. Sendvičová kompozitní struktura | 11 |
| 3.4. Technologie výroby | 13 |
| 4. Spojení komponent k sendvičové struktuře | 16 |
| 4.1. Chemická spojení | 16 |
| 4.2. Mechanická spojení | 17 |
| 4.3. Materiály insertů | 19 |
| 5. Experimentální část | 21 |
| 5.1. Výsledná sendvičová struktura | 21 |
| 5.2. Testované inserty | 23 |
| 5.3. Jednotlivé výsledky | 25 |
| 6. Závěr | 31 |
| Zdroje | 32 |
| Seznam obrázků | 34 |
| Seznam grafů | 36 |
| Seznam tabulek | 37 |

Použité zkratky a symboly

| | |
|-----------|------------------------------------------------------------------------------------------|
| FSAE | Formula Society of Automotive Engineers – Asociace zaštiťující závody Formula Student |
| FSG | Formula Student Germany – Asociace zaštiťující závody Formula Student |
| PA66 GF30 | Polyamid s 30% výztuží v podobě skelných vláken |

1. Úvod

V dnešní době dostávají kompozitní materiály stále větší uplatnění v mnohých odvětvích průmyslu. Díky jejich skvělým vlastnostem a variabilitě skladby, umožňují navrhnout díl s rozdílnými vlastnostmi v jednotlivých částech. Mezi jejich nejvýraznější plusy patří vysoká pevnost při nízké hmotnosti a relativní jednoduchost výroby. Tato práce se zabývá sendvičovými strukturami, které vynikají svou vysokou tuhostí a ohybovou pevností. Všechny tyto vlastnosti přispívají k čím dál větší dostupnosti a použitelnosti ve velkém množství průmyslových odvětví, především v leteckém a automobilovém průmyslu.

Díky těmto vlastnostem jsou kompozitní sendvičové struktury hlavním materiálem pro konstrukci závodních speciálů. Po vzoru Formule 1 se i tým eForce FEE Prague Formula rozhodl již v roce 2015 postavit svůj první monokok kompozitní sendvičové struktury.

S rostoucím využitím sendvičových struktur přibývají i různé metody spojování dalších komponentů ke kompozitní sendvičové struktuře. Jednotlivé komponenty můžeme ke kompozitu přilepit, či je dokonce při výrobě rovnou zalaminovat, avšak těmito způsoby dostaneme pouze velice obtížně rozebíratelné spojení. Pro praktičtější využití je potřeba mít jednotlivé díly rozebíratelné, a to ideálně co nejjednodušeji. Pro tyto případy se nejčastěji využívá šroubových spojů. Vzhledem k sendvičové struktuře je nemůžeme použít přímo, jelikož by se struktura zborčila. Do sendvičové struktury musíme přidat insert, který danou oblast vyztuží. Díky tomu můžeme jednotlivé komponenty spojit šroubovým spojením a stávají se jednoduše rozebíratelnými. Ze získaných experimentálních výsledků byly navrženy ideální inserty, které nejenže splňují veškerá pravidla, ale i přísné nároky na hmotnost, tuhost a aplikovatelnost v daném místě.

2. Formula student

Jedná se o jednoznačně největší studentskou soutěž, která působí v oblasti technického inženýrství. Soutěž vznikla v roce 1981 ve Spojených státech amerických pod hlavičkou Formula SAE (Society of Automotive Engineers). První evropská soutěž se konala ve Velké Británii roku 1998. V roce 2013 se pak uskutečnil i první ročník soutěže Formula Student Czech Republic. Zpočátku se jednalo pouze o závody formulí se spalovacími motory, následně v roce 2010 vznikla kategorie čistě elektrických monopostů: Formula Student Electric. Nakonec v roce 2016 přibyla již poslední kategorie, a to čistě autonomních monopostů. Dnes se soutěž řídí dle dvou organizací – Formula SAE a Formula Student Germany. Většina evropských týmů a soutěží se řídí hlavně podle pravidel FSG. Jednotlivá pravidla se příliš neliší, jsou mezi nimi stále menší rozdíly. Soutěže se účastní více než 800 týmů z celého světa. Jednotlivé týmy musí být složeny pouze ze studentů bakalářského a magisterského studia, kteří se díky této soutěži setkají s praxí, která jim často chybí, a seznámí se díky tomu s nejmodernějšími technologiemi, jež se dnes v průmyslu používají. [1]

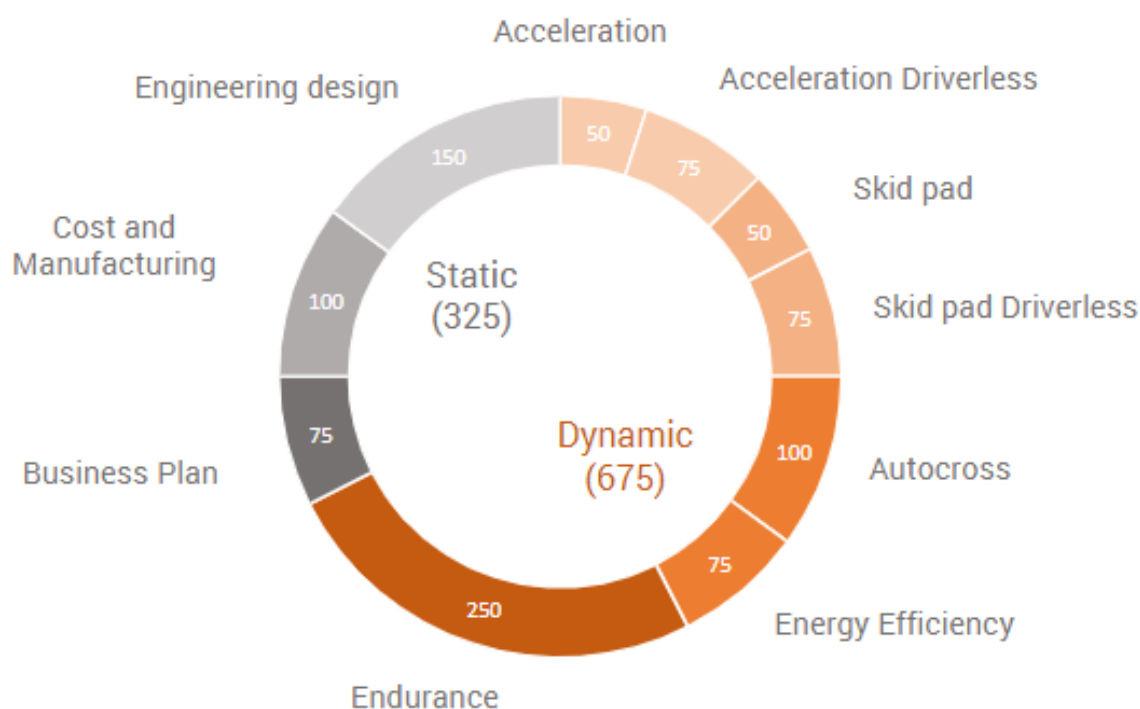


Obrázek 1: Závodní týmy na soutěži FS EAST konané na Hungaroringu [2]

Předtím, než tým vyjede na trať, musí projít mechanickou, elektrickou, autonomní a akumulátorovou přejímkou, na nichž se kontroluje bezpečnost vozu a dodržování všech pravidel. Například na mechanické přejímce musí tým prokázat, že jejich návrh je dostatečně bezpečný a splňuje všechna pravidla. Dále musí předvést nouzové vypnutí vozidla, ke kterému

by mohlo dojít při selhání brzdy a také musí ukázat výsledky jednotlivých testů na vzorcích, jež mají stejnou kompozitní skladbu jako monokok. Tato skutečnost je hlavním důvodem pro psaní této práce, jelikož musíme jednotlivé vzorky prezentovat rozhodčím na závodech.

Soutěž Formula Student není jen o tom postavit co nejrychlejší závodní monopost jako v ostatních soutěžích. Pro vítězství týmu nestačí vyhrát hlavní závod Endurance, ale musí rychlost na trati zkombinovat se znalostí návrhů, konstrukce a finančního plánu. Pravidla FSG momentálně k zisku maximálního počtu bodů vyžadují, aby bylo vozidlo schopné i čistě autonomní jízdy. Celkově tým může získat 1000 bodů, které jsou rozděleny mezi jednotlivé disciplíny – 325 bodů za statické a 675 bodů za dynamické disciplíny, z toho 150 bodů za autonomní jízdu. Na obrázku 2 můžete vidět bodové rozdělení za jednotlivé disciplíny. [1]



Obrázek 2: Bodové ohodnocení jednotlivých disciplín dle FSG

2.1. Disciplíny

2.1.1. Statické disciplíny

Jednotlivé statické disciplíny slouží jako podpůrné disciplíny k dynamickým. Pomáhají studentům se rozvíjet jak v ekonomice, tak v komunikačních schopnostech. Vedle technického vzdělání jsou tyto dovednosti velmi důležité k dalšímu fungování jedince.

- Business Plan Presentation Event – prezentace s cílem přesvědčit potenciálního investora o výhodnosti fiktivního obchodního modelu zahrnujícího studentskou formuli.

- Cost and Manufacturing Event – zpracování všech nákladů ovlivňujících výrobu elektrického monopostu a popis manažerské problematiky s tím spojené. Zde se testuje i uvažování studentů nad různými problémy – ekologie, výpadek dodavatele či nutnost snížení ceny.
- Engineering Design Event – zhodnocení pokročilosti konstrukčního návrhu vozidla, pokrok od minulého roku či úrovně souvisejících technických znalostí. [1]

2.1.2. Dynamické disciplíny

Dynamické disciplíny slouží k otestování jednotlivých vlastností auta – zda všechno funguje, tak jak bylo navrženo a jestli je monopost schopen vydržet požadovanou zátěž.

- Acceleration Event – závod s pevným startem na 75 metrů.
- Skid Pad Event – silně točitá trať ve tvaru osmičky, testuje boční akceleraci vozidla.
- Autocross Event – 1 kilometr dlouhá velmi technická trať, kde se prověřuje komplexní chování vozidla.
- Endurance and Efficiency Event – 22 kilometrů dlouhý vytrvalostní závod, který ověřuje celkovou odolnost návrhu. Dále se hodnotí množství spotřebované energie ku zajetému času.

2.2. eForce FEE Prague Formula

Historie soutěže Formula Student na ČVUT sahá do roku 2007, kdy vznikl tým CTU CarTech, který dodnes staví formule se spalovacím motorem. V roce 2010 členové týmu CTU CarTech rozhodli postavit mimo spalovací formule i čistě elektrický monopost, zatím však pouze s trubkovým rámem. Následně pro vývoj čistě elektrické formule vznikl pod Fakultou elektrotechnickou tým eForce FEE Prague Formula. Ten každý rok od svého vzniku staví nový elektrický monopost, který pomocí získaných dat a optimalizace, dosahuje lepších výsledků než předešlé stroje. Na obrázku 3 lze vidět první českou elektrickou formuli, která vážila přibližně 330 kg a měla výkon 25 kW. [3]



Obrázek 3: První elektrická formule týmu eForce [3]

V roce 2014 tým přichází s revolučním návrhem formule FSE.04x, který disponuje pohonem všech 4 kol. Tento monopost vážil 200 kg a měl výkon 58 kW. Čtvrtá generace elektrické formule byla natolik úspěšná, že v následujícím roce se s ní tým vydal na závody do Ameriky, kde dokázal zvítězit na závodech v USA i v Kanadě. Následující sezónu tým pro svoji pátou generaci vyrobil monokok z kompozitní sendvičové struktury, kde jako jádro byla použita pěna Rohacell. V roce 2021 tým pokračuje ve vývoji co nejlepšího vozidla. Desátá generace měla již čistě sendvičový monokok s jádrem z hliníkové voštiny, akumulátor pod nohama pilota a v každém kole plnohodnotný motor o výkonu 35,37 kW. Maximální okamžitý výkon je však pravidly omezen na 80 kW. Zároveň tým v tomto roce vylepšil FSE.07 o autonomní systémy, díky čemuž byl monopost schopen plně autonomní jízdy. V roce 2022 tým navazuje na vývoj z předešlých let, optimalizuje oba monoposty a zažívá s nimi jednu z nejúspěšnějších sezón v historii týmu. Díky těmto výsledkům se tým posouvá ve světovém žebříčku Formula Student Electric na 17. místo na světě a na 9. místo v Evropě. Nyní se tým soustředí na nelehký úkol – spojení obou formulí do jedné. FSE.12 bude schopna jak jízdy s pilotem, tak i čistě autonomní jízdy dle pravidel FSG. [4] [5]

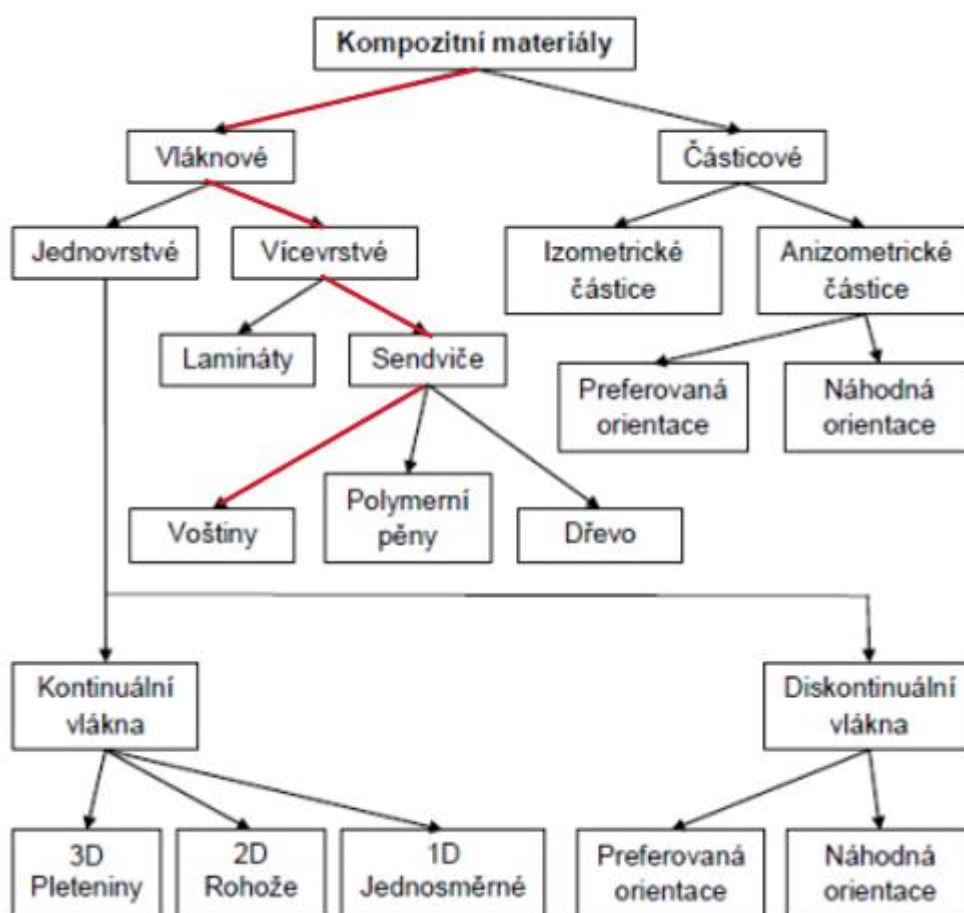


Obrázek 4: Tým eForce, FSE.11 a DV.01 s trofejemi za sezónu 2022 [6]

3. Kompozitní Materiály

Kompozitní materiál se vyznačuje tím, že je složený ze dvou nebo více odlišných složek. Jednotlivé složky mají výrazně odlišné mechanické vlastnosti, a tak díky jejich spojení vzniká materiál, který má takové vlastnosti, kterých by samotné složky nedosáhly. Kombinace různých materiálů a jejich následné spojení nám umožňuje vyrobit díl, dosahující námi požadovaných vlastností. Zároveň jsme schopni měnit složení jednotlivých částí celého dílu, například vyztužit více namáhanou část či odlehčit nenamáhané části. Mezi největší výhody kompozitů patří snížení hmotnosti a zlepšení mechanických vlastností celku.

Kompozity se obecně berou jako směs minimálně dvou různých materiálů, které se v makroměřítku liší složením. Historicky hojně využívaným kompozitem byl i železobeton. Pro účely této práce se zaměříme na uhlíkové kompozity, kde matici tvoří epoxidové pryskyřice a výtuhy uhlíková vlákna. Pro stavbu monokoku je využita sendvičová struktura s hliníkovou voštinou, která je ideální pro vlastnosti závodního vozu.



Obrázek 5: Rozdělení kompozitních materiálů [7]

3.1. Matrice

Matrice v kompozitních materiálech obklopuje a drží výztuhy v pevné struktuře. Zároveň plní několik důležitých funkcí, včetně přenosu sil mezi výztuhami a ochranu výztuh před vnějšími vlivy jako jsou různé chemikálie a vlhkost. Matrice určuje spolu s vnějším vzhledem elektrickou a tepelnou vodivost kompozitu. Matrice bývá nejčastěji tvořena polymery, které umožňují snadnou a levnou výrobu i velmi složitých dílů. Další možností je kovová matrice, kde se nejčastěji používá hliník, hořčík, titan a jejich slitiny. Vyznačují se vysokou tepelnou a elektrickou vodivostí. V neposlední řadě se používají i keramické matrice, které jsou velmi křehké. Mají ale vysokou pevnost v tlaku a dobrou chemickou a teplotní odolnost. [8]

3.1.1. Polymerní matrice

Tyto matrice jsou tvořeny z polymerních pryskyřic, které se polymerizují a tuhnou, čímž vytvářejí pevnou a odolnou hmotu. Mezi největší výhody těchto matric patří snadné zpracování, vysoká absorpce energie, schopnost tlumení vibrací, nízká hmotnost, vysoká chemická odolnost a jejich elektrická nevodivost, což je výhodné v mnoha aplikacích.

Mezi nejpoužívanější polymerní matrice řadíme epoxidové pryskyřice, které se vyznačují vysokou mechanickou pevností a tuhostí, vynikající adhezí na vlákna a substráty s dobrou chemickou odolností. Vyznačují se i vynikající elektrickou izolací a nízkou teplotou vytvrzování pryskyřice.

Ekonomičtější variantou epoxidových pryskyřic jsou polyesterové pryskyřice. Nabízejí také dobré mechanické vlastnosti a odolnost proti korozi, avšak jejich teplotní odolnost a pevnost je ve srovnání s epoxidovými pryskyřicemi nižší.

Vinylesterové pryskyřice jsou známé pro svoji vysokou chemickou odolnost a korozivzdornost. Ve srovnání s polyesterovými pryskyřicemi mají vyšší mechanickou pevnost, ale i vyšší náklady.

Polyamidové pryskyřice nabízejí jednu z největších mechanických pevností a odolností proti otěru. Zároveň jsou tepelně i chemicky odolné, bohužel mají omezené zpracování a vyšší cenu ve srovnání s epoxidovými pryskyřicemi. [8]

3.2. Výztuže

Výztuž v kompozitních materiálech plní funkci strukturálního prvku, který poskytuje kompozitu pevnost a tuhost. Obvykle výztuž tvoří kontinuální vlákna, která jsou uspořádána v matici. Vlákna můžeme dělit podle několika typů. Nejčastěji však podle chemického složení nebo podle pevnosti a tuhosti vláken (vlákna s nízkým, středním, vysokým a ultravysokým modulem). [8]

3.2.1. Skelná vlákna

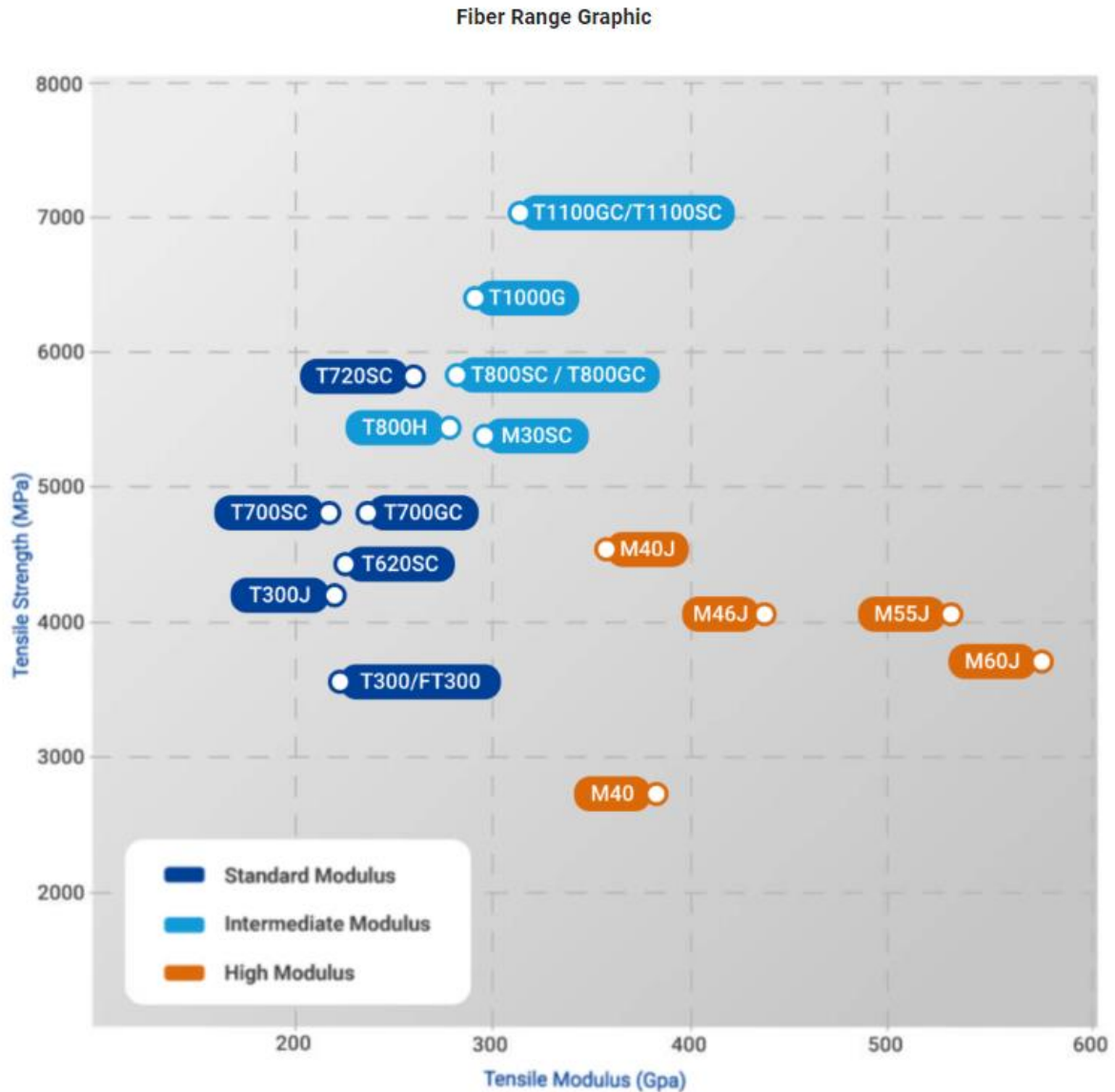
Nejčastěji průmyslově využívaná jsou skelná vlákna, jelikož se vyrábějí ve velkém množství, a díky tomu je jejich cena nízká. Zároveň mají dostatečné mechanické vlastnosti, jsou pružná, lehká, korozivzdorná a dostatečně pevná například pro konstrukci lodí, nádrží a dalších méně náročných průmyslových aplikací. Skelná vlákna se vyrábějí ze sypkého skla, ke kterému se přidávají další oxidické sloučeniny. Díky variabilitě oxidů jsme schopni dosáhnout širokého portfolia různých skelných vláken, které se liší především v pevnosti a chemické odolnosti. [8]

3.2.2. Aramidová vlákna

Nejběžnějším typem aramidového vlákna je kevlar, jenž se vyrábí z polyamidových vláken. Má vysokou pevnost, odolnost proti oděru a tepelnou roztažnost. Díky těmto vlastnostem spolu s vysokým modulem pružnosti se aramidová vlákna využívají v ochranných oblecích, helmách a balistických materiálech. V soutěži Formula student se kevlarová vlákna využívají v místech, kde dochází ke kontaktu s vozovkou a je proto potřeba zajistit odolnost proti oděru. Dále se také používají při konstrukci proti požárních komponentů sloužících pro ochranu pilota. [8]

3.2.3. Uhlíková vlákna

Spolu s aramidovými vlákny se uhlíková vlákna používají na vysoko výkonové díly, u kterých je kladen speciální důraz na nízkou hmotnost, pevnost, tuhost a chemickou odolnost. Uhlíková vlákna mají vynikající mechanické vlastnosti, které získávají díky konfiguraci jednotlivých uhlíkových řetězců. Další jejich výhodou je tepelná vodivost, díky čemuž se teplo efektivně odvádí z kompozitní struktury. Největším omezením pro využití uhlíkových vláken je jejich cena především v porovnání se skelnými vlákny, která jsou mnohonásobně levnější. Momentálně se uhlíková vlákna používají nejčastěji v leteckém průmyslu a automobilovém průmyslu a při výrobě toho nejlepšího sportovního vybavení. Modul pružnosti uhlíkových vláken se pohybuje v rozmezí 200 GPa až 900 GPa a pevnost v rozmezí 1 GPa až 7 GPa. Záleží na konkrétním typu a kvalitě uhlíkových vláken. Jednotlivé vlastnosti různých typů uhlíkových vláken od společnosti Torayca jsou porovnány na obrázku 6. [8] [9]



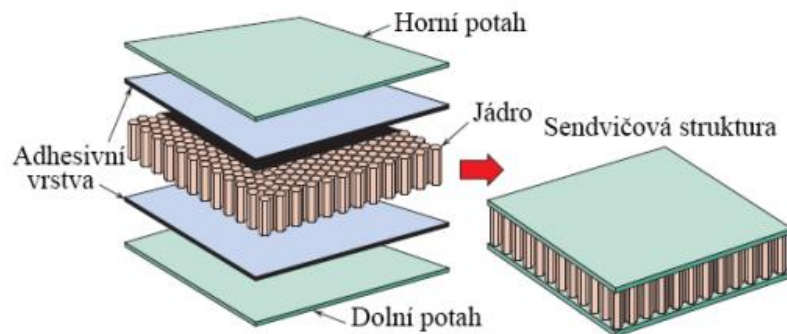
Obrázek 6: Modul pevnosti a pružnosti uhlíkových vláken společnosti Torayca® [9]

3.2.4. Keramická vlákna

Keramická vlákna se vyznačují svojí vysokou pevností a odolností vůči teple. Vyrábí se především z karbidu křemíku – SiC nebo z oxidu křemičitého – SiO₂. Nejčastěji se používají v případech, kde je vyžadována extrémní teplotní odolnost – například motory letadel. Zachovávají si pevnost až do 1300 °C. Jsou využívána především jako výztuž pro kovové matrice nebo s teplotně odolnými polymerními pryskyřicemi, kde tvoří kompozity s vynikajícími mechanickými vlastnostmi a odolností vůči teple. [8]

3.3. Sendvičová kompozitní struktura

Konstrukce kompozitního materiálu vyztužena jádrem se nazývá sendvičový kompozit. Využívá se především pro vysokou ohybovou pevnost a tuhost při pouhém minimálním zvýšení hmotnosti. Pro lepší adhezi jádra k uhlíkovému potahu se využívá vrstva fóliového lepidla. Tato vrstva silně pomáhá k přenosu smykové síly mezi potahy. Mezi další výhody sendvičové struktury patří odolnost proti teplu, rázům a šíření trhlin či únavová odolnost. [10]



Obrázek 7: Složení sendvičové struktury [11]

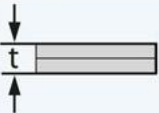
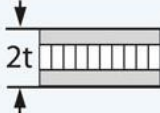
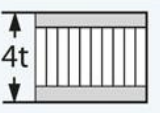
3.3.1. Nomexové voštiny

Dnes patří mezi nejvyužívanější jádra kompozitních sendvičových struktur především nomexové voštiny. Jsou vyráběny fenoliticou impregnací papíru nomex, který se vyrábí z aramidových vláken. Tato jádra mají největší výhodu ve vysoké pevnosti, odolnosti proti tepelným vlivům a zároveň jsou dostatečně lehká. Další výhodou je jejich stálost, odolnost vůči korozi a chemikáliím, nízká absorpce vody přispívá k dlouhodobému zachování pevnosti a stability. Nomexová voština se nejčastěji dodává s hustotou od 29 kg/m^3 do 64 kg/m^3 . Díky těmto vlastnostem se používá nomexová voština v sendvičových kompozitních strukturách, kde je kladen největší důraz na stálost, nízkou hmotnost a vysokou pevnost, jelikož patří mezi nejdražší běžně používaná jádra. [12]

3.3.2. Hliníkové voštiny

Hliníkové voštiny se vyznačují největším poměrem pevnosti a hmotnosti z dostupných materiálů. Na obrázku 8 je vidět relativní porovnání, jak s tloušťkou hliníkového voštinového jádra roste tuhost a pevnost v ohybu při minimálním zvýšení hmotnosti. Hustota voštiny se dá regulovat při výrobě velikostí jednotlivých ok. Hliníková voštinová jádra mají hustotu od 17 kg/m^3 do 70 kg/m^3 v závislosti na velikosti oka jádra. Při stejné velikosti oka jsou ale těžší a násobně levnější než nomexové voštiny. Velká nevýhoda hliníkových jader je jejich náchylnost ke korozi. Při poruše sendvičové struktury může začít hliníkové jádro degradovat a celá struktura se oslabuje. Pro účely Formula Student je hliníkové jádro ideální, jelikož se každou

sezónu staví nový monokok. Problém s postupnou degradací voštin se tak nemusí řešit, protože je monopost stavěn pouze na jednu sezónu. [12] [13]

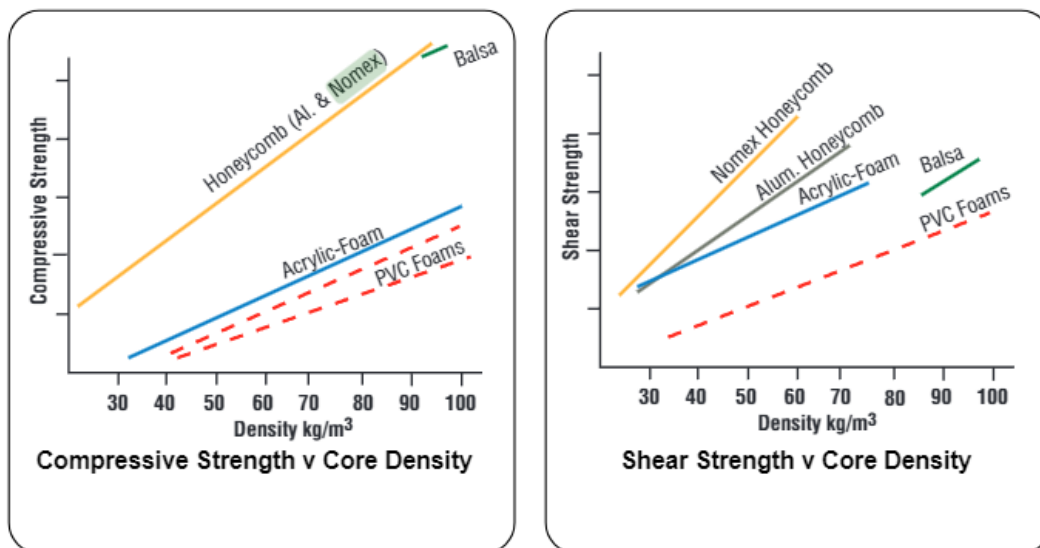
| Material | Homogenní materiál | Síla panelu 1t | Síla panelu 4t |
|-----------------|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| Schéma |  |  |  |
| Tuhost panelu | 1 | 7 | 37 |
| Pevnost v ohybu | 1 | 3,5 | 9,2 |
| Hmotnost | 1 | 1,03 | 1,06 |

Obrázek 8: Srovnání tuhosti a pevnosti hliníkového sendvičového panelu [13]

3.3.3. Pěnová jádra

Pěny jsou dalším velmi častým typem jádra v sendvičové struktuře. Mají opět velice nízkou hustotu a vyznačují se izotropními vlastnostmi. Jejich hlavní výhodou je tvarovatelnost, oproti voštinám není problém vyfrézovat pěnu na přesně daný tvar, na který se následně položí potah. Nejčastěji se využívají jádra z polystyrenu – PS, ten ale nelze použít v kombinaci s polystyrenovými pryskyřicemi, jelikož by rozpustily jeho strukturu. Dále se používají například polyuretanové – PUR, polyetylentereftalátové – PET, polypropylenové – PP a polyvinylchloridové – PVC. [14]

Pro námi požadované vlastnosti by bylo nejvhodnější použít pěnu Rohacell – polymethylacrylimid – tvrzenou akrylátovou pěnu. Tato pěna s minimální nasákavostí pryskyřice se dříve využívala na stavbu monokoku týmu eForce FEE Prague Formula. Později se ale začaly používat hliníkové voštiny, které dosahují lepších vlastností a jsou přibližně dvakrát lehčí. Na obrázku 9 lze vidět porovnání vlastností jednotlivých typů jader. [15]



Obrázek 9: Porovnání pevnosti v tlaku a ve smyku v závislosti na hustotě jádra [16]

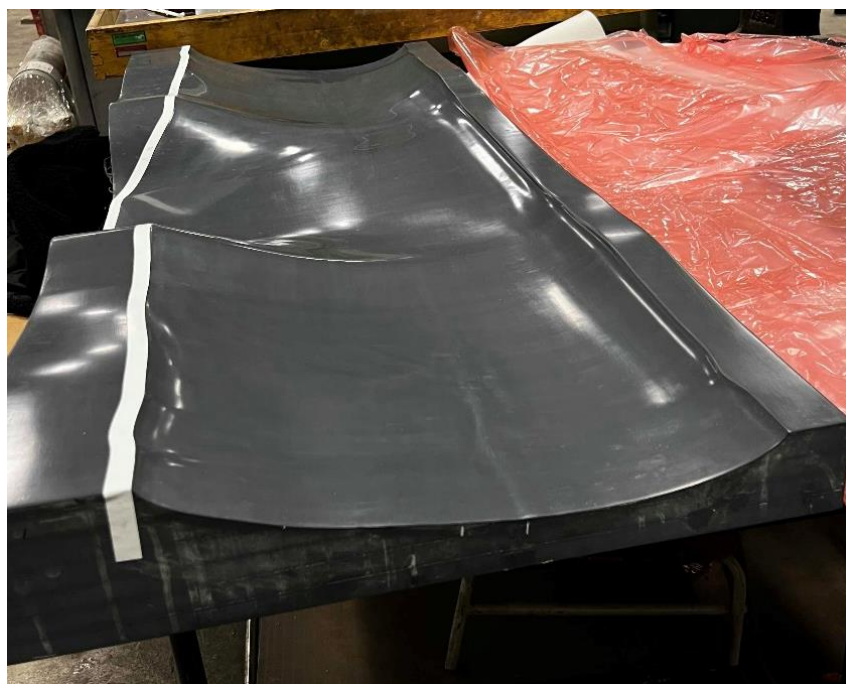
3.4. Technologie výroby

Kompozitní materiály s polymerní matricí můžeme vyrábět vícero způsoby. Záleží však na požadované kvalitě finálního výrobku, nákladech a technickém zázemí výroby. Obecně lze říct, že pro lepší mechanické vlastnosti musíme dosáhnout většího podílu výztuže ku matrici. Jednotlivé postupy jsou tedy silně závislé na dodržení přesného technologického postupu, v co nejčistším prostředí, aby se laminace nekontaminovala a obsahovala pouze požadovaný materiál.

3.4.1. Ruční kontaktní laminování

Nejjednodušším způsobem výroby je mokrá laminace. Využívá se především pro kusovou výrobu jednodušších dílů, na které nejsou kladeny tak vysoké požadavky. Lamináty vytvořené tímto způsobem obsahují nejmenší podíl výztuže, přibližně 50 %.

Laminace probíhá na předem připravenou formu, například z obrobené dřevěné MDF desky, která je jako na obrázku 10 nalakovaná, anebo na obyčejnou plechovou formu. Forma se musí správně vyčistit a následně se na ni musí nanést plnič (například Loctite Frekote B 15), který zaplní mikrotrhliny. Pro lepší vyjmutí odlaminovaného dílu se na formu nanese minimálně 6 vrstev separace Loctite NC 770. Dle informací od výrobce by mezi jednotlivými intervaly natírání mělo být 15 minut a směr nanášení vrstvy by se měl střídát. Na takto připravenou formu se může nanést první vrstva epoxidu – například LG285 smíchaného s tvrdidlem HG287 v poměru 10:4. Nyní střídáme jednotlivé vrstvy uhlíku a epoxidové pryskyřice. Dbáme na to, aby byla uhlíková vlákna řádně prosycena. Pro lepší vlastnosti ve všech směrech skládáme vlákna proti sobě s natočením o 45 stupňů. Po nanesení všech vrstev uhlíku a případných jader na poslední vrstvu prosycené tkaniny položíme strhávací folii, která usnadňuje odstranění všech technických tkanin. Následně na to přidáme perforovanou folii, která má za úkol propustit přebytečný epoxid do odsávací rohože. Ta má za úkol zajistit, aby vzduch správně proudil celým dílem a nasávat přebytečný epoxid. Takto zabalená forma se umístí do vzduchotěsného pytle a připojí se na vývěvu, která odsaje veškerý vzduch. Odsátím vznikne podtlak a jednotlivé kusy kompozitního materiálu jsou atmosférickým tlakem lisovány do formy. Dodržením postupu je zaručen správný tvar a zároveň se vytlačí veškerá přebytečná pryskyřice. Tento typ pryskyřice se za pokojové teploty vytvrdí přibližně za 8 hodin, nebo při teplotě 70 °C za 2 hodiny. Následně je možné díl vyndat z formy a oříznout do požadovaného tvaru.



Obrázek 10: Forma na přední přítláčné křídlo pro ruční laminaci

3.4.2. Infuze

Vakuové prosycování je na podobné bázi jako ruční laminace. Při tomto stylu výroby nenanášíme epoxidovou pryskyřici přímo na formu, ale necháváme ji v zásobníku. Na formu vložíme pouze jednotlivá vlákna uhlíku a celou formu zabalíme do vakuového pytle. Následně je ze zásobníku do formy přiváděna pryskyřice. Na druhé straně formy se stále odsává vzduch a pryskyřice je tak postupně natažena skrz celou formu. Touto metodou jsme schopni zajistit až 60% podíl výztuže, je ovšem náročná na správné těsnění vakuového pytle a rozmístěných uhlíkových tkanin, jelikož na naseparované formě nedrží finální tvar. [14]

3.4.3. Prepreg

Předimpregnovaná vlákna se používají u náročnějších dílů, na které jsou kladeny důraznější požadavky, především vzhledem k procentuálnímu zastoupení výztuže. Vlákna jsou již nasycena epoxidem a stačí je pouze skládat na formu. V tu chvíli se tento způsob hodí pro masovou výrobu, jelikož jednotlivé díly budou téměř totožné.

Vzhledem k nasycení vláken epoxidem se musí prepregy skladovat v mrazácích při $-21\text{ }^{\circ}\text{C}$. Při pokojové teplotě by totiž mohlo dojít ke znehodnocení celého materiálu a částečnému vytvrzení. Pro kompletní vytvrzení se prepregy dávají vytvrdit do autoklávu. Způsob vytvrzení udává výrobce jednotlivých tkanin. V testovaném případě se jedná o 120

minut při teplotě 120 °C a tlaku 3 bary. Vzhledem k vyšší teplotě při vytvrzení preimpregnované tkaniny je potřeba využívat formy z podobného materiálu. Na obrázku 11 je vidět výroba uhlíkové formy s vnitřní skelnou vrstvou a na obrázku 13 lze vidět již vyrobenou formu. Pokud by každý materiál měl v autoklávu jinou teplotní roztažnost, tak by finální kus neměl požadovaný tvar a ani vlastnosti. [14]



Obrázek 11: Nanášení vrstvy skla na formu pro monokok



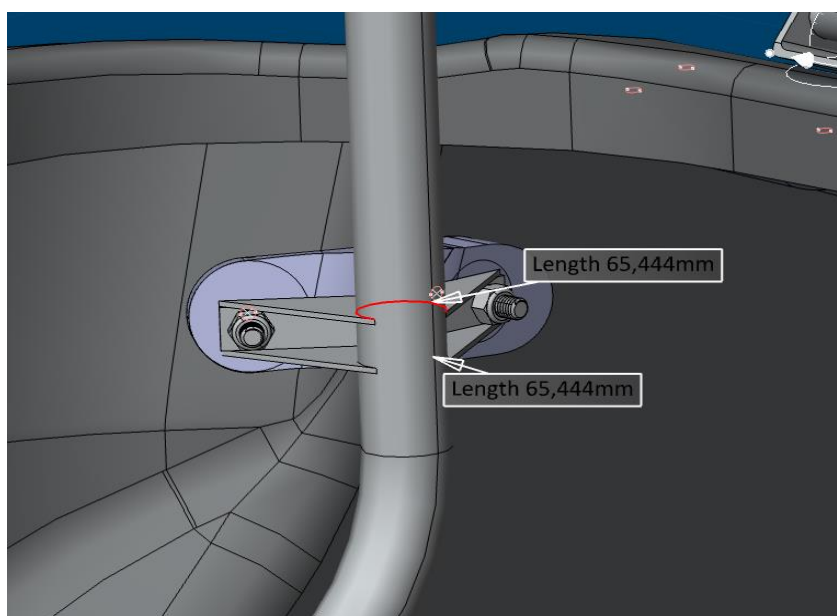
Obrázek 12: Výsledná uhlíková část formy na monokok



Obrázek 13: Zabalená forma monokoku v autoklávu

4. Spojení komponent k sendvičové struktuře

Sendvičová kompozitní struktura má skvělé vlastnosti, které jsou ideální pro výrobu samonosné konstrukce vozidla. Monokok má obecně lepší vlastnosti než srovnatelný trubkový rám. Je pevnější, tužší a zároveň lehčí. Aby vše správně fungovalo, musíme k monokoku připojit další komponenty, například nápravy či ochranný rám. U svařovaného trubkového rámu není problém přivařit úchyt, ke které se následně součásti připojí. Jednotlivé komponenty můžeme k monokoku připevnit dvěma způsoby – chemickým nebo mechanickým spojením. Pravidla určují, že každý spoj, na němž je závislá bezpečnost formule musí být mechanicky zajištěn, například závlačkou či samojistnou maticí. Na obrázku 14 je znázorněno uchycení bezpečnostního rámu k monokoku formule.



Obrázek 14: Příklad uchycení bezpečnostního rámu k monokoku

4.1. Chemická spojení

4.1.1. Lepené spoje

Jejich velkou výhodou je nízká hmotnost, hladká spojení, těsnící vlastnosti a nenarušení struktury kompozitu. Bohužel jsou tyto spojení nerozebíratelné, náchylné na vnější vlivy a mají omezenou tloušťku jednotlivých komponentů. Největší využití lepených spojů najdeme u tenkých dílů, zejména díky průběhu napětí. Tyto vlastnosti jsou dostatečné pouze pro určité typy aplikací, ale pro více namáhané komponenty je potřeba použít kupříkladu mechanické spojení.

4.1.2. Zalaminování

Další možností, jak upevnit jednotlivé komponenty k sendvičové struktuře je zalaminování požadovaného dílu přímo do struktury. Toto spojení je dostatečně odolné a pevné, avšak narušuje celkovou skladbu sendvičové struktury. Zalaminování se využívá pouze zřídka, jelikož je nejméně praktické. Častější možností je zalaminovat pouze insert, přes který se následně dané díly připojí.

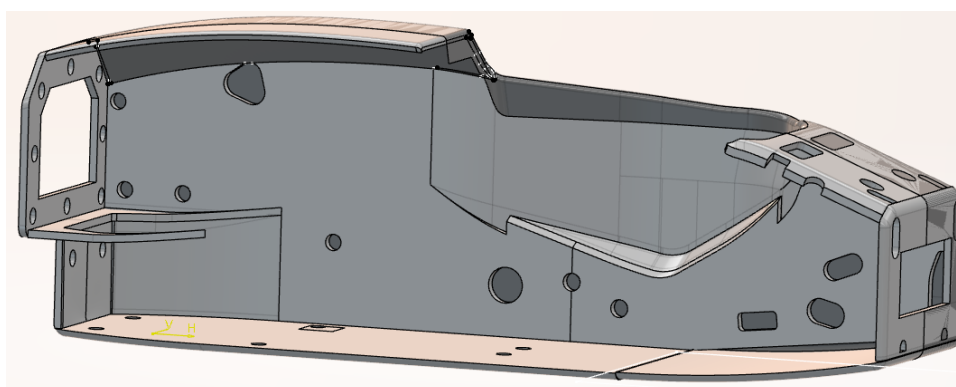
4.2. Mechanická spojení

4.2.1. Neprůchozí inserty

Nejčastěji se při laminaci vlepí do kompozitní struktury kovový insert, který má uvnitř závit. Následně požadovaný díl pouze přišroubujeme. Toto spojení je vhodné pouze pro komponenty, které nejsou kritické pro bezpečnost monopostu, protože jinak nejsme schopni mechanicky pojistit daný spoj. Tímto způsobem můžeme k monokoku připevnit například části aeropaketu. Nevýhodou těchto spojů je riziko povolení insertu, který by se mohl při nesprávné manipulaci začít protáčet a tak by byla znemožněna montáž či demontáž jednotlivých dílů.

4.2.2. Průchozí inserty

Inserty vkládáme do sendvičové struktury již během laminace. V hliníkové voštině připravíme díru, do které vložíme insert požadovaného tvaru. Jednotlivé pozice a tvary insertů jsou vidět na obrázku 15 v modelu monokoku. Po kompletní laminaci celého dílu se do středu insertu vyvrtá díra, do níž se následně uchytlí například šroub se samojistnou maticí. Tímto vzniká jednoduše rozebíratelné spojení, které sice zvyšuje hmotnost, ale je dostatečně odolné a splňuje pravidla. Pro potřeby soutěže nelze u většiny kritických spojů použít jiný typ spojení, jelikož všechny spoje musí být pojištěné a jednoduše kontrolovatelné.



Obrázek 15: Model monokoku s místy pro inserty

Zatížení těchto spojů je přenášeno šroubem a třením desek, které vzniká díky předpjetí spoje. Vlivem opotřebení se celková síla zmenšuje a spoj se uvolňuje. Tento problém naštěstí můžeme vyřešit dodatečným utažením šroubového spojení. Další výhodou je, že pokud se jednotlivá komponenta či šroub poruší, tak není problém spojované součásti nahradit novými. U těchto spojů hrozí riziko vytržení insertu, například jak je vidět na obrázku 16 a 17. Při překročení meze pevnosti sendvičové konstrukce došlo k porušení struktury a vytržení celého insertu i šroubového spoje z monokoku. V tu chvíli je narušená celá struktura a musí následovat složitá oprava. Jak můžeme vidět na obrázku 18, tak je možnost na strany monokoku přilepit ocelové pláty, které monokok vyztuží, zatímco díra po insertu se vyplní směsí epoxidu a bavlněných vloček. Tento spoj bude násobně těžší a již nebude dosahovat takových vlastností jako neporušený monokok, ale bude dostatečně pevný pro další využití.



Obrázek 16: Delaminace monokoku při nehodě



Obrázek 17: Pohled na vytržený insert



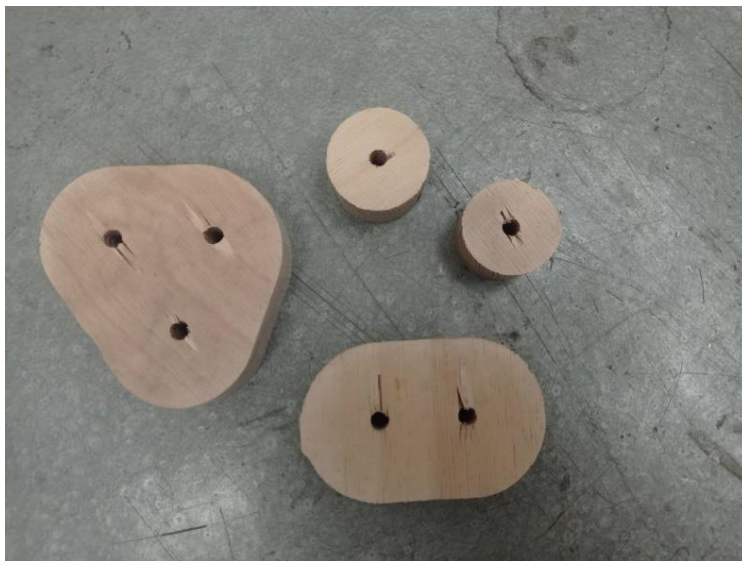
Obrázek 18: Oprava monokoku po vytržení insertu

4.3. Materiály insertů

Inserty se mohou vyrábět z nejrůznějších materiálů, důležité však je, aby správně pasovaly na místo a rozložily tlak. Vzhledem k použití v kompozitní struktuře se snažíme, aby byly inserty co nejlehčí a nepřidávaly zbytečnou váhu navíc. Existují i kovové inserty, které jsou většinou neprůchozí a obsahují závit. Díky těmto insertům můžeme spojit díl se šroubem rovnou bez pomoci matic. Bohužel toto spojení pravidla soutěže nedovolují, a tak musíme použít průchozí insert.

4.3.1. Překližka

Překližka z kvalitního březového dřeva představuje jeden z nejpoužívanějších typů průchozích insertů. Je složena z vrstev dřevěných plátů, které jsou spojeny pomocí speciálních lepidel. Díky jednotlivým vrstvám je překližka dostatečně pevná a odolná vůči namáhání, ale stále lehká, s hustotou pouze 668 kg/m^3 . Tyto vlastnosti jsou vhodné zejména pro letecký průmysl, kde se tento typ insertů používá. Jednotlivé tvary využívaných insertů můžeme vidět na obrázku 19.



Obrázek 19: Příklady insertů z dřevěné překližky

4.3.2. Polyamid

Dalším typem insertů, který používají závodní týmy na ČVUT, je kromě překližky polyamid, který je vyztužen skelnými vlákny – PA66 GF30. Tento materiál disponuje vyšší stálostí a odolností. Zároveň má velmi vysokou pevnost v tahu 91 MPa , což ho činí ideálním pro aplikace, které vyžadují odolnost a vyšší nosnost. Dále má vysokou dimenzionální stabilitu, takže si udržuje své rozměry i při změnách teploty a vlhkosti. To se o překližce říci nedá. Bohužel je znatelně dražší a přibližně 2x těžší – má hustotu 1340 kg/m^3 . [17]

4.3.3. Epoxid

Dále lze jako insert pro tenčí jádro, například z 3 mm nomexové voštiny, využít přímo směs epoxidu a tvrdidla zahuštěného bavlněnými vločkami. Tento způsob se používá také jako nouzové řešení v případě, že v daném místě insert není a je potřeba tam vytvořit šroubový spoj. Například pokud je potřeba odnímatelně připevnit na monokok jednotku, se kterou se původně nepočítalo. Epoxid LG285 se smíchá s tvrdidlem HG285 a s bavlněnými vločkami FB 1/035 v hmotnostním poměru 10:4:2,5. Na obrázku 20 je vidět aplikace vzniklé směsi do místa pro inserty. Po vytvrzení, které jež za pokojové teploty proběhne přibližně do 1 hodiny, je výplň schopna nahradit insert. [18] [7] [19]



Obrázek 20: Nomexová voština s inserty ze směsi epoxidu

5. Experimentální část

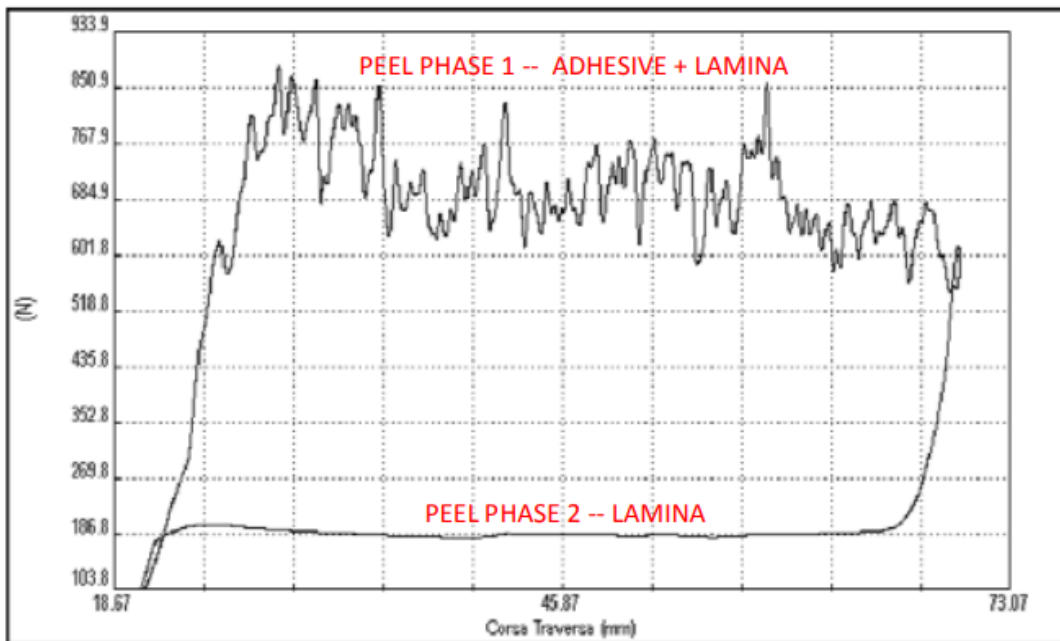
Cílem práce je ověřit pevnost mechanických spojů za použití různých typů a velikostí insertů zalaminovaných do kompozitní sendvičové struktury s jádrem z hliníkové voštiny. Pro potřeby soutěže je potřeba mít, dle pravidla FSG T 3.5.4, jeden vzorek fyzicky přítomen na závodech. Každý typ vzorku byl testován dvakrát, aby bylo alespoň trochu předejito případné odchylce při výrobě jednotlivých vzorků. V ideálním případě by bylo dobré, aby byly jednotlivé typy testovány vícekrát, ale vzhledem k nákladnosti testů a potřebám soutěže jsou dva testy dostačující. Na vzorcích se zjišťuje potřebná síla k vytržení insertů ze sendvičové struktury. Jednotlivé vzorky představují boční část monokoku, ke které je připevněn šroub s okem, do kterého se následně zacvakne pás. Aby vzorek splňoval pravidla pro spodní pásy (anti-submarine belts) musí vydržet sílu 6 500 N a pro břišní pásy (lap belt) musí vydržet sílu 13 000 N. Jednotlivá oka jsou standardizována a obsahují závit 7/16" UNF. Zároveň musí být pod samojistnou maticí dle pravidel z oceli o minimální tloušťce 2 mm, jejíž poloměr se rovná minimálně 1,5 násobku průměru díry pro šroub. V testovaném případě se jedná o podložku s vnějším průměrem 36 mm a s dírou pro šroub 12 mm. [1]

5.1. Výsledná sendvičová struktura

Jednotlivé testované vzorky mají totožnou skladbu i stejný postup výroby. Liší se pouze v insertu. Pro vzorky o rozměrech 300 x 300 mm byla využita prepregová uhlíková tkanina T700S a T300 od firmy Toray, fóliové lepidlo IMP380F, které jak je vidět na obrázku 21 značně zlepšil adhezi hliníkové voštiny o velikosti oka 6 mm a tloušťce 20 mm k uhlíkovým vláknům. Nakonec byla zvolena tato skladba, protože je totožná s testovanou částí monokoku. Do úvahy přicházela i lepší uhlíková tkanina T800S, která je bohužel v dnešní době obtížně sehnatelná a je násobně dražší. Navíc pro účely soutěže Formula Student jsou vlastnosti uhlíkové tkaniny T700S a T300 naprosto dostačující.

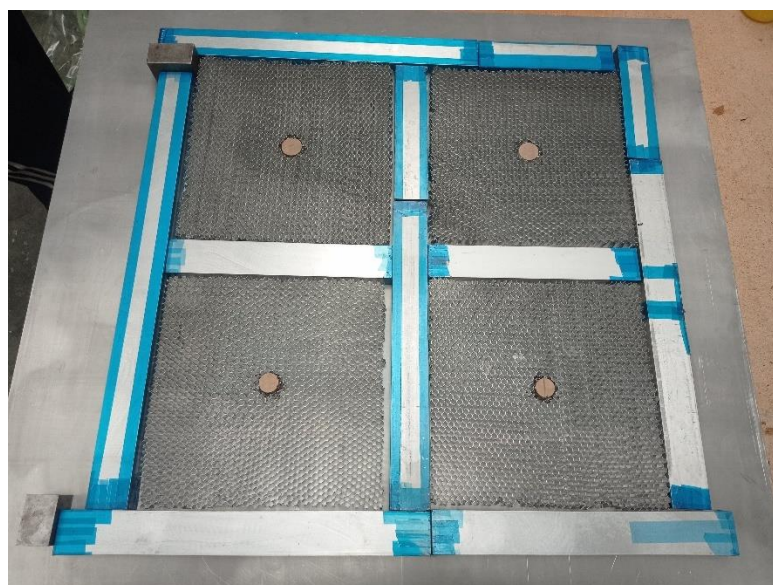
Tabulka 1: Porovnání vlastností a ceny jednotlivých typů uhlíkových tkanin [20]

| Tkanina | Modul pevnosti [MPa] | Modul pružnosti [GPa] | Hustota [g/cm ³] | Cena [Kč/m ²] |
|---------|----------------------|-----------------------|------------------------------|---------------------------|
| T300 | 3530 | 230 | 1,76 | 650 |
| T700S | 4900 | 230 | 1,8 | 1300 |
| T800S | 5880 | 294 | 1,8 | 2000 |



Obrázek 21: Zkouška adheze lepidla dle ASTM D1781 [21]

Laminace probíhá postupným skládáním jednotlivých vrstev sendvičové struktury na sebe a následným vytvrzením v autoklávu při teplotě 120 °C za tlaku 3 bary. Výrobce doporučuje vzorky pro co nejlepší spojení vrstev vytvrzovat při tlaku 1–6 baru po dobu 120 minut s náběhem 2 °C za minutu. Tento náběh je velice důležitý, aby nedošlo ke skokové změně teploty a následnému porušení vlastností materiálu. Zároveň kvůli zvýšenému tlaku v autoklávu je potřeba při laminaci zabezpečit hliníkovou voštinu proti případným deformacím. Na obrázku 22 je vidět zabezpečení vzorků hliníkovými kvádry a obdélníkovými profily tzv. jekly.



Obrázek 22: Příprava jeklů a voštin pro laminaci

5.1.1. Jednotlivé vrstvy

Vrstva 1: Uhlíková tkanina T700S – vnější vrstva, která poskytuje vyšší pevnost a tuhost.

Vrstva 2–4: Uhlíková tkanina T300 – je méně pevná než T700S, ale je lehčí a má dostatečné mechanické vlastnosti.

Vrstva 5: Fóliové lepidlo IMP380F – pomáhá správné přilnavosti uhlíku a hliníkové voštiny.

Vrstva 6: Hliníková voština o tloušťce 20 mm – jádro, které dodává sendvičové struktuře potřebnou tuhost a pevnost v ohybu.

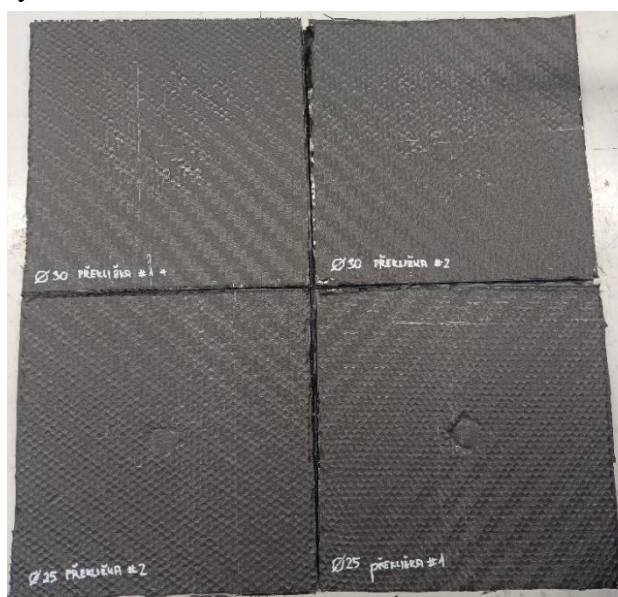
Vrstva 7: Fóliové lepidlo IMP380F – pomáhá správné přilnavosti uhlíku a hliníkové voštiny.

Vrstva 8–10: Uhlíková tkanina T300 – je méně pevná než T700S, ale je lehčí a má dostatečné mechanické vlastnosti.

Vrstva 11: Uhlíková tkanina T700S – vnější vrstva, která poskytuje vyšší pevnost a tuhost.

5.2. Testované inserty

Tato práce se věnuje 3 hlavním vlastnostem insertů v sendvičové struktuře. V první řadě zkoumá závislost vytrhávací síly na velikosti insertu. Pro tento test byly zvoleny inserty z dřevěné překližky o průměrech 25 mm, 30 mm a 35 mm. Další test zkoumá velikost vytrhávací síly na materiálu insertu. Zkoumány jsou 4 typy insertů. První insert je z dřevěné překližky a druhý testovaný vzorek je z polyamidu se skelnými vlákny PA 66 GF30, oba o průměru 30 mm. Další vzorek testuje nouzové řešení v případě chybějícího insertu v potřebném místě, také o přibližném průměru 30 mm ze směsi epoxidu a tvrdidla zahuštěnou bavlněnými vločkami. Pro porovnání se bude testovat ještě vzorek, který neobsahuje žádný insert. Tyto materiály insertů jsou testovány díky tomu, že jsou již několik let nejpoužívanějšími pro inserty na studentských formulích z ČVUT. [18]



Obrázek 23: Část odlaminovaných vzorků

5.2.1. Průběh testování

Do středu insertu odlaminovaných a vytvrzených vzorků byla vyvrtána díra o průměru 12 mm, do ní vložíme šroub s okem a z druhé strany vypodložíme maticí podložkou o průměru 36 mm, což je vyžadováno pravidly. Plně připravené vzorky se uchytí do svařeného přípravku, který je vidět na obrázku 24. Ten se následně upne do trhacího stroje. Finální instalaci vzorku lze vidět na obrázcích 25 a 26. Na obrázku 27 lze vidět, jak se z druhé strany vzorku zacvakne do oka bezpečnostní pás, jehož druhý konec se navlékne na čep připevněný k trhacímu stroji, který následně vyhodnotí sílu potřebnou k vytrhnutí insertu. Pro vybrané případy je potřeba otestovat 6 různých vzorků. Každý typ je testován dvakrát. Celkem je tedy potřeba 12 zkoušek.



Obrázek 24: Svařený přípravek pro uchycení vzorů



Obrázek 25: Testovaný vzorek na trhacím stroji



Obrázek 26: Detail upevnění držáku pro testování vzorků



Obrázek 27: Detail upevnění testovaného vzorku

5.3. Jednotlivé výsledky

Pro každý testovaný vzorek je momentálně nejdůležitější to, zda-li se insert nevytrhne při síle menší než 13 000 N. Pokud insert tuto sílu zvládne, znamená to, že se může použít v boční části monokoku a splňuje pravidla pro upevnění břišních pásu dle FSG. Pokud insert zvládne pouze 6 500 N může se použít alespoň pro spodní pásy.

5.3.1. Závislost maximální síly na materiálu insertu

V tabulce 2 jsou porovnány různé materiály insertů o průměru 30 mm, tloušťce 20 mm, jejich hmotnost a maximální síla, kterou jednotlivé vzorky vydržely.

Tabulka 2: Hmotnosti a maximální síly jednotlivých vzorků s různými materiály insertů

| Vzorek | Hmotnost vzorku [g] | Hmotnost insertu [g] | Maximální síla [kN] |
|---------------|---------------------|----------------------|---------------------|
| Ø30 Překližka | 428 | 9,5 | 11,696 |
| | 423 | 9,5 | 11,164 |
| Ø30 PA66 GF30 | 440 | 19 | 11,38 |
| | 436 | 19 | 11,043 |
| Směs epoxidu | 470 | 50 | 11,289 |
| | 464 | 50 | 14,344 |
| Bez insertu | 413 | 0 | 6,453 |
| | 417 | 0 | 7,168 |

Naměřená data pro stejný materiál insertu se liší především u směsi epoxidu s bavlněnými vložkami. Rozdíl v síle, kterou jednotlivé vzorky vydrží pravděpodobně způsobilo nedůkladné vyplnění hliníkové voštiny. Kvůli tomu nebyla možnost, aby se síla optimálně přenesla do obou potahů. Na první pohled je viditelné, že v poměru hmotnosti ku přenesené síle nejlépe vychází březová překližka, jelikož je dvakrát lehčí a dokáže přenést obdobnou sílu jako PA66 GF30. Zde je však nutno upozornit, že u polyamidových insertů nedošlo k úplnému vytržení, ale k celkové deformaci a delaminaci testovaných vzorků. Přesnou deformaci lze vidět na obrázcích 28 a 29.



Obrázek 28: Deformovaný vzorek s PA66 GF30



Obrázek 29: Detail delaminace vzorku s PA66 GF30

Do určité míry tomu bylo podobně i u insertů z březové překližky. Jak lze vidět na obrázcích 30 a 31 zůstaly vnější vrstvy insertu zalaminované ke kompozitní struktuře a insert se vytrhnul v lepeném spoji překližky. Jelikož je PA66 GF30 stabilní a jednolitý materiál, tak se nevytrhl vůbec a prvně se delaminoval potah.



Obrázek 30: Detail díry a zbytku překližky po vytrnutí insertu Obrázek 31: Detail díry a zbytku překližky po vytrnutí insert

Zároveň bylo ověřeno, že při správném vyplnění hliníkové voštiny dokáže směs epoxidu a bavlněných vloček zastoupit insert a je tedy možné ji aplikovat i do míst, kde původně žádný insert být neměl. Zde se podobně jako u polyamidu potah delaminoval a roztrhl. Detail delaminace je vidět na obrázcích 32 a 33.

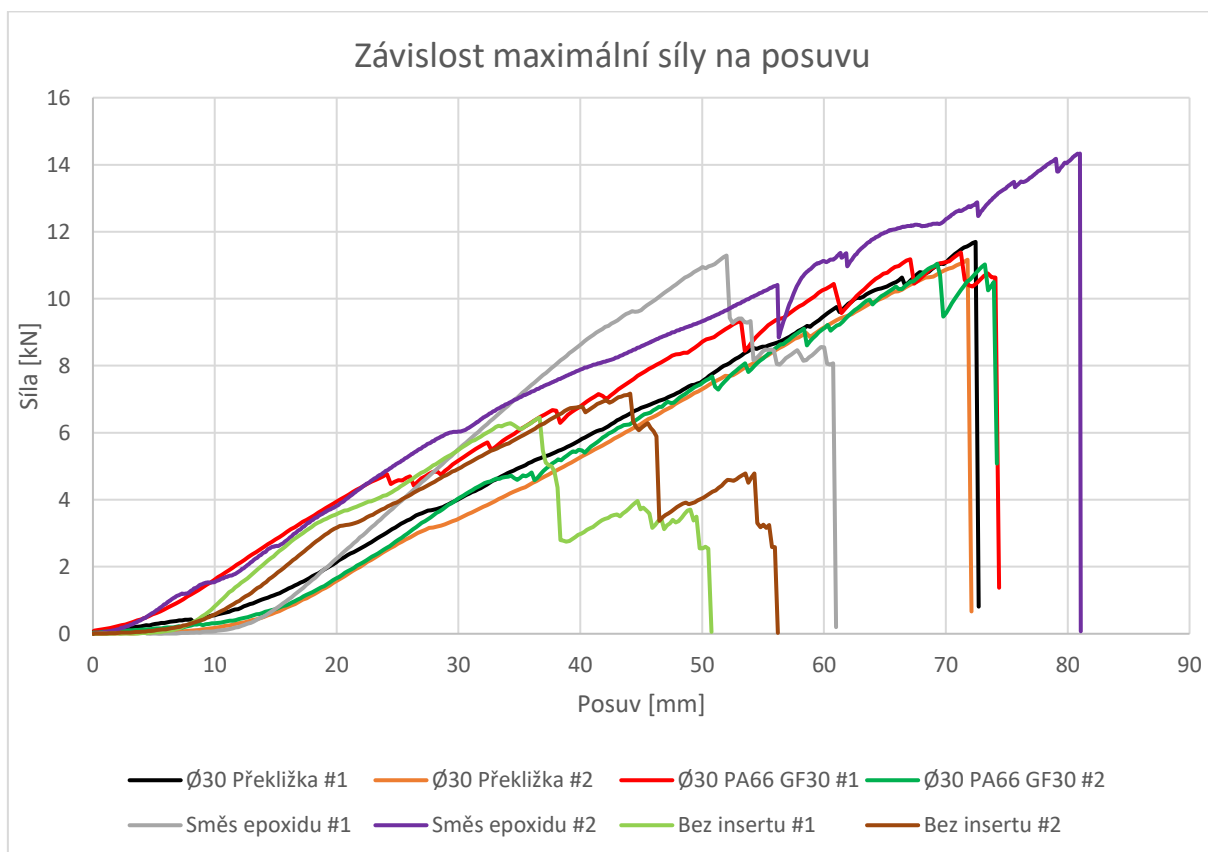


Obrázek 32: Vzorek se směsí epoxidu ihned po vytržení

Obrázek 33: Detail na dleminaci vzorku se směsí epoxidu

Jeden z testovaných vzorků bez insertu vydržel více než 6 500 N, tudíž by mohl být použit pro spodní pásy (anti-submarine belts). Sice tuto sílu vydržel pouze jen jeden vzorek, pro potřeby soutěže Formula Student je to ale dostatečné a stačí ho mít přítomný na závodech. Používat šroubový spoj čistě na sendvičové struktuře s hliníkovým jádrem není vhodné řešení.

Při opakovaném a neopatrném utahování šroubů by se postupně začala hliníková voština pod tlakem podložky deformovat a ztrácela by své vlastnosti. Na grafu 1 je znázorněn průběh sil v závislosti na posuvu. U vzorku bez insertu zpočátku sílu přenášejí oba potahy a po prasknutí prvního potahu, je síla potřebná k vytržení insertu již poloviční a veškerý tlak nese pouze druhý potah.



Graf 1: Závislost maximální síly různých typů insertů na posuvu

5.3.2. Závislost maximální síly na velikosti insertu

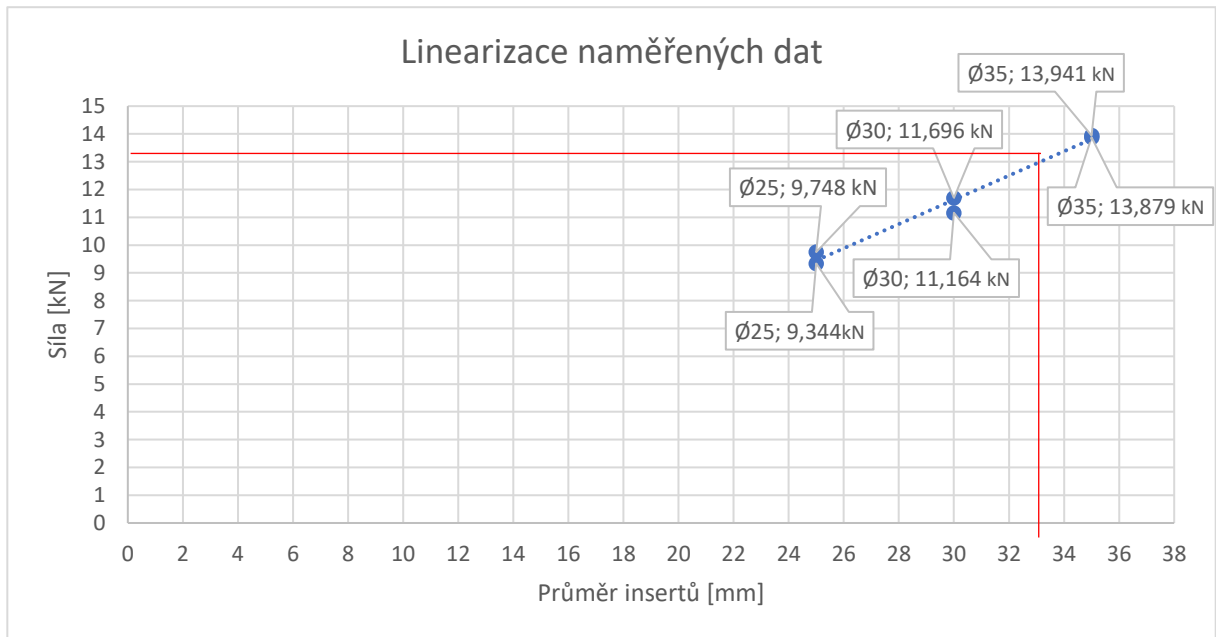
V tabulce 3 jsou porovnány různé průměry insertů z březové překličky o tloušťce 20 mm, jejich hmotnost a maximální síla, kterou jednotlivé vzorky vydržely.

Tabulka 3: Hmotnosti a maximální síly jednotlivých vzorků s rozdílnou velikostí insertů

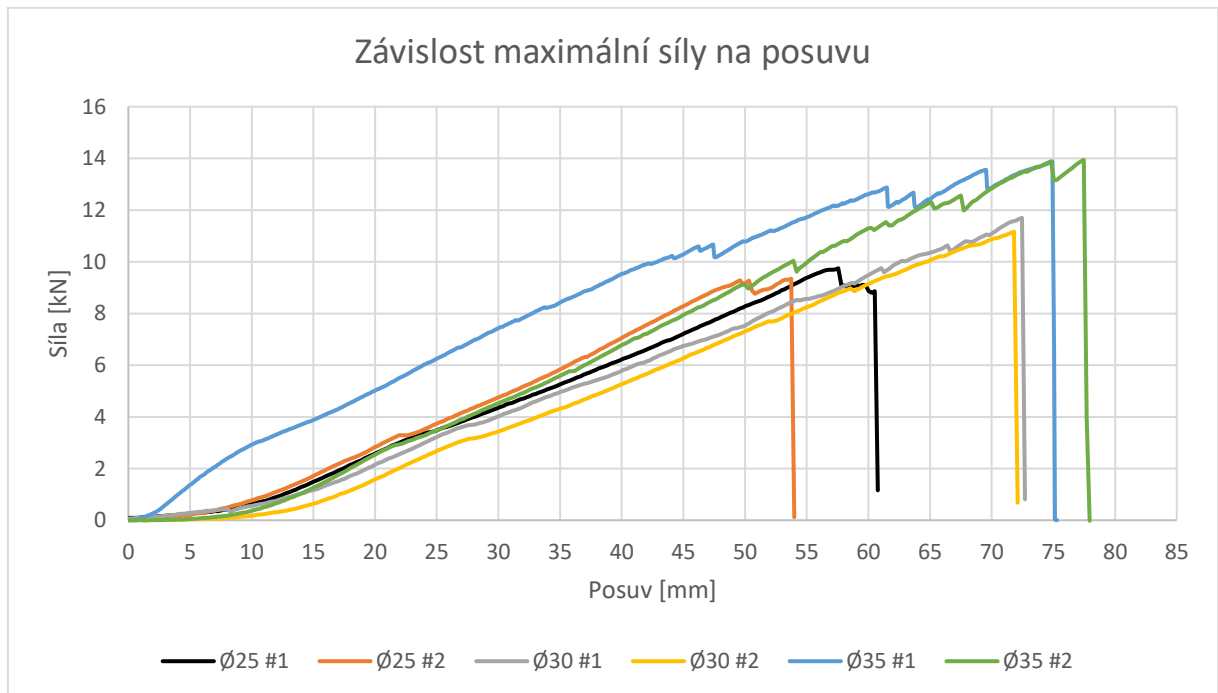
| Vzorek | Hmotnost vzorku [g] | hmotnost insertu [g] | Maximální síla [kN] |
|---------------|---------------------|----------------------|---------------------|
| Ø25 překlička | 417 | 6,6 | 9,748 |
| | 415 | 6,6 | 9,344 |
| Ø30 Přeblička | 428 | 9,5 | 11,696 |
| | 423 | 9,5 | 11,164 |
| Ø35 překlička | 428 | 12,8 | 13,879 |
| | 430 | 12,8 | 13,941 |

Z těchto výsledků je patrné, že maximální síla, při které se insert vytrhne, je přímo úměrná velikosti insertu z březové překližky. Zároveň u dvou vzorků se stejným insertem je vidět částečně jiná hmotnost a maximální síla, kterou vzorek vydržel. Těžší vzorek vydrží větší sílu, jelikož obsahuje více výztuže a matrice.

Linearizací těchto výsledků na grafu 2 vychází, že aby vzorek s touto sendvičovou strukturou a s insertem z dřevěné překližky vydržel alespoň pravidly požadovaných 13 000 N, musí být jeho průměr větší než 33 mm.

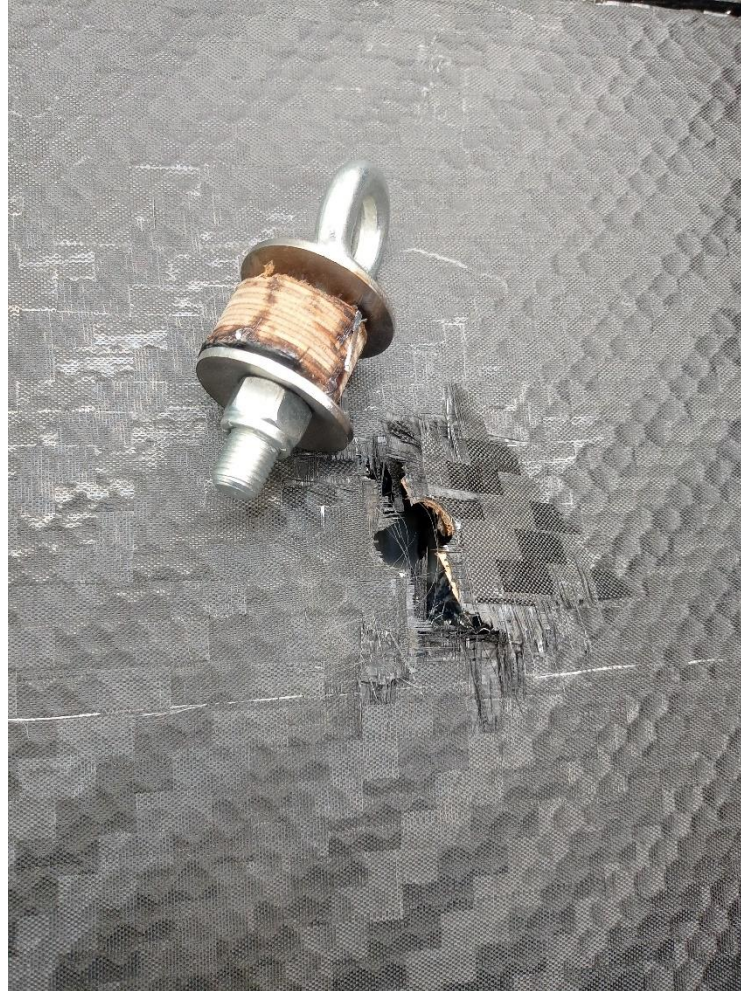


Graf 2: Závislost maximální síly na průměru insert z překližky



Graf 3: Závislost maximální síly překližkových insertů různých průměrů na posuvu

Z výše uvedeného grafu 3 je vidět jednotlivý průběh sil a posuvů při testování vzorků. Posuv je tvořen především rozpínáním pásu, který má oproti kompozitní struktuře vysoký modul pružnosti. První zub na grafech 2 a 3 znázorňuje místo, kde začíná praskat první potah, následně těsně před vytrhnutím insertu je vidět, že se tvoří více zubů na grafu. Je to důsledkem praskání potahu a postupné delaminace vrstev v kompozitní struktuře. Na obrázku 34 je vidět čistě vytržený insert z březové překližky.



Obrázek 34: Vytrhnutý překližkový insert o průměru 25 mm

6. Závěr

Cílem této práce je navrhnout nejlepší typ insertu do monokoku závodního vozu týmu eForce FEE Prague Formula, který je sendvičové struktury s hliníkovým voštinovým jádrem. V samotném monokoku může být několik typů insertů různých velikostí a tvarů. Jako nejlehčí možný vyhovující insert pro břišní pásy vychází březová překližka o průměru 33 mm. Ta je však na hraně bezpečnosti, a proto je pro uchycení břišního pásu zvolen testovaný insert z březového překližky o průměru 35 mm a hmotnosti pouhých 12,8 gramu.

Pro spodní pásy by teoreticky nemusel být žádný insert, sílu 6 500 N by vydržel potah sám o sobě, ale pro bezpečnost bude nejvhodnější zvolit insert z překližky o průměru 20 mm. Tento insert neváží ani 3 gramy, takže se jeho užití pro zvýšení bezpečnosti vyplatí. Pro další inserty v monokoku se využije také březová překližka, jelikož její vlastnosti jsou pro tyto způsoby využití optimální.

Vzhledem k dobrým mechanickým vlastnostem směsi epoxidu LG 285, tvrdidla HG 285 a bavlněných vloček FB 1/035 v hmotnostním poměru 10:4:2,5 se tato směs použije jako insert do tenkých nomexových voštin, kterými je tvořen aeropaket. Pokud bude potřeba v budoucnu vyplnit voštinu pro nově vzniklý šroubový spoj, tak se použije také tato směs v daném poměru. Jedinou nevýhodou této směsi je hmotnost, proto se využije pouze jako nouzové řešení a v monokoku budou využity jen inserty z březové překližky.

Zdroje

- [1] *FSG: Formula Student Germany* [online]. [cit. 2023-02-20]. Dostupné z: https://www.formulastudent.de/fileadmin/user_upload/all/2023/rules/FS-Rules_2023_v1.1.pdf
- [2] *Závodní týmy na soutěži FS EAST konané na Hungaroringu* [online]. [cit. 2023-02-20]. Dostupné z: <https://www.flickr.com/photos/fseast/52310315636/in/album-72177720301564886/>
- [3] *EForce FEE Prague Formula - FSE.01* [online]. [cit. 2023-02-20]. Dostupné z: <https://eforce.cvut.cz/fse-01/>
- [4] *EForce FEE Prague Formula - Úspěchy* [online]. [cit. 2023-03-20]. Dostupné z: <https://eforce.cvut.cz/uspechy/>
- [5] *Formula Student Electric - World Ranking List*. In: *Formula Student - World Ranking Lists* [online]. [cit. 2023-02-21]. Dostupné z: <https://fs-world.org/E/>
- [6] *EForce FEE Prague Formula cloud* [online]. [cit. 2023-05-24]. Dostupné z: <https://eforce.cvut.cz/cloud/s/ArnNPxS9AYKFia6>
- [7] *Kompozitní materiály na bázi uhlíkových vláken* [online]. 2012 [cit. 2023-02-27]. Dostupné z: <https://www.techplasty.cz/material/polyamid/pa66gf30-polyamid-modifikovany-skelnymi-vlakny>
- [8] BARBERO, Ever J. *Introduction to Composite Materials Design*. 2nd Edition. Boca Raton: CRC Press, 2011. ISBN 9780429109478.
- [9] *Range of Torayca® carbon fibers classified by their tensile modulus*. In: *Toray Carbon Fibres Europe* [online]. [cit. 2023-03-27]. Dostupné z: <https://toray-cfe.com/en/products/torayca-carbon-fibers/>
- [10] LADISLAV, Laš. *Mechanika kompozitních materiálů* [online]. 2. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2008 [cit. 2023-05-25]. ISBN 978-80-7043-698-9.
- [11] ZENKER, D. *Sandwich Constructions*. Londýn, 2000.
- [12] *Composite Materials Handbook* [online]. [cit. 2023-05-20]. Dostupné z: <https://businessdocbox.com/Metals/74814122-Composite-materials-handbook.html>

- [13] *Forlit & Metal* [online]. [cit. 2023-02-27]. Dostupné z: <https://www.fmetal.cz/cz/sendvicove-panely/>
- [14] MIRACLE, Daniel a Steven DONALDSON. *ASM Handbook: Volume 21 Composites* [online]. 8. USA: ASM International, 2017 [cit. 2023-02-27]. ISBN 10: 0-87170-703-9. Dostupné z: https://www.asminternational.org/documents/10192/22533690/06781G_ToC_2018+%281%29.pdf/813f8d0f-dcc3-faad-e21c-fd7db7507daf
- [15] Rohacell - A. In: *AMT Composites* [online]. [cit. 2023-02-27]. Dostupné z: <https://www.amtcomposites.co.za/product/rohacell-a/>
- [16] Composite Materials Handbook. In: *Businessdocbox* [online]. [cit. 2023-02-27]. Dostupné z: <https://businessdocbox.com/Metals/74814122-Composite-materials-handbook.html>
- [17] TECAMID 66 GF30 black. In: *Ensinger* [online]. [cit. 2023-02-28]. Dostupné z: <https://www.ensingerplastics.com/cs-cz/polotovary/plast/pa66-tecamid-66-gf30-black>
- [18] *Grm SYSTEMS* [online]. [cit. 2023-02-23]. Dostupné z: <http://www.grm-systems.cz/>
- [19] *Překližka MAPH* [online]. [cit. 2023-02-27]. Dostupné z: <https://www.preklizka.eu/produkt/preklizka-2025001250-bb-bb-briza/>
- [20] Carbon Fiber. In: *TORAYCA® Carbon Fiber* [online]. [cit. 2023-03-27]. Dostupné z: <https://www.toraycma.com/products/carbon-fiber/>
- [21] *G. ANGELONI* [online]. [cit. 2023-02-23]. Dostupné z: <https://www.g-angeloni.com/elenco-prodotti/prepregs/imp-380f/>

Seznam obrázků

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Obrázek 1: Závodní týmy na soutěži FS EAST konané na Hungaroringu [2] | 3 |
| Obrázek 2: Bodové ohodnocení jednotlivých disciplín dle FSG | 4 |
| Obrázek 3: První elektrická formule týmu eForce [3]..... | 5 |
| Obrázek 4: Tým eForce, FSE.11 a DV.01 s trofejemi za sezónu 2022 [6] | 6 |
| Obrázek 5: Rozdělení kompozitních materiálů [7]..... | 7 |
| Obrázek 6: Modul pevnosti a pružnosti uhlíkových vláken společnosti Torayca® [9] | 10 |
| Obrázek 7: Složení sendvičové struktury [11] | 11 |
| Obrázek 8: Srovnání tuhosti a pevnosti hliníkového sendvičového panelu [13] | 12 |
| Obrázek 9: Porovnání pevnosti v tlaku a ve smyku v závislosti na hustotě jádra [16] | 12 |
| Obrázek 10: Forma na přední přitlačné křídlo pro ruční laminaci | 14 |
| Obrázek 11: Nanášení vrstvy skla na formu pro monokok | 15 |
| Obrázek 12: Výsledná uhlíková část formy na monokok | 15 |
| Obrázek 13: Zabalená forma monokoku v autoklávu | 15 |
| Obrázek 14: Příklad uchycení bezpečnostního rámu k monokoku | 16 |
| Obrázek 15: Model monokoku s místy pro inserty | 17 |
| Obrázek 16: Delaminace monokoku při nehodě | 18 |
| Obrázek 17: Pohled na vytržený insert..... | 18 |
| Obrázek 18: Oprava monokoku po vytržení insertu..... | 18 |
| Obrázek 19: Příklady insertů z dřevěné překližky..... | 19 |
| Obrázek 20: Nomexová voština s inserty ze směsi epoxidu | 20 |
| Obrázek 21: Zkouška adheze lepidla dle ASTM D1781 [21] | 22 |
| Obrázek 22: Příprava jeklů a voštín pro laminaci | 22 |
| Obrázek 23: Část odlaminovaných vzorků..... | 23 |
| Obrázek 24: Svařený přípravek pro uchycení vzorů | 24 |
| Obrázek 25: Testovaný vzorek na trhacím stroji..... | 24 |
| Obrázek 26: Detail upevnění držáku pro testování vzorků | 25 |
| Obrázek 27: Detail upevnění testovaného vzorku..... | 25 |
| Obrázek 28: Deformovaný vzorek s PA66 GF30..... | 26 |
| Obrázek 29: Detail delaminace vzorku s PA66 GF30..... | 26 |
| Obrázek 30: Detail díry a zbytku překližky po vytržení insertu | 27 |

| | |
|----------------------------------------------------------------------|----|
| Obrázek 31: Detail díry a zbytku překližky po vytrhnutí insert | 27 |
| Obrázek 32: Vzorek se směsí epoxidu ihned po vytržení | 27 |
| Obrázek 33: Detail na dleminaci vzorku se směsí epoxidu..... | 27 |
| Obrázek 34: Vytrhnutý překližkový insert o průměru 25 mm | 30 |

Seznam grafů

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Graf 1: Závislost maximální síly různých typů insertů na posuvu | 28 |
| Graf 2: Závislost maximální síly na průměru insert z překližky | 29 |
| Graf 3: Závislost maximální síly překližkových insertů různých průměrů na posuvu..... | 29 |

Seznam tabulek

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabulka 1: Porovnání vlastností a ceny jednotlivých typů uhlíkových tkanin [16] | 21 |
| Tabulka 2: Hmotnosti a maximální síly jednotlivých vzorků s různými materiály insertů | 25 |
| Tabulka 3: Hmotnosti a maximální síly jednotlivých vzorků s rozdílnou velikostí insertů..... | 28 |