

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ
ÚSTAV MATERIÁLOVÉHO INŽENÝRSTVÍ



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

**NÁVRH MATERIÁLŮ PRO AKUMULÁTOROVÝ BOX – FORMULA
STUDENT**

**DESIGN OF MATERIALS FOR ACCUMULATOR CONTAINER –
FORMULA STUDENT**

AUTOR: Josef Med

STUDIJNÍ PROGRAM: Výroba a ekonomika ve strojírenství

VEDOUCÍ PRÁCE: Ing. Elena Čižmárová, Ph.D.

PRAHA 2020

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Med** Jméno: **Josef** Osobní číslo: **473576**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav materiálového inženýrství**
Studijní program: **Výroba a ekonomika ve strojírenství**
Studijní obor: **Technologie, materiály a ekonomika strojírenství**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Návrh materiálů pro akumulátorový box Formula Student

Název bakalářské práce anglicky:

Design of materials for accumulator container Formula Student

Pokyny pro vypracování:

Cílem práce je návrh konstrukce a materiálů pro akumulátorový box Formula Student.

1. Literární rešerše v problematice kompozitních materiálů.
2. Návrh metodického přístupu k řešení problematiky.
3. Provedení experimentu.
4. Vyhodnocení a zpracování naměřených dat.
5. Diskuse a závěry.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Bohumil Meissner, Václav Zilvar. Fyzika polymerů. Struktura a vlastnosti polymerních materiálů. Praha: SNTL, 1988.
- [2] Gottfried W. Ehrenstein. Polymerní kompozitní materiály. Praha: Scientia, 2006.
- [3] Pravidla Formula Student Germany. Německo: FSG, 2019

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

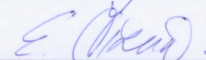
Ing. Elena Čižmárová, Ph.D., ústav materiálového inženýrství FS

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

Datum zadání bakalářské práce: **30.04.2020**

Termín odevzdání bakalářské práce: **31.07.2020**

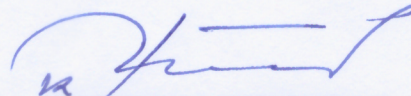
Platnost zadání bakalářské práce: _____



Ing. Elena Čižmárová, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce



prof. RNDr. Petr Špatenka, CSc.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry



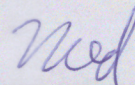
prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

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.

16.6.2020

Datum převzetí zadání



Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně, a to výhradně s použitím pramenů a literatury, uvedených v seznamu citovaných zdrojů.

V Praze dne:

.....

Podpis

Poděkování

Rád bych poděkoval mé vedoucí bakalářské práce paní Ing. Eleně Čižmárové, Ph.D. za cenné rady a vstřícný přístup. Dále bych chtěl poděkovat Ústavu mechaniky, biomechaniky a mechatroniky, zejména panu Ing. Karlu Doubravovi, Ph.D., za realizaci mechanických zkoušek. Poslední poděkování patří týmu eForce FEE Prague Formula, bez kterého by práce nemohla vzniknout a členům týmu za užitečné rady a za pomocnou ruku při výrobě vzorků.

Abstrakt

Tato bakalářská práce se věnuje ucelenému návrhu materiálů pro akumulátorový box do monopostu Formula Student Electric. Jedná se o devátý box navrhnutý pro tým eForce FEE Prague Formula. První část práce se zabývá pravidly a rešerší používaných materiálů. Ve druhé části jsou navrženy kompozitní materiály, které byly dle pravidel Formula Student vyrobeny a otestovány. Na základě dat byla nastavena pevnostní simulace, která je testována na modelu celého boxu. Na závěr jsou vyhodnoceny všechny výsledky a představeny návrhy možných řešení.

Klíčová slova

Akumulátorový box, kompozitní materiály, Formula Student, zkouška tříbodovým ohybem, zkouška stříhem, pevnostní simulace.

Abstract

This bachelor's thesis deals with the design of materials for an accumulator container for a Formula Student Electric monopost. It is the ninth box designed for the eForce FEE Prague Formula team. The first part of this thesis is dedicated to the research of materials used for the accumulator boxes. In the second part, composite materials are proposed, which were manufactured and tested according to the rules of Formula Student. Based on the data, we set up a structural analysis, which is used on a model of the box. In conclusion, all the results and possible solutions are presented.

Keywords

Accumulator container, composite materials, Formula Student, three - point bending test, shear test, structural analysis.

Obsah

Seznam použitých zkratk, veličin a symbolů.....	8
ÚVOD.....	10
1 Soutěž Formula Student	11
1.1 Historie.....	11
1.2 Disciplíny.....	11
1.3 Pravidla týkající se akumulátorového boxu	13
2 Tým eForce FEE Prague Formula	15
2.1 Vývoj používaných materiálů v týmu eForce FEE Prague Formula .	15
2.2 Další materiály a použité technologie.....	17
3 Kompozitní materiály	19
3.1 Dělení kompozitů	19
3.2 Kompozity s polymerní matricí.....	20
3.2.1 Reaktoplastové matrice	21
3.2.2 Termoplastové matrice.....	21
3.3 Vláknové výztuže	22
3.4 Technologie výroby	23
3.4.1 Ruční laminace	23
3.4.2 Prepreg.....	24
3.5 Sendvičové konstrukce	24
3.5.1 Voštinová jádra	25
4 Nehořlavost.....	26
4.1 Klasifikace hořlavosti podle normy UL94 V-0.....	26
4.2 Klasifikace hořlavosti podle normy FAR 25.853	26
5 Mechanické zkoušky.....	27

5.1	Zkouška tříbodovým ohybem	27
5.2	Zkouška potahu ve stříhu	29
6	Cíl práce.....	30
7	Návrh akumulátorového boxu	31
7.1	Akumulátorový box FSE.09	31
7.2	Materiály.....	33
8	Mechanické zkoušky navržených materiálů	35
8.1	Tříbodový ohybový test.....	35
8.2	Zkouška stříhem	38
8.3	Vyhodnocení vzorků.....	42
9	Simulace.....	44
9.1	Simulace tříbodového ohybu	44
9.2	Simulace akumulátorového boxu FSE.09.....	46
10	Závěr.....	49
	Literatura	50

Seznam použitých zkratk, veličin a symbolů

Al		Hliník (chem. značka)
APDL		ANSYS Parametric Design Language
b	[mm]	Tloušťka jádra
ČSN		Česká státní norma
D	[N.m ²]	Ohybová tuhost průřezu
E	[MPa]	Modul pružnosti
eForce		eForce FEE Prague Formula
EP		Epoxidová pryskyřice
$F_{dovolené}$	[N]	Maximální dovolené zatížení
F_{max}	[N]	Maximální síla
FAR		Federal Aviation Regulation
FEE		Faculty of Electrical Engineering/Fakulta elektrotechnická
FS		Formula Student
FSE		Formula Student Electric
FSE.01–09		Označení monopostu týmu eForce
FSG		Formula Student Germany
g	[m.s ⁻²]	Gravitační zrychlení
h	[mm]	Šířka panelu
I	[mm ⁴]	Moment setrvačnosti
IMECHE		Institution of Mechanical Engineers
JAR		Ekvivalent k FAR vytvořený v Evropě
L	[mm]	Vzdálenost podpor
$M_{0,max}$	[N.mm]	maximální ohybový moment
PA		Polyamidy
PP		Polypropylenová pryskyřice

P_s	[N.mm ⁻¹]	Pevnost ve stříhu
R_{m0}		Mez pevnosti v ohybu
S	[mm ²]	Plocha průřezu potahů
$š$	[mm]	Šířka podlahy boxu
SAE		Society of Automotive Engineers
SES		Structural Equivalency Spreadsheet – tabulka k ověření ekvivalence materiálů
t	[mm]	Tloušťka potahu
v	[mm]	Výška stěn boxu
W_0	[mm ³]	Průřezový modul
x	[mm]	Průhyb
π		Ludolfovo číslo (Pí)
$\sigma_{střih}$	[MPa]	Napětí ve smyku
σ_{max}	[MPa]	Mez pevnosti v ohybu
τ_{max}	[MPa]	Maximální smykové napětí

ÚVOD

Tato bakalářská práce vznikla na základě stavby elektrického závodního vozidla Formula Student. Formula Student je inženýrská studentská soutěž, která vznikla v 80. letech 20. století. České Vysoké Učení Technické se do této soutěže zapojilo již v roce 2007 s prvním monopostem se spalovacím motorem. Až v roce 2010 vznikl tým eForce FEE Prague Formula (dále jen eForce), který se věnuje stavbě plně elektrických formulí. Tato práce se věnuje právě monopostům týmu eForce.

Hlavním tématem práce je návrh použitelných materiálů pro výrobu akumulátorového boxu v rámci striktních pravidel. Akumulátorový box je jednou z nejdůležitějších částí formule. Jeho rozměry a hmotnost zásadně ovlivňují tvar a jízdní vlastnosti celého monopostu. Funkcí boxu je zabezpečit bateriové články proti vlivům vnějšího prostředí.

Pravidly jsou dány základní materiály pro konstrukci akumulátorových boxů. Trendem je však využívat alternativní materiály, jako jsou například kompozitní lamináty, kterým se věnuje tato práce. Tyto materiály musí být dle pravidel mechanicky otestovány, výsledky ze zkoušek jsou následně porovnány se základními materiály.

Práce je rozdělena na teoretickou a praktickou část. Teoretická část se zabývá představením soutěže Formula Student, pravidly konstrukce akumulátorového boxu, prezentací týmu eForce, rešerší materiálů a mechanickými zkouškami. Praktická část popisuje konkrétní provedení zkoušek navržených materiálů, jejich vyhodnocení a následné pevnostní simulace. V závěru je shrnuto experimentální zjištění a jsou navržena možná vylepšení pro další generace konstrukce akumulátorového boxu.

1 Soutěž Formula Student

Soutěž Formula Student je nejprestižnější a nejuznávanější studentskou inženýrskou soutěží na světě. Studenti vysokých škol během jednoho roku, tedy dvou semestrů, musí závodní monopost navrhnout, vyrobit, zkompletovat a na závěr s ním i závodit. V současnosti se závodů účastní více než 600 univerzit z celého světa. Studenti mají možnost své teoretické znalosti, které jim nabídne studium, přenést do praxe. Členové si vyzkouší práci v týmu a okusí jaké je to nést odpovědnost za svůj návrh. Během celé sezóny si také musí shánět sponzory a s nimi spojené finance a výrobní kapacity.

1.1 Historie

Soutěž vznikla v roce 1981 ve Spojených Státech Amerických pod záštitou Society of Automotive Engineers (SAE). První ročník se odehrál v Austinu na území Texasu. Do Evropy se tento seriál přesunul až v roce 1998. První závody se odehrály v Anglii pod organizací IMECHE (Institution of Mechanical Engineers) s názvem Formula Student. [1]

V současné době se většina evropských závodů řídí pravidly vydanými FSG. Soutěž se dělí do 3 kategorií formulí – spalovací, elektrické a autonomní. Dobový trend se projevil i zde a většina prestižních univerzit s dlouholetou tradicí již má své zastoupení nejen ve spalovací a elektrické, ale i v autonomní kategorii.

1.2 Disciplíny

Celou soutěž tvoří dva bodované sektory, statický a dynamický. Dohromady lze na závodech získat 1000 bodů viz Graf 1. Týmy jsou hodnoceny zkušenými specialisty z oborů jako je ekonomika a automobilový průmysl, nebo uznávanými inženýry, například z Formule 1 nebo z automobilových korporátů.

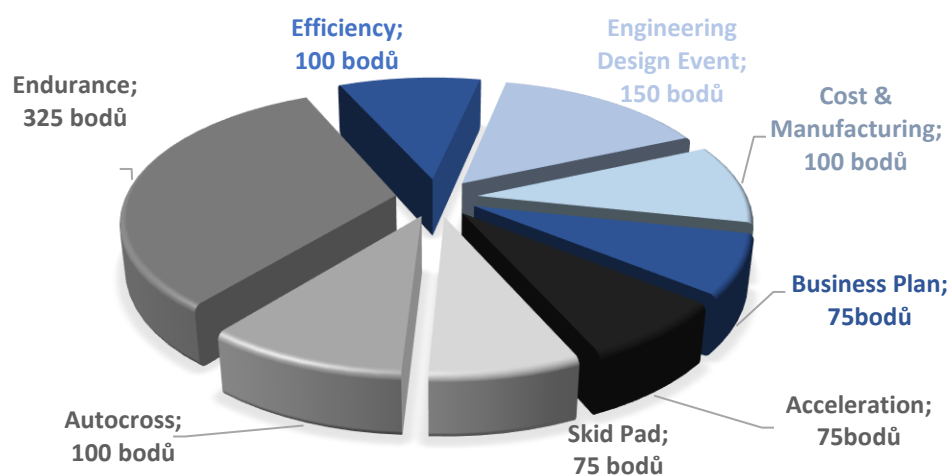
Statické disciplíny se dělí na:

- Engineering Design Event – v překladu – inženýrský návrh. Studenti obhajují svá řešení daných částí formule.
- Cost & Manufacturing – zpracování celého monopostu po ekonomické stránce, v rámci sériové výroby.
- Business Plan – prezentace na libovolné téma propojené s formulí, mající za úkol přesvědčit investora zafinancovat sériovou výrobu formule.

Dynamické disciplíny jsou:

- Acceleration – zrychlení na vzdálenosti 75 m, z tzv. pevného startu.
- Skid Pad – trať ve tvaru „osmičky“, prověření boční akcelerace vozidla.
- Autocross – kvalifikační závod na vzdálenost 1 km. Podle časů se týmy umísťují na počáteční pozice od nejpomalejších po nejrychlejších do hlavního závodu zvaného „Endurance“.
- Endurance – známá jako „královská disciplína“ – za největší bodové ohodnocení. Je to vytrvalostní závod na 22 km, respektive na 22 kol. V polovině závodu se piloti střídají.
- Efficiency – neboli efektivita. Zhodnocení úspornosti vozidla. Měří se kolik vozidlo spotřebuje energie vzhledem k celkovému času.

[1; 2]



Graf 1 Bodové ohodnocení disciplín

1.3 Pravidla týkající se akumulátorového boxu

Konstrukce akumulátorového boxu je omezena striktními pravidly FSG [3]. Výběr pravidel pro mechanický návrh týkající se boxu:

1. **EV5.5.1** Všechny akumulátorové boxy musí ležet uvnitř a musí být připevněny k primární konstrukci nebo k jakékoli další konstrukci připevněné k primární konstrukci formule.
2. **EV5.5.2** Boxy musí být chráněny konstrukcí formule před nárazem z boku nebo zezadu. Nesmí být součástí primární konstrukce.
3. **EV5.5.3** Všechny materiály týkající se akumulátorového boxu musí být nehořlavé, viz T1.2.1.

T1.2.1 Nehořlavost – Materiál musí splnit jednu z následujících norem, nebo jim ekvivalentní:

- UL94 V-0 pro minimální použitou tloušťku materiálu
 - FAR 25.853(a)(1)(i)
4. **EV5.5.4** Akumulátorový box musí být vyroben z oceli nebo z hliníku s následujícími požadavky:
 - Spodní strana boxu musí mít tloušťku nejméně 1,25 mm z oceli, nebo 3,2 mm z hliníku.
 - Vnitřní a vnější svislé stěny, kryty a víka, musí mít tloušťku nejméně 0,9 mm z oceli, nebo 2,3 mm z hliníku.

Jsou povoleny i alternativní materiály, pokud je prokázána ekvivalence podle pravidla T3.3, nebo kompozitní materiály dle pravidla EV5.5.5. To musí být zdokumentováno do SES. Jsou-li použity tyto materiály, musí být při technické kontrole předloženy zkušební vzorky.

5. **EV5.5.5** Kompozitní akumulátorové boxy musí splňovat následující požadavky:
 - Data získaná z testu na stříh a na tříbodový ohyb, viz T3.5, by měla být použita k prokázání dostatečné pevnosti.
 - Každý upevňovací prvek vyžaduje ocelové podložky s minimální tloušťkou 2 mm. Alternativní materiály mohou být použity, pokud je shodná ekvivalence povolených materiálů.

Výpočty a výsledky fyzických zkoušek musí být zahrnuty do SES.

6. **EV5.5.6** Podlaha a stěny boxu akumulátoru musí být spojeny svařením, lepením, nebo musí být přišroubovány.
7. **EV5.5.7** Akumulátorový box se musí skládat z elektricky nevodivých (izolačních) vnitřních vertikálních stěn s výškou minimálně 75% výšky vnějších svislých stěn, které dělí box na sekce o maximální hmotnosti 12 kg.
8. **EV5.5.8** Elektrické segmenty viz EV5.3.2, musí být odděleny pevnou, elektricky izolovanou a protipožární přepážkou, viz T1.2.1.
9. **EV5.5.9** Samotný box musí být připevněn k primární konstrukci vozidla. Každý segment v boxu musí být navržen tak, aby vydržel následující zrychlení:
 - 40 g v podélném směru (dopředu / dozadu)
 - 40 g v příčném směru (vlevo / vpravo)
 - 20 g ve svislém směru (nahoru / dolů)

Výpočty a / nebo zkoušky musí být zdokumentovány v SES.

10. **EV5.5.14** Vnitřní i vnější otvory v akumulátorovém boxu jsou povoleny pouze pro kabelové svazky, větrání, chlazení nebo spojovací prvky. Akumulátor musí být stále v souladu se všemi ostatními pravidly, zejména s pravidly týkajícími se jeho konstrukčních požadavků.

2 Tým eForce FEE Prague Formula

Tým eForce vznikl v roce 2010 s vizí vyvíjet plně elektrická závodní vozidla. Po dvou letech byla postavena první elektrická formule, od té doby se týmu dařilo každou sezónu postavit nový monopost. Na Obr. 2-1 je vyfocen monopost FSE.08. Každým rokem se monoposty vylepšují a tým se snaží konkurovat nejlepším týmům světa. Proto je cílem využívat nejnovější a zároveň dosažitelné technologie současné doby. Rok 2020 je pro tým velkým milníkem, protože nově vyvíjí i formuli do kategorie Formula Student Driverless, tedy plně autonomní závodní vozidlo. [1]



Obr. 2-1 Fotografie z mosteckého závodu FS Czech [1]

2.1 Vývoj používaných materiálů v týmu eForce FEE Prague Formula

Pravidla pro výrobu akumulátorových boxů se v průběhu let měnila a s tím i používané materiály. Níže je vyobrazen vývoj používaných materiálů týmem eForce.

FSE.01

Pro konstrukci prvního akumulátorového boxu byl použit hliník EN AW - 1050A. Největší výhodou zvoleného materiálu byla jeho dostupnost a technologická nenáročnost. Technologie použité při výrobě byly stříhání, ohýbání a následné svařování. Takto vyrobený neosazený box měl hmotnost 8 kg. Rozměry boxu byly 520×550×380 [mm] (d×š×v – měřeno od nejvzdálenější hrany). Viz. Obr. 2-2.



Obr. 2-2: První akumulátorový box do FSE.01 [zdroj: archiv eForce]

FSE.04

Velice průlomovým boxem byl návrh na 4. generaci elektrické formule. Materiál byl sendvičový kompozit laminovaný kontaktně. Výztuží byla uhlíková tkanina keprové vazby, označení: CF Hexcell 43200 Twill 2x2 3K. Gramáž vlákna byla 200 g/m². Jako jádro posloužila pěna Divinycell H60 o hustotě 60 kg/m³. Pro řádné prosycení vláken a jádra byl použit dvousložkový epoxid Gurit Spabond 345, který se musel tepelně vytvrdit. Box byl slepen z několika částí, stěny a přepážky byly přilepeny k podlaze boxu. Celý box vážil pouze 2,4 kg. Rozměry byly 600×470×165 [mm] (d×š×v – měřeno od nejvzdálenější hrany). Viz. Obr. 2-3. [4]



Obr. 2-3: Akumulátorový box FSE.04 [4]

FSE.08

V roce 2019 vznikl kompozitový, akumulátorový box sendvičové struktury. Jeho rozměry se značně zvětšily, z důvodu rozložení článků pro optimalizaci chlazení. Laminát obsahoval aramidovou tkaninu keprové vazby s gramáží 170 kg/m², jádro z pěny Herex C71.75 o hustotě 80 kg/m³ a matricí byla dvousložková pryskyřice LG 285, kterou nebylo nutné vypékat. Technologie výroby byla kontaktní laminace. Hmotnost boxu činila 4,5 kg. Rozměry byly 763×465×194 [mm] (d×š×v – měřeno od nejvzdálenější hrany). Viz. Obr. 2-4.



Obr. 2-4: Akumulátorový box FSE.08 [zdroj: vlastní]

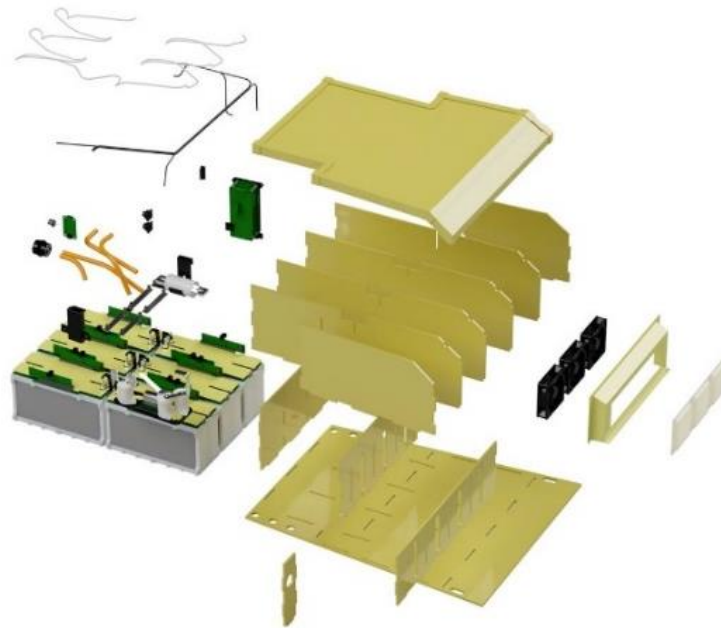
2.2 Další materiály a použité technologie

Pravidly předepsaným materiálem je ocel a hliník o přesně dané tloušťce. I v současné době jsou týmy, které tolik nekladou důraz na hmotnost a kompletují akumulátorový box z ocelových plechů viz Obr. 2-5.



Obr. 2-5: Tým Illini Formula Electric, box vyrobený firmou Protocase [16]

Stále častějším řešením jsou boxy vyrobené z kompozitních materiálů. Vzhledem k jejich mechanickým vlastnostem je možné ušetřit až 20% hmotnosti oproti ocelovým konstrukcím. Kompozitní boxy vznikají tak, že se laminují desky se strukturou sendviče a nechají se nařezat vodním paprskem viz obr. 2-6. Desky se poté slepí do požadovaného tvaru. Nejpoužívanějšími vlákny jsou aramidová nebo skelná, kvůli jejich elektrické nevodivosti. Pokud se použije uhlíková tkanina, musí se v místě, kde je elektronika, zajistit elektricky nevodivými materiály.



Obr. 2-6: Tým Metropolia – kevlarový box [17]

3 Kompozitní materiály

Kompozity jsou stále využívanějšími materiály. Setkáme se s nimi nejen v leteckém a automobilovém průmyslu, ale i ve stavebním průmyslu. Díky jejich kvalitním vlastnostem jsou Formule 1 pevnější, lehčí, bezpečnější a rychlejší. Jsou to heterogenní systémy tvořené minimálně dvěma fázemi, obvykle rozdílného chemického složení, které se od sebe liší svými fyzikálními a mechanickými vlastnostmi. [5]

Jedna z fází je zpravidla tvrdší a pevnější, známá jako výztuž. Zajišťuje tak pevnost a tuhost kompozitu. Druhá složka, tzv. matrice, zastává funkci pojiva, je poddajnější a spojitá. Úkolem matrice je zaručit geometrický tvar, přenos vnějších sil a ochranu vláken. Pomocí matrice je systém vláken a partikulárních komponent prosycen. Až po zpracování vzniká tvarově stálý výrobek, tedy kompozit. Kombinací těchto dvou složek dochází k obecnému zlepšení mechanických vlastností a odstranění nedostatků.

Kompozity jsou anizotropní materiály, tzn. chovají se nesterjnorodě v různých směrech napětí. Proto není jednoduché je dimenzovat. [6]

3.1 Dělení kompozitů

Kompozity mohou být posuzovány podle mnoha různých parametrů, nejčastěji se dělí [7]:

Dle typů výztuží:

- Částicové výztuže – kompozity s nahodilou orientací částic a kompozity s částicemi, které jsou přednostně orientovány (přednostní směr dvourozměrných částic, jako jsou např. uhlíkové destičky).
- Krátkovláknové výztuže – výztuž tvoří vlákna o délce zhruba stonásobku jejich tloušťky (obvykle v nm) a v matrici jsou rozložena, buď náhodně nebo s přednostní orientací.
- Dlouhovláknové výztuže – jsou tvořeny buď dlouhými vlákny o délce desítek až stovek mm orientovanými náhodně nebo vlákny

kontinuálními s jednosměrnou, dvousměrnou nebo trojsměrnou orientací (tkaniny a úplety).

- Hybridní výztuže – kombinace vláken odlišného typu, např. tkaniny složené z uhlíkových a aramidových vláken. K hybridním výztužím se řadí i vlákna obsahující částicová plniva modifikující vlastnosti matrice.

Dle materiálů matric:

- Polymerní matrice – tvoří ji termoplasty (např. polypropylen, polyamid, polykarbonát), reaktoplasty (např. nenasycený polyester, nejčastější je epoxidová pryskyřice) nebo zesíťovaný eleastomer (např. styren-butadien, akrylonitril-butadien).
- Kovová matrice – nejvýznamnější jsou lehké slitiny např. hliníku, hořčíku, titanu, ale i slitiny železa, kobaltu nebo mědi.
- Keramická matrice – nejčastěji ji tvoří karbid a nitrid křemíku, oxidy křemíku a zirkonia.
- Uhlíková matrice – matici tvoří uhlík v různém stavu strukturní uspořádanosti.

Dále se kompozity mohou dělit například podle materiálu sekundární složky, tvaru, velikosti a orientace výztuže v matici (tzn. vazby) nebo dle technologie výroby.

3.2 Kompozity s polymerní maticí

Mezi polymerní kompozity patří reaktoplasty (termosety) a termoplasty. Obecnými vlastnostmi jsou nízká hustota, houževnatost, korozivzdornost, při použití se skelnými vlákny elektrická nevodivost. V současnosti je trendem se postupně orientovat na termoplasty. Důvodem je lepší zpracovatelnost, levnější pořizovací cena, dlouhodobější skladovatelnost a recyklovatelnost. [6; 7]

3.2.1 Reaktoplastové matrice

Matrice bývají vyplněny krátkými molekulami tvořící viskózní tekutinu. Za normální teploty jsou nízkoviskózní, tedy dobře prosycují vlákna výztuže. Aby dosáhly své trvalé konzistence, nejdříve se musí chemicky vytvrdit. Nejlevnější jsou nenasycené polyesterové pryskyřice, jejichž viskozitu lze ovlivnit podílem reaktivního rozpouštědla, nejčastěji se užívá styren. Dobu vytvrzování lze ovlivnit volbou vytvrzovacího systému a teploty. Díky krátké vytvrzovací době lze polyesterové pryskyřice použít v hromadné výrobě. Mechanicky nejlepších vlastností dosahují epoxidové pryskyřice (EP), jsou také vysoce chemicky a tepelně odolné. Tým eForce jsou též používány pro výrobu aero-paketu formule. Používá se ruční nanášení epoxidu s kombinací uhlíkových a aramidových vláken.

Pro výrobu boxu jsou nejdůležitější nehořlavé pryskyřice, které musí splnit normy pro nehořlavost. Mezi ně patří pryskyřice fenolformaldehydové (PF). Vyrábí se kondenzací fenolů a 30% až 50% vodných roztoků aldehydů. Jednotlivé varianty vychází z různých druhů fenolitických surovin, molárních poměrů fenol/formaldehyd a z různých chemických, či fyzikálních modifikací. Může se dosáhnout odolnosti proti hoření a samozhášivosti. Současné využití je v leteckém a automobilovém průmyslu nebo kdekoliv, kde musíme počítat se zabezpečením proti vzniku požáru. [7; 6; 8]

3.2.2 Termoplastové matrice

Termoplastové matrice je možné opakovaně přetvářet kvůli jejich struktuře. Ta je obvykle tvořena dlouhými lineárními řetězci spojenými mezimolekulárními silami a fyzikálním zapletením molekul. Termoplasty jsou za normální teploty v pevném stavu, až po zahřátí nad teplotu tání jsou dostatečně viskózní. Při technologii výroby například vstřikováním do formy, stačí matrici pouze ochladit pod teplotu tvarové stálosti. Mezi dostupnější matrice patří polypropylenové pryskyřice (PP). Pro více mechanicky namáhané díly např. sací potrubí automobilových motorů, kryty agregátů, se používají polyamidy (PA6, PA6.6, PA6.10, PA12) a lineární polyestery. Další matrice mohou být např. z polyimidů, polyetherketonů. [7; 6; 8]

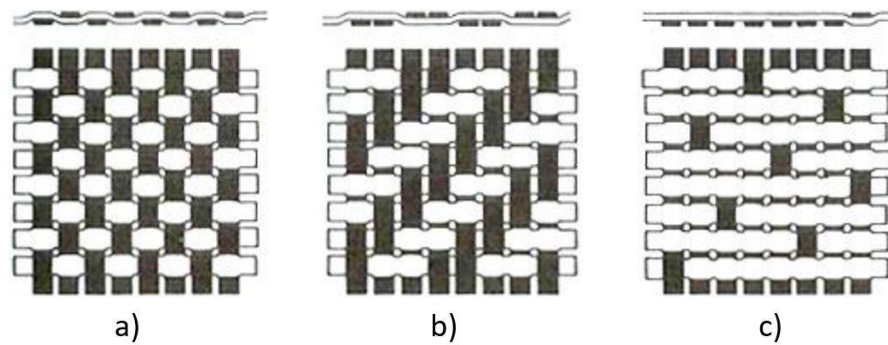
3.3 Vláknové výztuže

Na výrobu boxu budou použity vláknové výztuže uhlíkového a skelného kompozitu. Vzhledem k vlastnostem vláken jsme schopni vytvořit jakýkoli tvar s požadovanými mechanickými vlastnostmi. Jednotlivá vlákna jsou samostatně používána jen výjimečně. Proto vznikly další typy výztuží [6; 8; 9]:

- Roving (pramenec) – nejběžnější typ sdružených pramenců. Počet elementárních vláken v rovingu se pohybuje od 1 do 24 tis vláken, značí se 1K, 3K, až 24K. Číslo značí počet tisíců vláken.
- Rohož – systém nepravidelně rozložených nasekaných kratších vláken, kladených v několika vrstvách, celkově impregnovaný pojivem, obvyklá gramáž 300–900 g/m², použití: výroba forem, tvarově složitě a nepříliš namáhané díly.
- Tkaniny – plošné výrobky z pramenců uložených pravoúhle ve dvou směrech. Zvýšením počtu vláken v osnově vznikají vazby. Druhy vazeb jsou popsány níže, viz Obr. 3-1. Tkaniny jsou snáze zpracovatelné v porovnání s jednosměrně orientovanou výztuží.

Druhy vazeb

- Plátňová vazba – jednoduchá základní vazba, jednoduché zpracování tkaniny vzhledem k dobré rozměrové stálosti a malému otřepu při řezání.
- Keprová vazba – vyšší pevnost a tuhost laminátu způsobena menším zvlněním vláken, tkaniny jsou ohebnější a jsou proto vhodnější pro tvarované prvky než tkaniny s plátňovou vazbou.
- Atlasová (saténová) vazba – má menší vychýlení vláken než keprová vazba, má velmi dobrou řasitelnost a z toho vyplývající vhodnost pro prostorově složitě prvky, atlasové tkaniny umožňují dosáhnout velmi hladký povrch. [6]



Obr. 3-1 a) Plátnová vazba b) Keprová vazba c) Atlasová (saténová) vazba [6]

3.4 Technologie výroby

Existuje mnoho technologií výroby, tato práce se však zabývá pouze ruční laminací a prepregovou technologií. Cílem technologického vývoje je zajistit opakovatelnou kvalitu výroby. Při zpracování, či výrobě kompozitů, mohou pracovníci přijít do kontaktu s reaktivními pryskyřicemi, činidly a rozpouštědly. Může dojít k podráždění sliznice a kůže, v extrémních případech i k otrávení, či poškození zdraví. Proto je nutné dbát na zvýšenou bezpečnost. [6]

3.4.1 Ruční laminace

Nejdostupnější způsob výroby je tzv. kontaktní (ruční) laminování. Je vhodný pro malosériovou, prototypovou výrobu. Nevýhodou této technologie je, že je závislá na znalostech a zkušenostech zpracovatele, z toho vyplývá jakost a reprodukovatelnost konečného výrobku. Nejprve nanese se separátor na připravenou formu. Poté střídavě nanášíme štětcem nebo válečkem matrici a klademe na ní suché vlákno. Důležité je, aby vlákna byla dostatečně prosycena. Nejlepší výrobek vznikne, pokud se nechá vytvrdit ve vakuu, tak, aby na díl působil po celé jeho ploše konstantní tlak. Na díl prosycený matricí se pokládá strhávací tkanina, separační folie a odsávací tkanina, která zajistí odsátí přebytečné matrice a rovnoměrný rozvod tlaku. Dále výrobek zabalíme do uzavřeného pytle, ze kterého

odsajeme vzduch, čímž vznikne vakuum. Tímto dojde k závěrečnému vytvrzení produktu. [6; 9]

3.4.2 Prepreg

Předimpregnovaná výztuž neboli prepreg se nejčastěji používá pro výrobu dílů lisováním nebo vypékáním v autoklávu. Tato technologie je jedna z nejrozšířenějších a nejpoužívanějších. Díky oddělení složitého procesu sycení vláken pojivem dojde k usnadnění výroby dílů. Hlavními výhodami jsou reprodukovatelnost a přesný objemový podíl vláken a matrice.

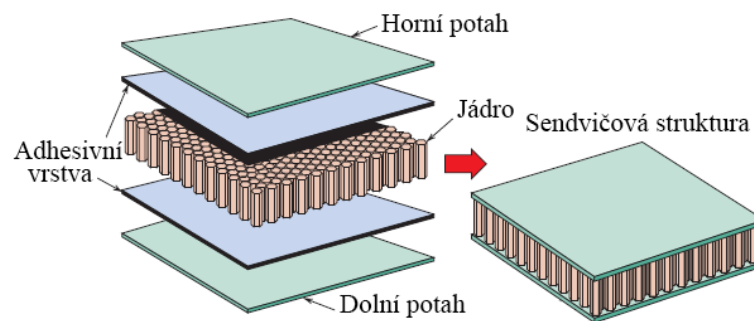
Výroba prepregů se provádí za kontrolovaných a reprodukovatelných podmínek, např. tlakovým prosycením, nástřikem nebo ponořením, na speciálních zařízeních. Při výrobě dochází k zahájení chemické reakce zvýšenou teplotou při tlakovém prosycení a následném ochlazení, čímž se reakce zastaví. Matrici lze nanášet jednostranně i oboustranně. Prepregy se musí skladovat přibližně v teplotě -18 °C a zároveň nesmí přijít do styku s vlhkostí. Takto skladované vydrží 12 měsíců. Pokud jsou prepregy v pokojové teplotě, jejich doba zpracování je 30 dnů, poté ztrácejí výrobní a mechanické vlastnosti. Před vlastním zpracováním se musí prepreg rozmrazit, po dobu alespoň 6 hodin, pokud možno bez přístupu vzduchu. K vytvrzení obvykle dochází v autoklávu, kde na díl působí přetlak a dochází ke vzniku velmi silných vazeb mezi vlákny a matricí. Takto vzniklé díly disponují velice dobrými mechanickými vlastnostmi. V současné době je výroba dílů technologií prepregů značně automatizovaná. [6; 9]

3.5 Sendvičové konstrukce

Sendvičová konstrukce se zpravidla skládá z několika potahů a jádra mezi nimi, s mnohem menším modulem pružnosti, než má potah (Obr. 3-2). Touto výrobní technologií se díly značně odlehčí a lze je používat tam, kde je nutná redukovaná hmotnost (např. v letectví), při zachování mechanických vlastností. U sendvičů je nejdůležitějším místem část mezi

potahem a jádrem, pokud dojde k porušení tohoto spojení, konstrukce ztrácí své mechanické vlastnosti.

Při výrobě je nutné dbát na nejvyšší pevnost v tlaku jádra. Pěny s nízkou hustotou (60 kg/m^3) mají nízkou pevnost v tlaku. Například v autoklávu při působení vysokého tlaku se musí použít speciální rohacellové pěny. Jako jádra se dále využívají voštiny. Mezi přednosti patří jejich pevnost v tlaku a stabilita v ohybu. [9]



Obr. 3-2: Struktura sendvičové konstrukce [10]

3.5.1 Voštinová jádra

Voštiny tvarem připomínají včelí plástve (hexagonál), který je jedním z nejefektivnějších tvarů v přírodě. Materiálem jsou nejčastěji hliníkové, aramidové (označovány jako Nomex), ocelové voštiny, z polypropylenu, ze skelného vlákna nebo titanu. Aby došlo k dobrému spojení jádro-vlákno, musí se použít určitý typ matrice, nebo se musí k jádru vložit tzv. foliové lepidlo. Pokud se buňky voštin vyplní speciálním plničem, získají vyšší pevnost a zlepší se mechanické vlastnosti. Hustota voštin bývá $18\text{--}880 \text{ kg/m}^3$. Ve srovnání voštin a pěn mají voštiny lepší mechanické vlastnosti. Při výrobě zkušebních vzorků bylo pracováno s aramidovými a hliníkovými voštinami zejména z důvodu nehořlavých vlastností a nízké hmotnosti. Toto splňují i speciální pěny např. Divinycell, Airex. [9]

4 Nehořlavost

Nehořlavé materiály jsou takové materiály, které nepodléhají vysokým teplotám. Pokud se dostanou do přímého plamene, měly by být samozhášivé. Kvůli striktním pravidlům je nutné postavit akumulátorový box z materiálů, které mají v materiálových listech uvedenu jednu ze dvou níže zmíněných norem. [3]

4.1 Klasifikace hořlavosti podle normy UL94 V-0

Norma UL94 (vznikla podle normy EN 60695-11-10) charakterizuje zkoušky hořlavosti, které jsou běžné spíše pro elektrotechniku. Nejdůležitějším hlediskem je chování při požáru. Norma se dělí na UL94 HB (Horizontal Burning) nebo UL94 V (Vertical Burning). Zařazení podle normy UL V-0/V-1/V-2 je kvalitnější než zařazení UL94 HB. Při testech záleží na době hoření při vzplanutí zkušebního materiálu, pokud je to po každém zapálení do 10 s, spadá do skupiny V-0, pokud do 30 s tak V-1/2. Důležitým aspektem je udaná nejmenší tloušťka materiálu, pro kterou materiál splňuje normu. [11]

4.2 Klasifikace hořlavosti podle normy FAR 25.853

Z důvodu zajištění bezpečnosti proti ohni v letectví vznikla norma FAR 25.853. Norma vysvětluje, jaké by měl mít daný materiál vlastnosti po vzplanutí a popisuje jejich zkoušky. Prakticky by měl být materiál nehořlavý a samozhášivý. Nejčastěji se jedná o materiály použité v interiérech letadel. Aby materiál získal certifikát, musí projít několika testy: zkoušky hořlavosti při 60 s nebo 12 s vertikálním hořením, zkouška hustoty, toxicita při spalování, uvolňování tepla, hořlavost při 15 s horizontálním hořením. Aparát na zkoušení vertikálního hoření je obdobný jako u zkoušky UL94 V. Kvůli normování v letectví vznikly 2 standardy, které jsou rovnocenné: v USA: FAR a v EU: JAR. Číslem „25“ jsou kryta velká komerční letadla, interiéry letadel jsou kryty sekci „853“, proto FAR 25.853. Tyto standardy musí dodržovat všechny velké letecké společnosti, jako například Boeing, Airbus. [12]

5 Mechanické zkoušky

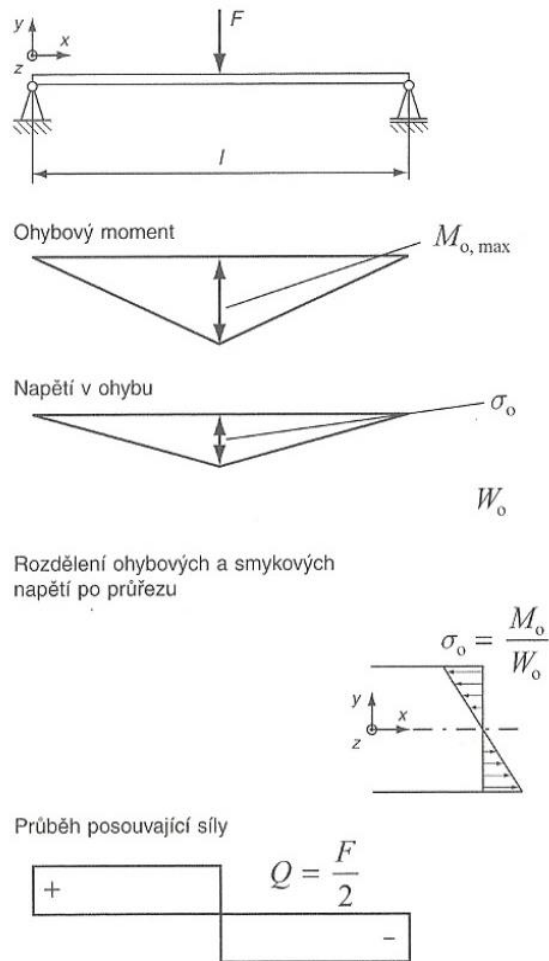
Vzhledem k pravidlům se musí provést řada experimentů k prokázání mechanických vlastností zvolené struktury a materiálu. Celkem je zapotřebí provést dva druhy fyzických zkoušek:

- 1) zkouška tříbodového ohybu,
- 2) zkouška potahu ve stříhu.

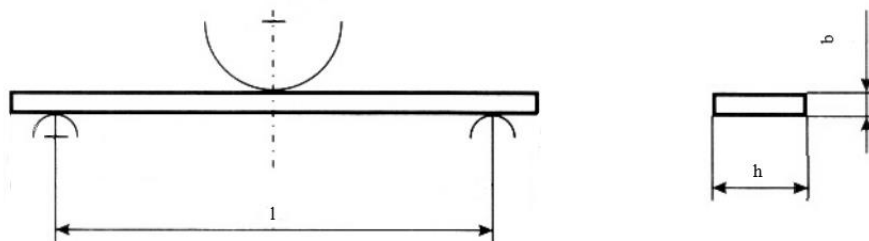
Tyto zkoušky patří mezi statické zkoušky a slouží ke zjištění meze pevnosti, modulu pružnosti a dalších závislostí mezi napětím a deformací za daných podmínek. Metody jsou vhodné pro porovnání materiálů a pro kontrolní testy kvality. [13]

5.1 Zkouška tříbodovým ohybem

Zkouška tříbodovým ohybem je definovaná dle normy ČSN EN ISO 14125 [6]. Tříbodový ohyb je pro všechny materiály obdobný, vždy se jedná o dvě podpory a mezi nimi působící sílu viz Obr 5-2. Rozdíl může být ve vzdálenosti podpěr, tvaru aplikátoru, kterým tlačíme na testovací vzorek. Průběh zkoušky je tvořen tahovým, tlakovým a smykovým namáháním dohromady. Vespod vzorku působí tahové napětí, v horní části je vzorek namáhán tlakem a ve středu vzorku, kde působí síla, je smykové napětí viz Obr.5-1. Následující výpočty veličin k určení modulu pružnosti jsou převzaty ze skript [13].



Obr. 5-1 Průběh ohybových momentů při třibodové zkoušce [6]



Obr. 5-2 Umístění tělesa při třibodové zkoušce. [14]

Z maximálních hodnot se určuje mez pevnosti v ohybu R_{m0} :

$$R_{m0} = \frac{M_{0,max}}{W_0} \text{ [MPa]}.$$

Kde $M_{0,max}$ značí maximální ohybový moment, ten se vypočítá ze vztahu pro výpočet ohybového momentu:

$$M_{0,max} = \frac{F_{max}}{2} \cdot \frac{L}{2} \text{ [N. mm]},$$

kde F_{max} [N] je maximální síla v okamžiku lomu, L [mm] je vzdálenost podpor, W_0 je průřezový modul. Pro průřez ve tvaru obdélníku je dán vztahem:

$$W_0 = \frac{b \cdot h^2}{6} [mm^3],$$

kde b je tloušťka jádra, h je šířka panelu.

Maximální smykové napětí τ_{max} , působící v neutrální rovině nosníku:

$$\tau_{max} = \frac{3 \cdot F_{max}}{4 \cdot b \cdot h} [MPa].$$

Určení modulu pružnosti dle tvaru:

$$E = \frac{(F_2 - F_1) \cdot L^3}{48 \cdot I \cdot (x_2 - x_1)} [MPa],$$

kde F_1, F_2 [N] jsou síly a x_1, x_2 [mm] jsou průhyby, které odečteme z lineární části pracovního diagramu, jedná se o maximální a minimální hodnoty, L [mm] je vzdálenost podpor, I [mm⁴] je moment setrvačnosti, který se pro obdélníkový průřez spočítá dle vzorce:

$$I = \frac{h \cdot b^3}{12} [mm^4].$$

5.2 Zkouška potahu ve stříhu

Tato zkouška slouží kurčení maximálnímu smykovému napětí. V experimentální části práce bylo postupováno přesně podle zkoušky popsané v pravidlech. [3]

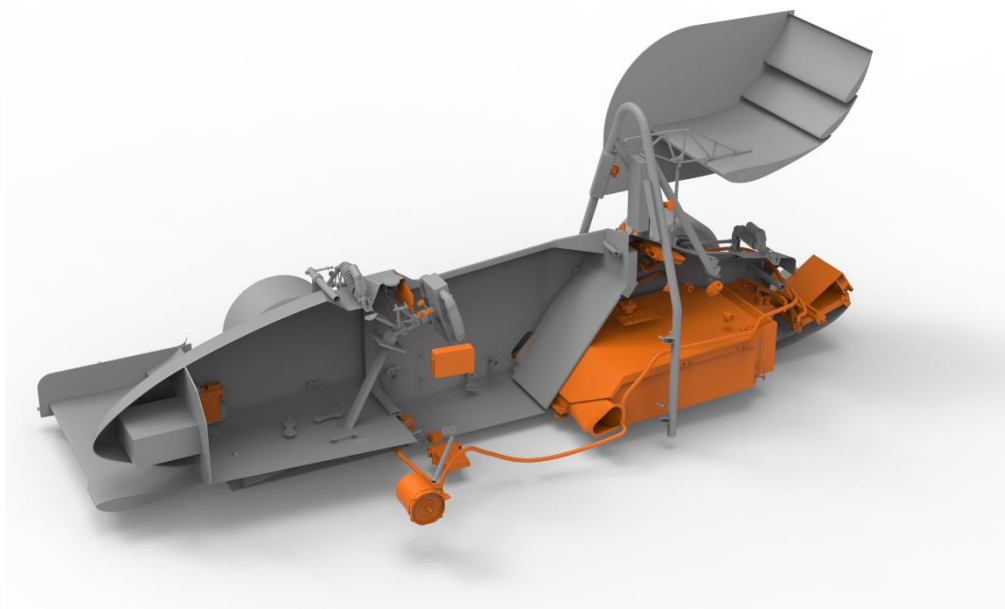
6 Cíl práce

Bakalářská práce si klade za cíl navrhnout použitelné materiály pro výrobu akumulátorového boxu do monopostu FSE týmu eForce FEE Prague Formula. Návrh materiálů se týká zejména kompozitů a jejich zkoušek tak, aby splňovaly pravidla daná soutěží Formula Student Germany. Na základě výsledků z mechanických zkoušek se vyhodnotí neoptimálnější řešení, které se použije pro ověření správnosti simulace.

Simulace má za cíl poukázat na slabá místa akumulátorového boxu, aby se předešlo například delaminaci kompozitu, a tím se zvýšila bezpečnost materiálu.

7 Návrh akumulátorového boxu

Akumulátorový box je jedna z prvních částí formule, která musí být navržena. Velikost akumulátorového boxu ovlivňuje tvar i velikost primární konstrukce formule, tzv. monokok. Akumulátor je nejtěžší součást formule, proto velmi záleží na jeho tvaru a umístění ve formuli. Tyto faktory ovlivňují celkové těžiště, dynamiku a moment setrvačnosti auta. Kompletní konstrukce boxu musí být dostatečně pevná, aby zvládla manipulaci s téměř 50 kg elektroniky a splňovala bezpečnostní pravidla. Cílem je dosáhnout co nejnižší hmotnosti při zachování dostatečné tuhosti. Na Obr. 7-1 je znázorněno umístění akumulátoru v monokoku.



Obr. 7-1: Řez formulí s vyznačenou elektronickou sestavou [zdroj: archiv eForce]

7.1 Akumulátorový box FSE.09

Materiály předepsané pravidly jsou ocel a hliník. Pokud se použijí jiné materiály, např. kompozity, musí se ověřit jejich ekvivalence tím, že se vyrobí vzorky a ty se podle přesných instrukcí v pravidlech otestují [3]. Celkový design je inspirován akumulátorem z předešlé sezóny. Hlavními změnami jsou úchytné body k monokoku, optimalizovaná přední část pro lepší chlazení bateriových článků, čímž se značně usnadní manipulace s akumulátorem při vyndávání ze samotného monokoku viz Obr. 7-2 a Obr. 7-3.



Obr. 7-2 Model akumulátorového boxu FSE.09 s elektronikou



Obr. 7-3 Model akumulátorového boxu FSE.09 bez elektroniky

Pro výrobu akumulátoru je možné použít různé materiály. V tabulce 1 je uvedeno porovnání hmotností těchto materiálů, hmotnosti byly vypočítány na základě ploch z modelu a hustot vyhledaných v materiálových listech

Tabulka 1: Vypočtené hmotnosti použitelných materiálů pro výrobu akumulátorového boxu

Materiál	Jádru	Gramáž prepregu [g/m ²]	Hustota [kg/m ³]	Hmotnost [kg]
Ocel A36	-	-	7800	9,52
Hliník EN AW 1050A	-	-	2700	8,11
Kompozit – uhlík. prepreg	Al voština	365	82	5,04
Kompozit – uhlík. prepreg	Aramid voština	365	48	4,74
Kompozit – uhlík. prepreg	Airex R82.80	365	80	5,02
Kompozit – skelný prepreg	Al voština	490	82	6,52
Kompozit – skelný prepreg	Aramid voština	490	48	6,23
Kompozit – skelný prepreg	Airex R82.81	490	80	6,50

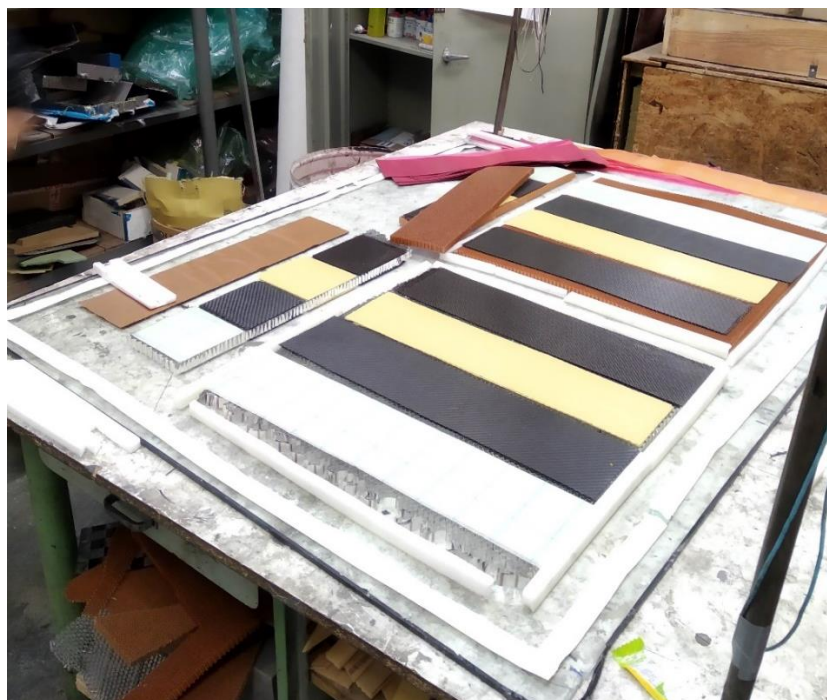
Z tabulky je zřejmé, že z hlediska hmotnosti jsou kompozitní materiály nevhodnější.

7.2 Materiály

Podle předchozích zkušeností bylo navrženo rozvržení skladby laminátu. Jedná se tedy o sendvičový kompozit s jádrem o tloušťce 15 mm a potah s konečnou tloušťkou v průměru 2 mm. Testované vzorky jsou vyrobeny v zázemí týmu eForce. Prepregy získané pro tuto práci byly od švýcarského výrobce Gurit. Tato firma je jedním z největších výrobců materiálů pro letecký průmysl. V tabulce 2 je detailní rozpis struktury laminátů. Uvedené informace jsou z materiálových listů. Nasycená vlákna jsou skládána pod nulovým úhlem v pěti vrstvách.

Tabulka 2 Použité materiály a základní vlastnosti vzorků

Označení vzorku	Prepreg	Jádro	Rozměr [mm ²]	Tloušťka s potahem [mm]	Hmotnost [g]
1	EKKF420C-C20-45	Aramid. voština	106*507	17,16	224
2	EKKF420C-C20-45	Al voština	106*501	17,13	251
3	PHG600-68-37- T2	Aramid voština	100*504	17,46	251
4	PHG600-68-37- T2	Al voština	101*503	17,37	300



Obr. 7-4 Fotografie – výroba vzorků

EHKF 420C-C20-45

Tkanina je 3K HTA uhlíkových vláken v keprové vazbě 2/2. Výztuž je předimpregnovaná ze 40 % epoxidovou pryskyřicí EH420. Prepreg splňuje normu FAR 25.853, je samozhášivý. Krátká doba vypékání (10 min při 160 °C).

PHG600-68-37-T2

Tkanina je ze skelné pryže v saténové vazbě. Výztuž je předimpregnovaná ze 40 % fenolovou pryskyřicí PH600. Prepreg splňuje normu FAR 25.853, je samozhášivý.

Tabulka 3: Mechanické vlastnosti použitých prepregů

Označení prepregu	PHG600-68-37	EHKF 420C-C20-45
Gramáž prepregu [g/m ²]	490	365
Hustota [kg/m ³]	2450	1825
Mez pevnosti v ohybu [MPa]	470	1000
Modul pružnosti v ohybu [GPa]	19	60
Mez pevnosti v tahu [MPa]	390	-
Interlaminární smyková pevnost [MPa]	15	70

Voštiny

Tabulka 4: Mechanické vlastnosti použitých voštin

	Hliníková voština – Al slitina 3003 (AlMnCu)	Aramidová voština – ECA – I
Velikost buňky [mm]	6,40	4,80
Hustota [kg/m ³]	82,00	48,00
Mez pevnosti v tlaku [MPa]	4,50	2,60
Mez pevnosti ve smyku – podélná [MPa]	2,40	0,98
Modul pružnosti ve smyku – podélný [MPa]	430,00	105,00
Mez pevnosti ve smyku – příčná [MPa]	1,40	0,56
Modul pružnosti ve smyku – příčný [MPa]	220,00	25,00

8 Mechanické zkoušky navržených materiálů

Vzhledem ke striktním pravidlům jsou mechanické zkoušky laminátů přesně dané, jak jejich průběh, tak i kolik má materiál vydržet. Struktura vzorků by měla mít stejný počet vrstev výztuže, jádro však může mít odlišnou tloušťku od finální skladby samotného akumulátorového boxu. Při vyhodnocení se konečné vlastnosti vzorků porovnávají s ocelí přesné tloušťky v SES.

Zkoušky proběhly na Ústavu mechaniky, biomechaniky a mechatroniky Fakulty strojní na ČVUT.

8.1 Tříbodový ohybový test

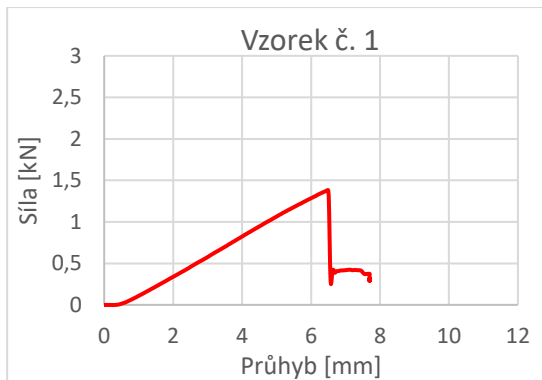
Vzorek reprezentující skladbu akumulátorového boxu musí být testován na tříbodový ohyb. Pravidly daná velikost vzorků je $500 \times 275 \text{ mm}^2$, avšak do letošní sezóny pořadatelé uznávali také vzorky o velikosti $500 \times 100 \text{ mm}^2$. V rámci úspory materiálu byly pro práci vyrobeny menší dosud pravidly akceptované vzorky. Podpěry byly ve vzdálenosti nejméně 400 mm, ve středu podpěr působí aplikátor tvaru válce o poloměru 50 mm.



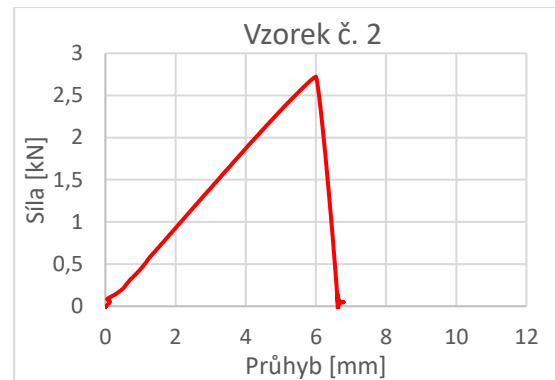
Obr. 8-1 Fotografie zařízení Heckert FPZ 100/1

Zkoušky byly provedeny na mechanickém rámovém lisu Heckert FPZ 100/1 s analogově digitálním řízením, maximální zatížení 100 kN viz Obr. 8 - 1. Pro experiment byl stroj nastaven na maximální zatížení 10 kN.

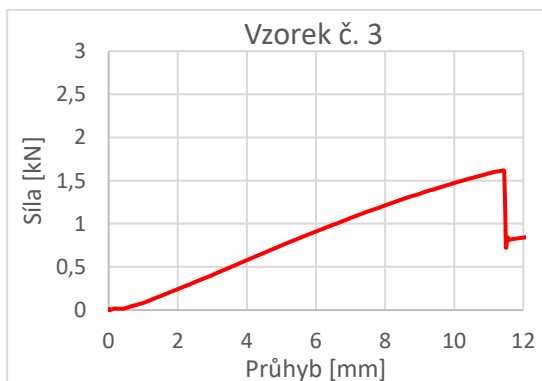
Z naměřených hodnot byl vytvořen pracovní diagram, který představuje průběh zkoušky, kde na ose y je vyznačena síla a na ose x je průhyb vzorků. Níže je vidět srovnání všech průběhů zkoušek (viz grafy 2-5 a Obr. 8-2 až 8-5)



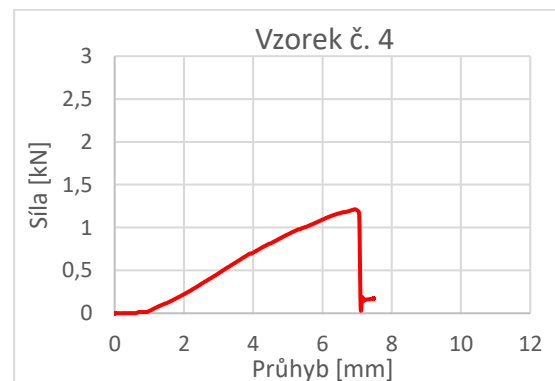
Graf 2 Test ohyb, vzorek č. 1



Graf 3 Test ohyb, vzorek č. 2



Graf 4 Test ohyb, vzorek č. 3



Graf 5 Test ohyb, vzorek č. 4



Obr. 8-2 Test ohyb, vzorek č.1



Obr. 8-3 Test ohyb, vzorek č.2



Obr. 8-4 Test ohyb, vzorek č.3



Obr. 8-5 Test ohyb, vzorek č.4

Z naměřených dat byl vypočten moment setrvačnosti, modul pružnosti a mez pevnosti v tahu. Tyto údaje se pak porovnávaly s vlastnostmi oceli předepsané v SES.

Rovnice pro výpočet momentu setrvačnosti:

$$I = \frac{h \cdot [(b + t_1 + t_2)^3 - b^3]}{12} [\text{mm}^4],$$

kde:

h ... šířka vzorku [mm]

b ... tloušťka jádra [mm]

t_1 ... vnitřní tloušťka potahu [mm]

t_2 ... vnější tloušťka potahu [mm].

Modul pružnosti byl určen ze vztahu:

$$E = \frac{(F_2 - F_1) \cdot l^3}{48 \cdot I \cdot (x_2 - x_1)} [\text{MPa}],$$

kde:

I ... moment setrvačnosti [mm⁴]

L ... vzdálenost podpor [mm]

F_1 ... minimum v průběhu síly v lineární části pracovního diagramu

F_2 ... maximum v průběhu síly v lineární části pracovního diagramu

x_1 ... minimální průhyb v lineární části pracovního diagramu

x_2 ... maximální průhyb v lineární části pracovního diagramu.

Mez pevnosti v ohybu:

$$\sigma_{max} = \frac{F_{max} \cdot L \cdot 0,5 \cdot (b + t_1 + t_2)}{4 \cdot I} [MPa],$$

kde:

F_{max} ... maximální síla do lomu vzorku [N].

Tabulka 5: Výsledky z tříbodové zkoušky + výpočty

Číslo vzorku	Trojbodový ohyb – maximální síla [N]	Max. průhyb [mm]	Moment setrvačnosti [mm ⁴]	Modul pružnosti [GPa]	Mez pevnosti v ohybu [MPa]
1	1 383	6,494	12816,67	23,67	91,72
2	2 723	7,176	12816,67	46,49	180,59
3	1 618	11,43	12816,67	15,18	107,31
4	1 213	6,926	12816,67	20,93	80,45

Z tabulky 5 vyplývá, že výrazně nejpevnějším kompozitem je vzorek č. 2 složený z uhlíkového prepregu a hliníkové voštiny. Ostatní vzorky dosahovaly přibližně polovičních hodnot meze pevnosti v ohybu oproti vzorku č. 2. Nečekaně menší hodnoty modulu pružnosti a meze pevnosti v ohybu u vzorku č.4 mohly být způsobeny delaminací potahu od jádra.

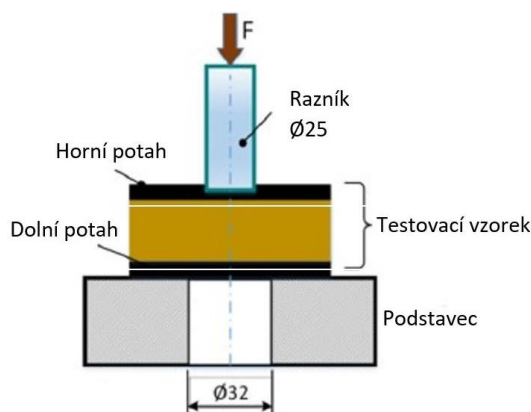
8.2 Zkouška stříhem

Při zkoušce stříhem se určovala pevnost potahu sendvičové struktury ve stříhu. Testovací vzorek o velikosti minimálně 100×100 mm² měl shodnou skladbu jako vzorky u tříbodového ohybu. Testovací aparatura byla rozdělena na dvě části: podstavec s otvorem o průměru 32 mm a razník o průměru 25 mm viz Obr. 8-7. Razník byl s podstavcem v jedné ose.

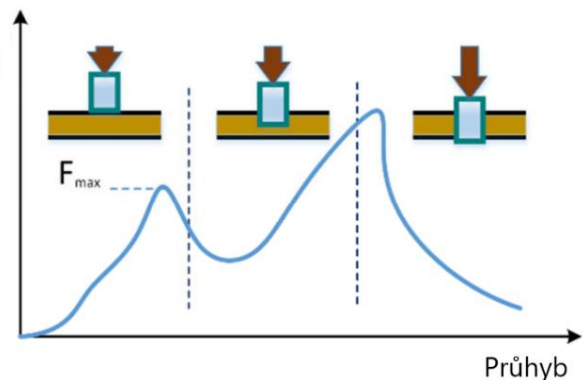
Vzorek byl položen na střed podstavce, následně byl razník vtlačen skrz vzorek, čímž došlo ke stříhu. Stříhové zkoušky byly provedeny na stroji TIRA 2300 viz Obr. 8-6.



Obr. 8-6 Testovací přístroj TIRA 2300

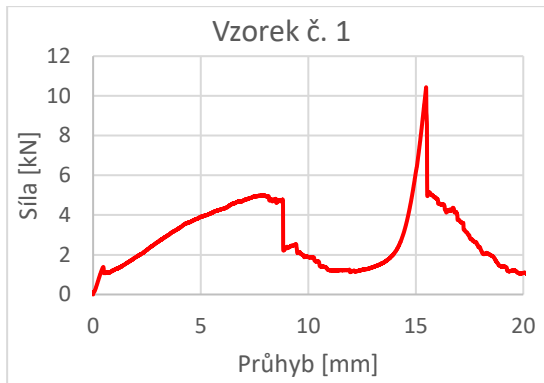


Obr. 8-8 Schéma stříhové zkoušky [18]

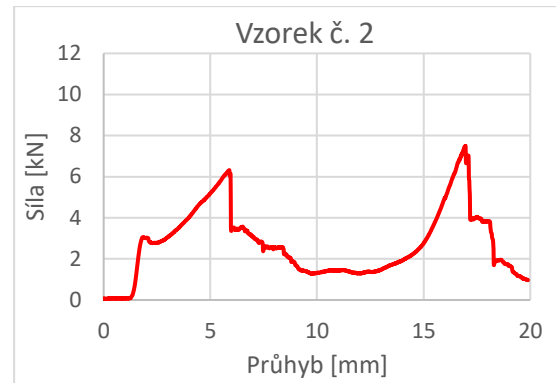


Obr. 8-7 Průběh pracovního diagramu zkoušky stříhem [18]

Teoretické schéma zkoušky stříhem je na Obr. 8-8, kde je zobrazen průběh zatěžované síly v závislosti na průhybu. Z naměřených hodnot byl vytvořen pracovní diagram (Viz grafy 6-9 a Obr. 8-9 až 8-12), kdy je na ose x průhyb a na ose y je síla.



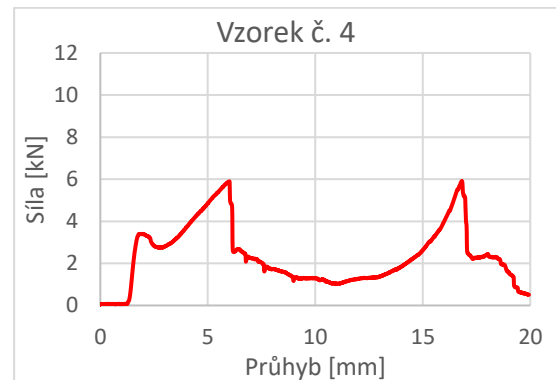
Graf 6 Test stříh, vzorek č. 1



Graf 7 Test stříh, vzorek č. 2



Graf 8 Test stříh, vzorek č. 3



Graf 9 Test stříh, vzorek č. 4



Obr. 8-9 Test stříh, vzorek 1



Obr. 8-10 Test stříh, vzorek 2



Obr. 8-11 Test stříh, vzorek 3



Obr. 8-12 Test stříh, vzorek 4

Z naměřených dat vypočítáme maximální smykové napětí:

$$\tau_{max} = \frac{F_{max}}{(\pi \cdot D \cdot t)} \text{ [MPa]},$$

kde:

F_{max} ... maximální síla v prvním vrcholu stříhu potahu (také značená F_{max}) [N]

D ... průměr razníku, daný pravidly 25 mm

t ... tloušťka potahu [mm].

Tabulka 6: Vypočtené hodnoty testovaných vzorků

Číslo vzorku	Max. síla při porušení prvního potahu [N]	Maximální smykové napětí [MPa]
1	5 007	63,75
2	6 316	80,42
3	4 798	61,09
4	5 898	75,10

Z tabulky 6 je patrné, že vzorek č. 2 měl největší maximální smykové napětí. Zbylé vzorky měly podstatně nižší hodnoty. Vzorky z uhlíkového vlákna měly v porovnání se skelným vyšší odolnost proti stříhu. Toto mohlo být způsobeno nekvalitním vypečením prepregu nebo nedostatečným počtem potahů.

8.3 Vyhodnocení vzorků

Dle zadaných hodnot referenčního materiálu v SES, je nutné potvrdit ekvivalenci kompozitních materiálů pro velikosti částí akumulátorového boxu (podlaha, vnější a vnitřní stěny). V tabulce 7 jsou uvedené hodnoty, které by měl nový materiál převyšovat, čímž by byla potvrzena ekvivalence a materiál by bylo možné použít pro výrobu akumulátorového boxu.

Rovnice pro výpočet ohybové tuhosti průřezu:

$$D = I \cdot E [N \cdot m^2],$$

I ... moment setrvačnosti [mm^4]

E ... modul pružnosti [MPa].

Rovnice pro výpočet maximálního dovoleného zatížení:

$$F_{dovolené} = \sigma_{max} \cdot S [N],$$

σ_{max} ... mez pevnosti v ohybu [MPa]

S ... plocha průřezů potahů [mm^2],

$$S = š \cdot (t_1 + t_2) [mm^2]$$

$$S = v \cdot (t_1 + t_2) [mm^2]$$

$š$... šířka podlahy boxu,

v ... výška stěn boxu.

Rovnice pro výpočet pevnosti ve stříhu:

$$P_s = (t_1 + t_2) \cdot \tau_{max} [N \cdot mm^{-1}]$$

Tabulka 7: Referenční hodnoty oceli z SES

Ocel	Podlaha	Vnější stěny	Vnitřní stěny
Šířka (výška) částí boxu [mm]	441	189	172
Ohybová tuhost průřezu [Nm^2]	14,4	2,3	2,11
Max. dovolené zatížení [kN]	201	62,1	57,2
Pevnost ve stříhu [$N \cdot mm^{-1}$]	273,75	197,1	197,1

Tabulka 8: Hodnoty, vztažené k celému boxu, které by měly převyšovat referenční hodnoty oceli

Vzorky	Vzorek č.1	Vzorek č.2	Vzorek č.3	Vzorek č.4
Ohybová tuhost průřezu [Nm ²]	1337,86	2627,69	858,00	1183,00
Max. dovolené zatížení [kN]	80,90	159,28	94,65	70,96
Pevnost ve stříhu [N·mm ⁻¹]	127,5	160,84	122,18	150,2

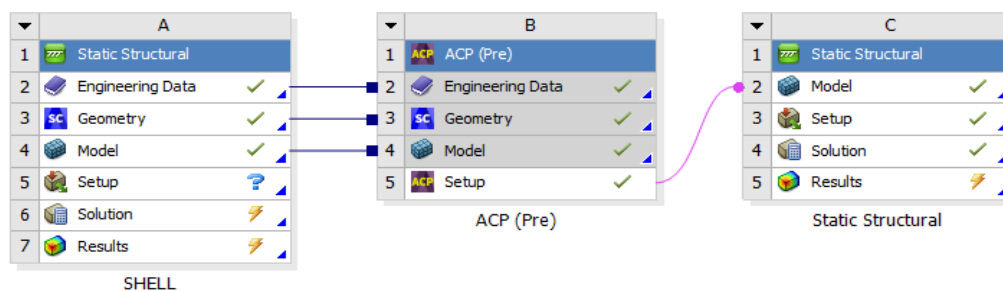
Z tabulek 7 a 8 lze vyvodit, že ohybová tuhost v průřezu je pro všechny vzorky dostatečná. Maximální povolené zatížení neodpovídá pouze pro ekvivalenci spojenou s hodnotami nutnými pro stavbu části podlahy akumulátorového boxu. Z výsledných dat vyplývá, že žádný vzorek neprošel pevností ve stříhu. Nejlépe však dopadl vzorek č. 2.

Je mnoho aspektů, které mohly ovlivnit konečné vlastnosti vzorků, jako například nedostatečně silná vazba mezi vláknem a jádrem, nedostatečné vypečení prepregu, laminace v nedostatečně čistém prostředí nebo možný defekt ve struktuře voštiny.

Pro další postup bych doporučil změnit skladbu na podlahovou část boxu, kde bych přidal více vrstev potahu. Dále by bylo možné použít foliové lepidlo mezi jádro a vlákna, aby došlo k dostatečně silnému spojení mezi jádrem a první vrstvou potahu. Z výsledků zkoušek je jasné, že použití hliníkové voštiny a uhlíkového prepregu je díky svým vlastnostem nejlepší kombinace. Elektrická nevodivost by byla zajištěna například přidáním vnitřních vrstev skelného vlákna.

9 Simulace

Simulační charakteristika materiálu byla nastavena podle dat z materiálových listů. Ověření výsledků proběhlo podle testovaných vzorků. Výpočet simulace byl realizován v programu Ansys Workbench verze 20R1, který propojuje další dílčí programy Ansys Workbench Meshing, Ansys Composite PrePost a Mechanical APDL Solver viz Obr. 9-1. [15]



Obr. 9-1 Nastavení simulace v prostředí Ansys Workbench 20R1

Nejdříve byla nastavena geometrie testovacího modelu a vytvořena spojení mezi jednotlivými součástmi. Z vložené geometrie se vytvořila síť pro výpočetní model. V druhém programu Ansys Composite PrePost se připojily vrstvy z definovaných materiálů, které byly vloženy k jednotlivým plochám. V Mechanical APDL Solver byly nastaveny okrajové podmínky a zatížení. Na závěr byly definovány výstupní data, jako je napětí v jednotlivých vrstvách, celková deformace, kritéria ztráty stability kompozitu. V posledním kroku došlo k vizualizaci a vyhodnocení simulací pro zkoumané veličiny.

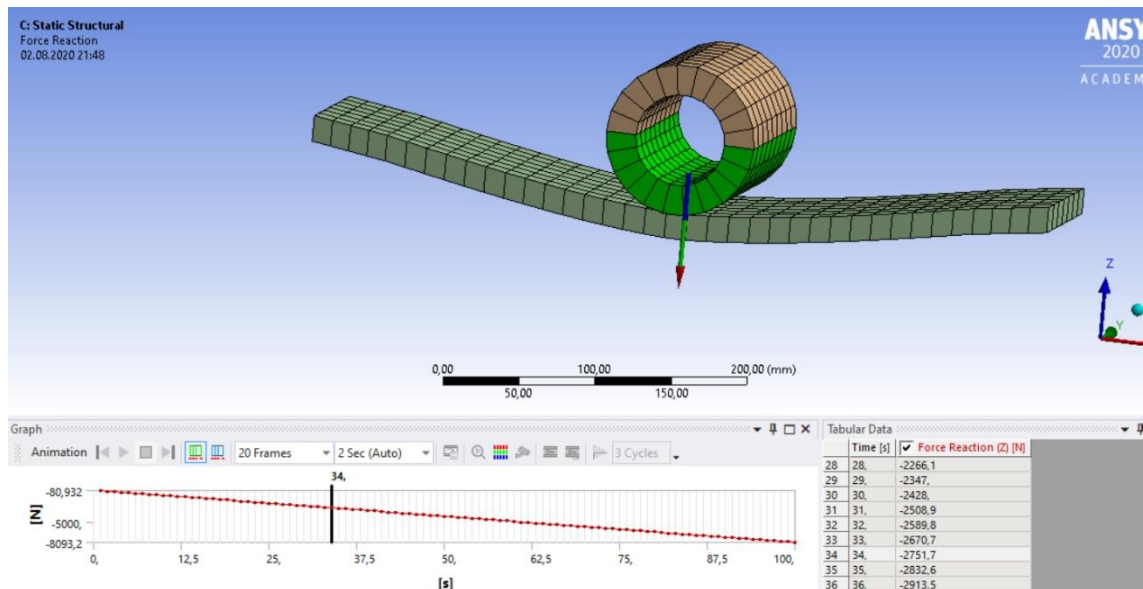
9.1 Simulace třibodového ohybu

Simulace byla provedena pro totožnou skladbu, jako měl vzorek č.2 (uhlíkový prepreg EHKF 420C-C20-45 a aramidová voština), ten byl vybrán na základě výsledků z mechanických zkoušek viz. Tabulka 5. Jako výstupní data byly nastaveny zatížení simulovaného vzorku (Obr.9-2) a průhyb (Obr.9-3). Ve výsledcích simulace byla vyhledána max. síla zjištěná z testovaného vzorku a následně byly porovnány průhyby viz Tabulka 9.

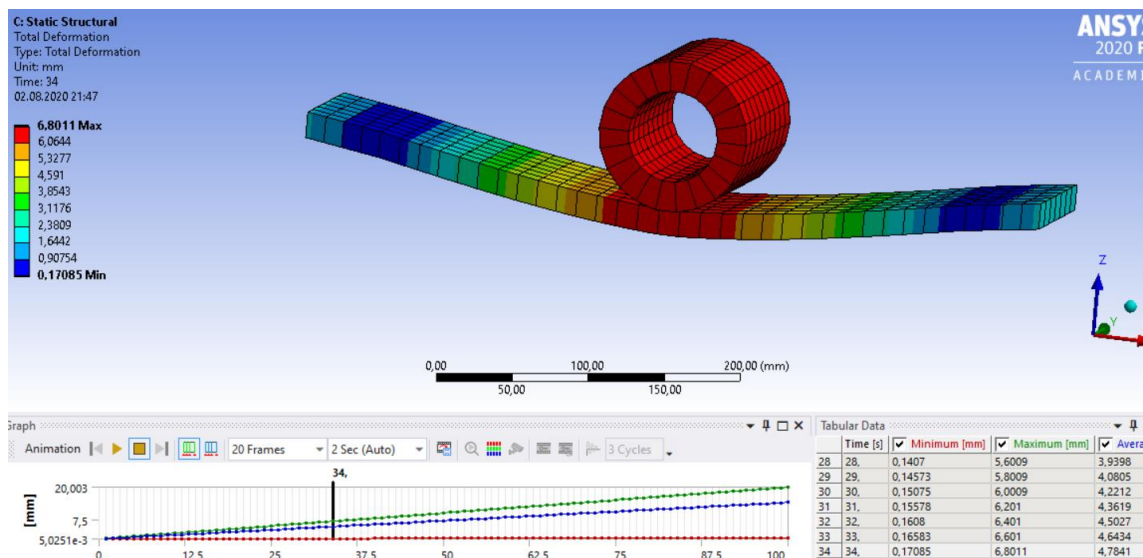
Byla pozorována odchylka simulovaného od testovaného vzorku u průhybu o 5,23 %. Což na pevnostní simulaci kompozitu byl vynikající výsledek, protože simulace počítá s ideálními podmínkami.

Tabulka 9: Porovnání dat ze simulace a testování

	Max. síla [N]	Průhyb při max. zatížení [mm]
Vzorek č. 2	2723	7,176
Simulovaný. Vzorek č.2	2751	6,801



Obr. 9-2 Simulace maximálního zatížení v tříbodovém ohybovém testu

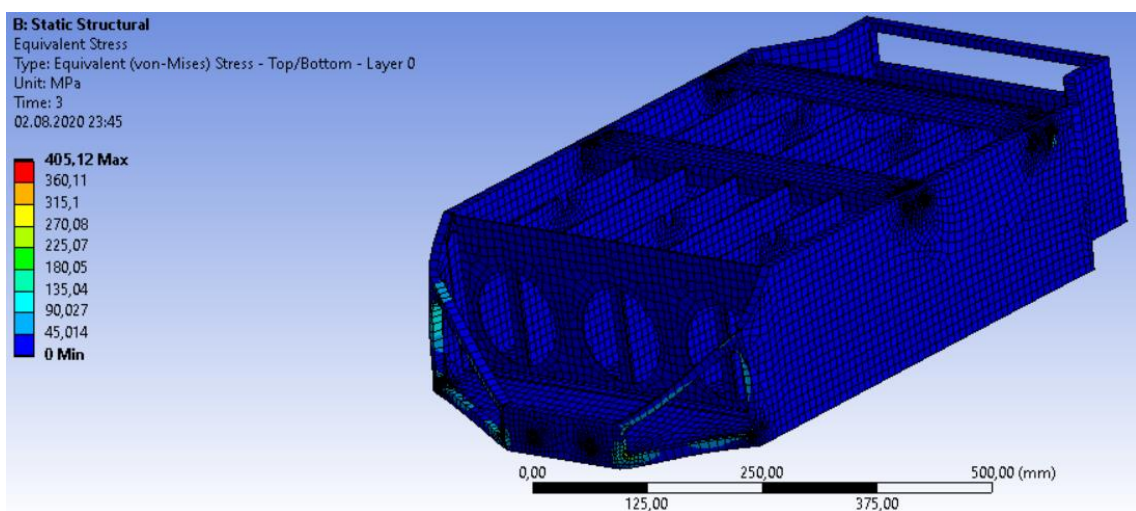


Obr. 9-3 Simulace velikosti průhybu v tříbodovém ohybovém testu

Takto nastavený materiál byl použit pro simulaci celého akumulátorového boxu.

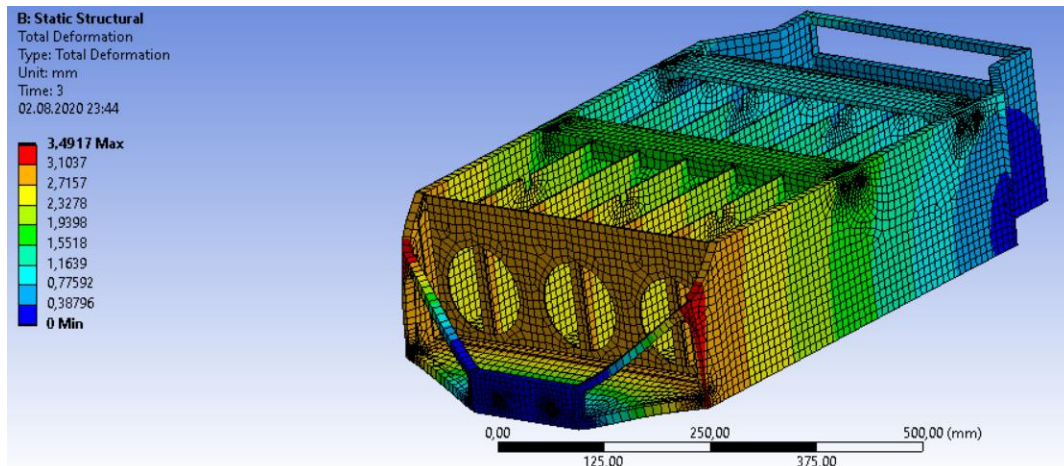
9.2 Simulace akumulátorového boxu FSE.09

Celý akumulátorový box by dle pravidla EV5.5.9 měl odolat zrychlení 20g ve svislém směru a 40g v podélném i příčném směru. Geometrie modelu do simulace vycházela z konstrukce z akumulátorového boxu FSE.09. Jednotlivé segmenty vyplněné bateriemi byly pro simulaci brány jako hmotné body, kterým byla přiřazena síla působící do stěn akumulátorového boxu. Jako výstupní data byly nastaveny maximální napětí ve vrstvách (Obr. 9-4), celková deformace boxu (Obr. 9-5) a faktor bezpečnosti delaminace vnitřních vrstev potahu (Obr. 9-6).

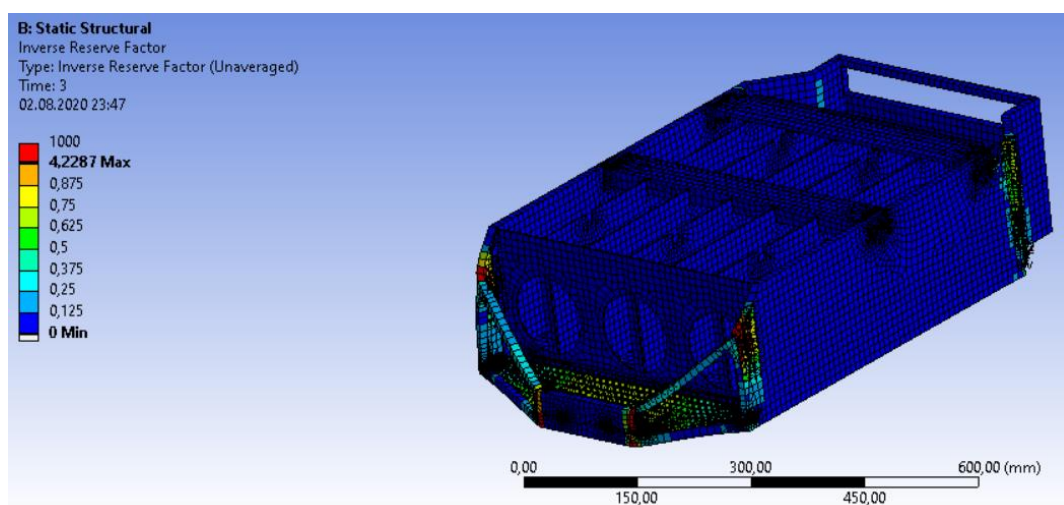


Obr. 9-4 Vizualizace maximálního napětí akumulátorového boxu

Z Obr. 9-4 lze vyvodit, že takto zatěžovaný box odolá kombinaci zatížení do všech směrů. V přední části je nejméně materiálu a není dodatečně vyztužen přepážkami, proto zde lze zaznamenat největší namáhání.



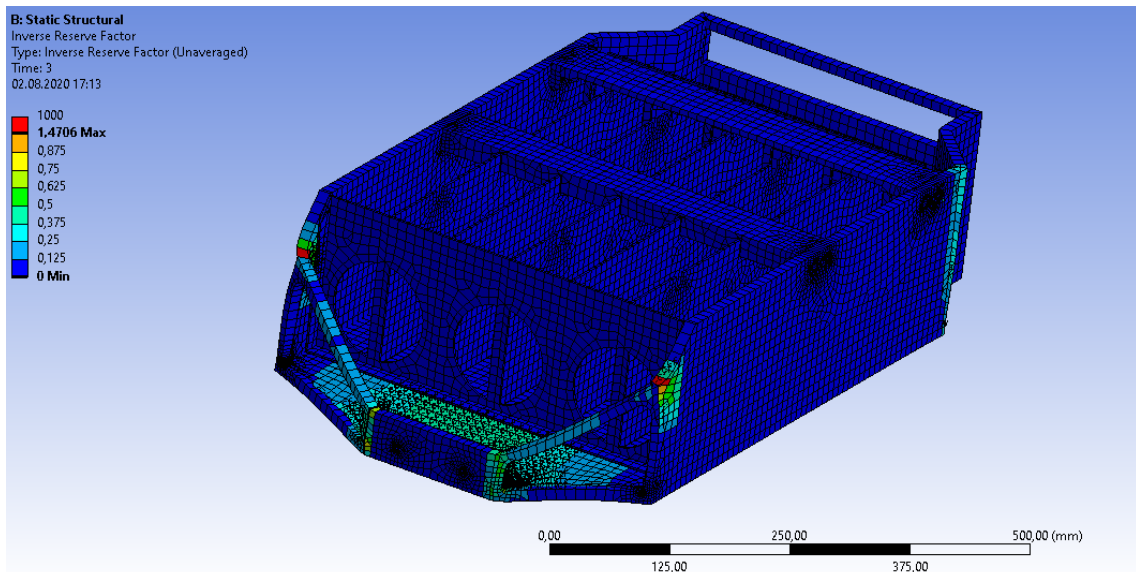
Obr. 9-5 Vizualizace celkové deformace boxu, při zatížení v kombinaci všech směrů



Obr. 9-6 Vizualizace bezpečnosti delaminace vnitřních vrstev potahu a jádra

Na Obr. 9-5 je pozorována celková deformace boxu v milimetrech. Maximální deformační průhyb je v přední části, tam kde jsou červeně zbarvené buňky sítě modelu, max. průhyb o 3,492 mm.

Obr. 9-6 zobrazuje místa, kde došlo k delaminaci vnitřních vrstev. V další simulaci byly přidány 2 vnitřní a 2 vnější vrstvy uhlíkového prepregu navíc. Z Obr. 9-7 je zřejmé zlepšení, ale stále dochází k delaminaci. Možným řešením by bylo změnit tvar konstrukce.



Obr. 9-7 Vizualizace bezpečnosti delaminace vnitřních vrstev potahu a jádra po vložení 4 vrstev prepregu

Simulace akumulátorového boxu poukázala na největší slabiny, které je nutné optimalizovat. Ale je zřejmé, že jsou místa, kde by materiál mohl být slabší, čímž by došlo k ušetření hmotnosti. Nutností je dodržet pravidly dané materiálové ekvivalence v SES. Pokud byly vloženy další vrstvy potahu v simulaci na delaminaci vnitřních vrstev potahu a jádra, ve výsledcích bylo zaznamenáno zlepšení.

10 Závěr

Hlavním cílem této bakalářské práce bylo navrhnout použitelné materiály pro akumulátorový box. Navrženy byly kompozity sendvičové struktury pro čtyři typy vzorků s odlišnou skladbou. Byly kombinovány dva různé prepregy a dvě odlišná jádra. Přesná skladba byla uvedena v Tabulce 2. Všechny vzorky byly otestovány na třibodový ohyb a na stříh. Výsledky jsou zaznamenány v Tabulce 5 a 6.

Na základě dat ze zkoušek byly vypočteny potřebné veličiny, které byly porovnány se základním materiálem daným pravidly v SES viz Tabulka 7 a 8. Výsledky ukázaly, že ani jeden vzorek nedosáhl ekvivalence. Příčinami mohly být nedostatečná síla vazeb mezi jádrem a vláknem, výrobní nedokonalost nebo nedostatečné vypečení prepregu. Nejlépe však vyšel vzorek č. 2, který obsahoval uhlíkový prepreg a hliníkovou voštinu.

Na základě výsledků ze zkoušek byl vybrán vzorek č. 2 pro pevnostní simulaci. Simulace byla nastavena v programu Ansys Workbench verze 20R1. Pevnostní simulací třibodového ohybu bylo ověřeno správné nastavení materiálu, které posloužilo pro simulaci celého akumulátorového boxu na celkové napětí, deformaci a delaminaci vnitřních vrstev potahu. Z výsledků bylo zjištěno, že jsou místa, kde je materiál dostačující, ale i místa, kde by byla struktura poškozena. Díky simulaci je možné měnit skladbu kompozitu a tím najít budoucí optimální řešení.

Z výsledků analýz byla navržena vylepšení pro další generaci konstrukce akumulátorového boxu. Materiály, které byly použity pro výrobu vzorků, by bylo možné použít v praxi, ale je nutné, aby se navýšil počet vrstev potahu nebo bylo přidáno foliové lepidlo pro zlepšení síly vazeb mezi vláknem a jádrem.

Literatura

- [1] *EFORCE FEE PRAGUE FORMULA* [online]. Praha: eForce FEE Prague Formula, 2017 [cit. 2020-04-27]. Dostupné z: <https://eforce.cvut.cz/formula-student/>
- [2] *FORMULA STUDENT GERMANY: Disciplines* [online]. Německo [cit. 2020-07-06]. Dostupné z: <https://www.formulastudent.de/about/disciplines/>
- [3] *Pravidla Formula Student Germany* [online]. Německo: FSG, 2019 [cit. 2020-04-27]. Dostupné z: <https://www.formulastudent.de/fsg/rules/>
- [4] *EFORCE FEE PRAGUE FORMULA: Mechanická konstrukce akumulátoru FSE.04x* [online]. Praha, 2015 [cit. 2020-06-20]. Dostupné z: <https://eforce.cvut.cz/mechanicka-konstrukce-akumulatoru-fse-04x/>
- [5] MEISSNER, Bohumil a Václav ZILVAR. *Fyzika Polymerů: Struktura vlastností polymerních materiálů*. 1. vydání. Praha: SNTL, 1987. ISBN 04-634-87.
- [6] EHRENSTEIN, Gottfried W. *Polymerní kompozitní materiály*. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009. ISBN 978-808-6960-296.
- [7] JANOVEC, Jiří, Jiří CEJP a Josef STEIDL. *Perspektivní materiály*. Vyd. 3., přeprac. V Praze: České vysoké učení technické, 2008. ISBN 978-80-01-04167-3.
- [8] *Kompozity: Kompozity - Doc. Ing. Zdeněk Kořínek, CSc.* [online]. Praha: webnode, 2016 [cit. 2020-06-12]. Dostupné z: <https://kompozity.webnode.cz/>
- [9] ZÁRUBA, Petr. *Návrh a analýza deformačního prvku sendvičové konstrukce pro vůz Formula Student*. Praha, 2016. Diplomová práce. ČVUT v Praze. Vedoucí práce Ing. Michal Vašíček, Ph.D.
- [10] CALLISTER, William D. a David G. RETHWISCH. *Materials science and engineering: an introduction*. 8th ed. Hoboken: Wiley, 2010. ISBN ISBN978-0-470-41997-7.

- [11] *PHOENIX CONTACT: Zkouška materiálu* [online]. Brno [cit. 2020-06-25].
Dostupné z:
https://www.phoenixcontact.com/online/portal/cz?1dmy&urile=wcm:path:/czcs/web/main/solutions/subcategory__pages/Railway__norms__and__standards/b150f45d-0e71-485b-b07d-967df195eeb5/b150f45d-0e71-485b-b07d-967df195eeb5
- [12] *Ensinger: Plasty pro aplikaci do interiérů letadel* [online]. Česká Republika [cit. 2020-06-15]. Dostupné z: <https://www.ensingerplastics.com/cs-cz/polotovary/plasty-pro-letecky-prumysl/plasty-pro-vnitri-casti-letadel>
- [13] ČIŽMÁROVÁ, Elena a Jana SOBOTOVÁ. *Nauka o materiálu I. a II.: cvičení*. V Praze: České vysoké učení technické, 2014. ISBN 978-80-01-05550-2.
- [14] CIESLAR, Bogdan. *ZKUŠEBNÍ METODY KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ*. Brno, 2008. Bakalářská práce. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ.
- [15] *Ansys* [online]. USA: ANSYS, Inc. [cit. 2020-06-22]. Dostupné z: <https://www.ansys.com/>
- [16] *PROTOCASE: Illini Electric - Formula SAE Competition* [online]. [cit. 2020-06-12]. Dostupné z: <https://www.protocase.com/community/sponsorship/illini-electric.php>
- [17] *Metropolia* [online]. Finsko [cit. 2020-06-12]. Dostupné z: <http://metropolia-motorsport.fi/>
- [18] VASSØY OLSEN, Erik a Hirpa G. LEMU. Mechanical Testing of Composite Materials for Monocoque Design in Formula Student Car. *World Academy of Science, Engineering and Technology* [online]. 2016, 10(1), 8 [cit. 2020-06-27]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/286926168__Mechanical__Testing__of__Composite__Materials__for__Monocoque__Design__in__Formula__Student__Car