

České vysoké učení technické v Praze

Fakulta strojní

Ústav mechaniky, biomechaniky a mechatroniky



Návrh absorbérů energie pro elektrickou formuli eForce FEE Prague Formula

Bakalářská práce

Autor:

Adam Čumrda

Vedoucí práce:

Ing. Viktor Kulíšek

Studijní obor:

Teoretický základ strojního inženýrství

Praha 2019

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Čumrda** Jméno: **Adam** Osobní číslo: **457655**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav mechaniky, biomechaniky a mechatroniky**
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**
Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Návrh absorberu energie pro elektrickou formuli eForce FEE Prague Formula

Název bakalářské práce anglicky:

Crash energy absorber development for eForce FEE Prague Formula

Pokyny pro vypracování:

- Proveďte rešerši konstrukce deformačních členů z lehkých materiálů (vláknové kompozity, voštiny, pěny, atd) určené pro sportovní vozidla
- Navrhněte několik variant deformačních prvků pro E-formuli.
- Sestavte výpočtový návrhový model založený na analytickém nebo numerickém řešení pro predikci deformačního chování navržených absorberů.
- Na základě experimentálních zkoušek a výpočtového porovnání proveďte výběr vhodné varianty deformačního členu a posuďte vhodnost použitého výpočtového modelu..

Seznam doporučené literatury:

BARBERO, Ever J. Introduction to composite materials design. 2nd ed. Boca Raton: Taylor & Francis, 2011. ISBN 978-1-420A-7915-9.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Viktor Kulišek, ústav mechaniky, biomechaniky a mechatroniky FS

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

Datum zadání bakalářské práce: **25.04.2019**

Termín odevzdání bakalářské práce: **16.08.2019**

Platnost zadání bakalářské práce: _____


Ing. Viktor Kulišek
podpis vedoucí(ho) práce

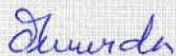

prof. Ing. Milan Růžička, CSc.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry


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.

30.4.2019
Datum převzetí zadání


Podpis studenta

Prohlášení o autorství

Prohlašuji, že jsem svoji bakalářskou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady uvedené v seznamu citovaných zdrojů.

V Praze dne 13.08.2019

Podpis

Poděkování

Rád bych úvodem poděkoval mému vedoucímu práce panu Ing. Viktoru Kulíškovi za rady při tvorbě bakalářské práce a pomoc s realizací výroby uhlíkového navíjeného absorbéru ve společnosti Compotech Plus spol. s r.o.

Dále bych rád poděkoval panu Ing. Tomáši Čenskému za realizaci pádových zkoušek a také členům týmu eForce FEE Prague Formula za pomoc při přípravách testování.

Anotační záznam

Jméno autora:	Adam
Příjmení autora:	Čumrda
Název práce česky:	Návrh absorbéru energie pro elektrickou formuli eForce FEE Prague Formula
Název práce anglicky:	Crash energy absorber development for eForce FEE Prague Formula
Rozsah práce:	Stránky: 58 Obrázky: 55 Tabulky: 13
Akademický rok:	2018/2019
Jazyk práce:	CZ
Ústav:	12 105 Ústav mechaniky, biomechaniky a mechatroniky
Studijní program:	Bakalářský – Teoretický základ strojího inženýrství
Vedoucí bakalářské práce:	Ing. Viktor Kulíšek
Anotace:	Práce se zabývá problematikou návrhu a výběru vhodného absorbéru energie pro vůz soutěže Formula Student
Klíčová slova:	Deformační prvek, absorbér energie, pádová zkouška, Formula Student
Využití:	Tuto práci je možné využít pro návrh a výběr vhodného typu absorbéru pro vozy soutěže Formula Student

Anotace

Tato práce popisuje problematiku návrhu deformačního prvku pro studentskou elektrickou formuli týmu eForce FEE Prague Formula. Hlavním cílem práce je volba nejlepšího řešení, které vyhoví požadavkům soutěže Formula Student.

Práce se zabývá absorberem energie z několika typů materiálu. Absorbéry energie jsou řešeny od fáze návrhu až po provedené pádové zkoušky. Výsledky úspěšných pádových zkoušek jsou vzájemně porovnány a je z nich vybráno optimální řešení na základě výsledků testování i dalších zvolených parametrů.

Výsledkem práce je výběr jednoho deformačního prvku, který bude použit pro další plánovanou generaci elektrické formule eForce FEE Prague Formula pro rok 2020.

Annotation

This thesis describes the issue of an impact attenuator design for the student electric formula of the eForce team. The main objective of this thesis is choosing the best solution that would comply with the Formula Student competition requirements.

The thesis discusses energy absorbants made of a variety of materials. It follows up with the energy absorbents from the early design stage until the execution of the drop tests. The results of the successful drop tests are compared to each other and the optimal solution is chosen based on the test results, as well as some other parameters.

In the conclusion of this thesis, one impact attenuator will be chosen to be used for the next generation of the electric formula eForce FEE Prague Formula for the year 2020.

Obsah

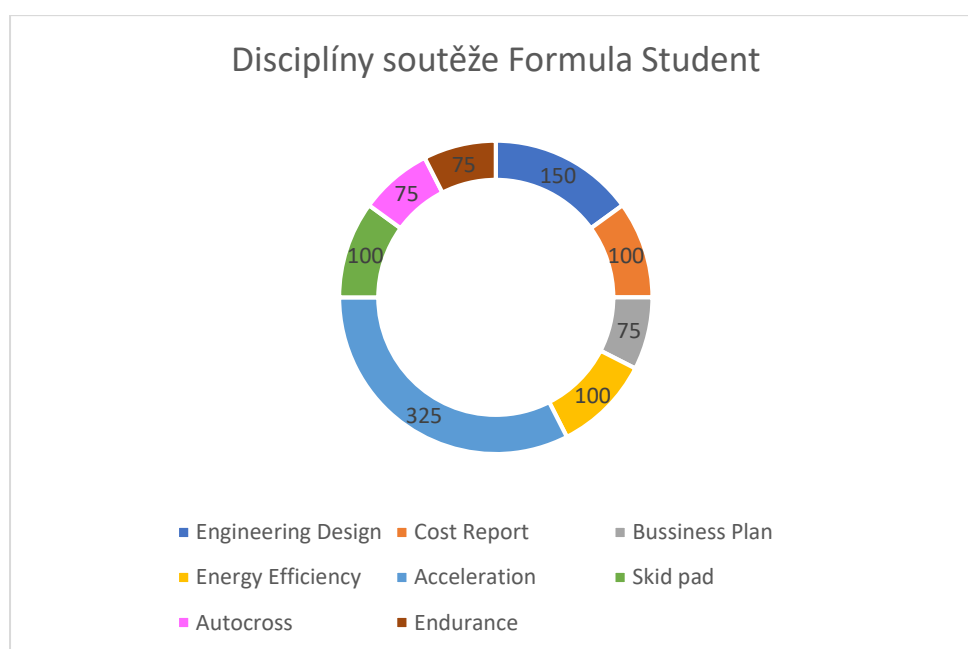
1 Úvod.....	1
1.1 eForce FEE Prague Formula	2
2 Deformační prvky využívané v soutěži Formula Student.....	3
2.1 Požadavky na deformační člen soutěže Formula Student.....	3
2.2 Standardní deformační prvek	5
2.3 Deformační prvek z polymerních pěnových materiálů	7
2.4 Absorbéry energie z hliníkových voštin.....	8
2.5 Kompozitní absorbéry energie	10
2.6 Plechové absorbéry energie.....	11
2.7 Posouzení vhodnosti jednotlivých typů deformačního prvku	11
3 Návrh zkušebních vzorků.....	12
3.1 Pěnový absorbér energie	12
3.2 Pěnový absorbér energie vyztužený uhlíkovou trubicí	14
3.3 Kombinace uhlíkových trubek a vedení z pěny a vláknového kompozitu.....	15
3.4 Absorbér z hliníkové voštiny	17
3.5 Kompozitní uhlíkový kužel.....	18
3.6 Zhodnocení výpočtových modelů	25
3.7 Výběr nejvhodnější varianty	25
4 Experimentální vyhodnocení navržených variant	27
4.1 Testovací aparatura, testování	27
4.2 Způsob vyhodnocení	29
4.2.1 Rychlost.....	29
4.2.2 Deformace	29
4.2.3 Energie	30
4.2.4 Průměrné zpomalení.....	30
4.2.5 Vrcholové hodnoty zpomalení	30

4.2.6 Výpočet uchycení předního přitlačného křídla	31
5 Výsledky pádové zkoušky.....	33
5.1 Pěnový deformační člen	33
5.2 Pěnový deformační člen s uhlíkovou trubkou.....	35
5.3 Absorbér z kompozitních trubek s vedením z pěny	37
5.4 Absorbér z hliníkové voštiny	40
5.5 Uhlíkový absorbér	42
5.6 Zhodnocení testování	45
6 Závěr.....	47
Zdroje	48

1 Úvod

Tématem této bakalářské práce je návrh deformačního členu pro monopost studentského projektu eForce FEE Prague Formula. Jedná se o deformační člen pro jednomístné sportovní vozidlo s elektrickým pohonem schopný při čelním nárazu utlumit kinetickou energii vozu. Takovýto bezpečnostní prvek výrazně zvyšuje ochranu pilota v případě havárie a zároveň pomáhá snížit materiální škody na vozidle. Definice absorbéru je následující: „Absorbér nárazu (IA) je deformovatelné, energii pohlcující těleso umístěné před předním bulkheadem¹“[2].

Studentská soutěž Formula Student je zaměřena na konstrukci závodních vozů kategorie „formule“. Cílem studentských univerzitních týmů je navrhnout a vyrobit vozidlo, se kterým se utkají na mezinárodních závodech v 8 hodnocených disciplínách. Hodnoceny jsou nejen časy formulí na trati, ale nemalou část z celkového hodnocení tvoří takzvané statické disciplíny, při kterých se prezentuje vývoj, ekonomické dovednosti a formule se taktéž prezentuje před fiktivními investory, za účelem prodeje vozidla jako produktu. Na závodech se také reviduje podrobná technická dokumentace vozidla, která má za cíl zaručit bezpečí pilotů při dynamických disciplínách.



Obrázek č. 1: Disciplíny soutěže Formula Student s bodovým hodnocením[2]

¹ Čelní plocha monokoku (případně rámu) - plocha, kde musí být uchycena protistřepinová přepážka s absorbérem

V soutěži jsou týmy složené výhradně ze studentů vysokých škol. Každý ze studentů navrhuje, verifikuje, vyrábí a kompletuje určitou část vozidla. Pilotovat formuli mohou jen studenti bez profesionální závodní licence. Svoji celoroční práci potom tým prezentuje na mezinárodních závodech před porotou z technické praxe. Cílem soutěže je vychovávat schopné inženýry pro automobilový průmysl.

Tématem této práce je návrh a implementace absorberu energie na plánovaný monopost pro sezónu 2020 s označením FSE 09. Soutěž je svázaná 200stránkovými pravidly, které každý rok reviduje německá organizace Formula Student Germany. Každý další závod v jiné zemi využívá tyto pravidla jako základ svých pravidel, ke kterým vydává vlastní dodatky. V této práci se bude řídit pouze pravidly soutěže Formula Student Germany.

1.1 eForce FEE Prague Formula

Tým eForce FEE Prague Formula působící na Fakultě elektrotechnické ČVUT vznikl v roce 2010. Každoročně v týmu vzniká nový monopost elektrické formule s bateriovým pohonem. V roce 2015 se týmu poprvé podařilo využít celouhlíkový monokok ve spojení s využitím pohonu všech čtyř kol. V roce 2018 a 2019 byly týmem postaveny monoposty s váhou kolem 200 kg a maximálním výkonem 87,8 kW. Tato konfigurace vozů znamenala zrychlení z 0 na 100 km/h za 2,6 sekundy a vítězství na mezinárodních závodech FS Czech v roce 2018 [1].



Obrázek č. 2: Monopost týmu eForce FEE Prague Formula – FSE 07 z roku 2018 [1]

2 Deformační prvky využívané v soutěži Formula Student

V současné době je v soutěži využíváno několik variant deformačních členů. Soutěž povoluje použití komerčně prodávaného řešení, ale většina týmů si z důvodu nižší hmotnosti navrhuje deformační prvek sama. Technická řešení používaná týmy v soutěži dynamicky reagují na systémy pohlcování energie u sportovních vozů a občas průmyslová řešení i předbíhají s novými nápady nebo vylepšeními. V současné době se využívá v soutěži několika typů deformačních členů. Těmi jsou:

- standardní deformační prvek,
- absorbéry z polymerních pěnových materiálů,
- absorbéry energie z hliníkových voštin,
- kompozitní absorbéry energie,
- plechové absorbéry.

2.1 Požadavky na deformační člen soutěže Formula Student

V pravidlech soutěže se oblasti tzv. Impact Attenuator věnuje oblast přibližně 3 stránek A4 [2].

Níže je uveden volný překlad důležitých bodů z pravidel, podle kterých se musí řídit návrh. Také jsou zde uvedeny požadavky pro dynamické testování i možné použití filtru naměřených dat.

”

T 3.17 Impact Attenuator (IA)

T 3.17.1 Každé vozidlo musí být vybavené absorbérem energie.

T 3.17.2 Absorbér energie musí splňovat následující:

- Musí být namontován na přední přepážce šasi (bulkhead).
- Minimální rozměry jsou 100 mm výška, 200 mm šířka a 200 mm délka od bulkheadu.
- Při nárazu nesmí prorazit bulkhead v případě čelního nárazu.
- Bezpečně připevněn přímo k proti střepinové přepážce (anti intrusion plate – AIP).
- Nesmí být součástí nosných částí karoserie.

- Navrhnut s uzavřenou pření částí.
- Nesmí být širší nebo vyšší než AIP.

T 3.17.3 Na všech vozidlech musí být 1,5mm ocelová nebo 4 mm hliníková přepážka spojená s absorbérem.

- Pokud je absorbér k bulkheadu připojen šrouby, musí mít stejný rozměr jako jsou vnější rozměry bulkheadu .
- Protistřepinová přepážka nesmí přesahovat vnější hrany bulkheadu.

T 3.17.4 Alternativní protistřepinové přepážky jsou povoleny, pokud je prokázána ekvivalence se standardní přepážkou dle pravidla T3.17.3. Ekvivalenci je možné prokázat fyzickým testem deformačního členu nebo kombinací zkoušek trojbodého ohybu a stříhové zkoušky materiálu.

Tyto zkoušky musí prokázat, že:

- protistřepinová přepážka vydrží ohybovou zkoušku při statické zátěži 120 kN rovnoměrně rozložené na 150 mm délky,
- stříhový test prokáže, že každý bod uchycení vydrží zatížení 20kN v jakémkoli směru.

T 3.17.5 Pokud sestava absorbéru a protistřepinové přepážky není přivařená k šasi, musí být sestava uchycena minimálně 8 šrouby M8 pevnostní třídy 8.8

T 3.19 Požadavky pro testování deformačního členu

T 3.19.1 Sestava deformačního členu, když je namontována na vozidlo s hmotností 300 kg, narazí do absolutně tuhé překážky rychlostí 7 m/s.

Při této konfiguraci zkoušky musí být splněno:

- Zpomalení nepřesáhne průměrně 20 g a v nesmí být v peaku vyšší než 40 g.
- Pohlcená energie při nárazu musí být 7350 J nebo vyšší.

T 3.19.2 Při testování absorbéru musí být splněno:

- Absorbér musí být spojen s protistřepinovou přepážkou stejnou metodou jako na vozidle.
- Za protistřepinovou přepážkou musí být prostor minimálně 50 mm.
- Žádná část AIP se nesmí zdeformovat víc než o 25 mm za pozici protistřepinové přepážky před testem.

T 3.19.4 Vozidla se aerodynamickými prvky nebo senzor pro vnímání okolního prostředí nesmí při nárazu přesáhnou zpomalení ve špičce přesahující hodnoty dosažené při pádové zkoušce deformačního prvku.

T 3.19.5 Dynamické testování (vozik, kyvadlo nebo padostroj) deformačního členu může být provedeno v místě k tomu určenému. Toto testovací centrum může být součástí univerzity, ale samotný test musí být dozorován profesionálním personálem.

T 3.19.6 Pokud je při dynamickém testu měřeno zpomalení, průměrné zpomalení musí být vypočteno z nefiltrovaných dat. Pokud špička zrychlení přesáhne 40 g, může být použit filtr, který odstraní data v hodnotách – 3dB při 100Hz.

”

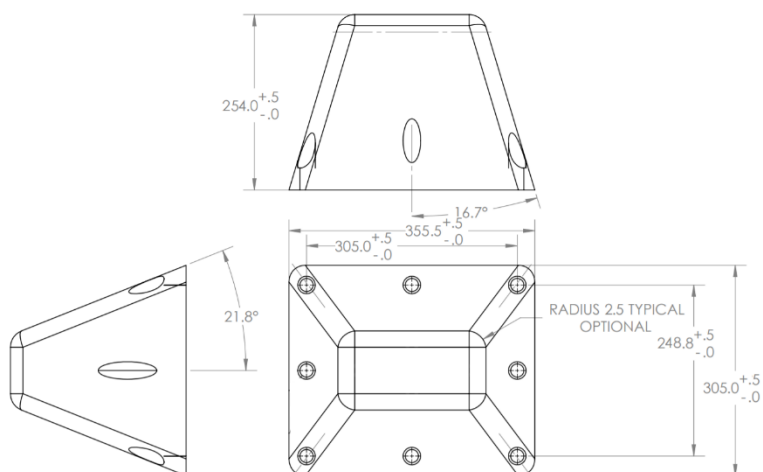
2.2 Standardní deformační prvek

Jedná se řešení od firmy BSCI ENERGY IMPACT SYSTEMS, které splňuje pravidla a specifikace soutěže Formula Student. Absorbér je vyroben z materiálu Impaxx 770® foam s hustotou 45 kg/m³. Hmotnost tohoto deformačního členu se pohybuje okolo 0,7 kg. Toto řešení je poměrně náročné na zástavbový prostor na čelní straně formule. Z těchto důvodů většina zkušenějších týmů toto řešení nevyužívá [3].



Obrázek č. 3: Standardní deformační element z materiálu Impaxx 770® foam

Na druhou stranu i přes velký rozměr a vysokou hmotnost není použití tohoto typu špatnou volbou. Absorbér je vhodně dimenzován na zadané parametry a byl detailně testován společností, která má značné zkušenosti s pohlcováním energie, tlumením nárazů a obecně bezpečností pilota závodních vozů.

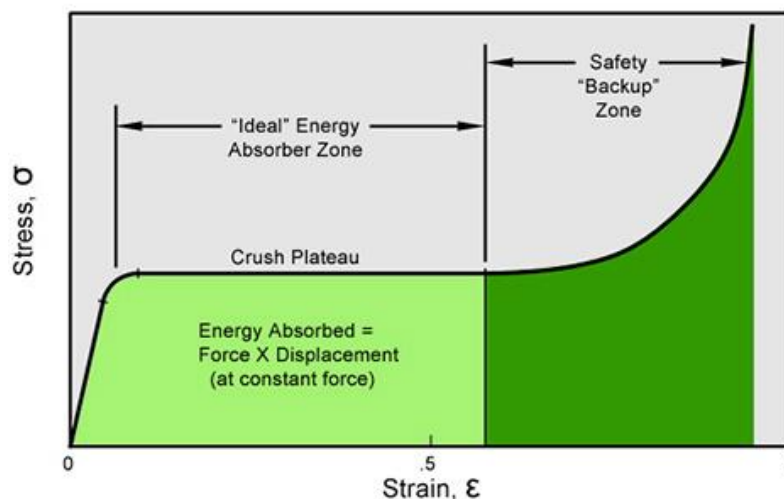


Obrázek č. 4: Standardní deformační element z materiálu Impaxx 770® foam [3]

2.3 Deformační prvek z polymerních pěnových materiálů

Pro snížení hmotnosti, lze zvolit pro výrobu absorbéru energie i jiné typy pěn a vlastní geometrii. Nejčastěji se používají materiály s hustotou od 60 kg/m^3 . Obvykle využívanými materiály pro tvorbu deformačních členů jsou materiály prodávané jako pěnová jádra do vláknových kompozitů. Jedná se o pěny typu Dyvnicell, Rohacell nebo Airex. Výrobou vlastního pěnového absorbéru se týmy mohou dostat k hmotnosti absorbéru kolem $0,4 \text{ kg}$ v závislosti na jejich návrhu. Je nutné dodržet minimální rozměry dané pravidly a zároveň je vhodné pro zvýšení stability při nárazu a deformaci zvětšit podstavu tělesa, která přiléhá k AIP. Pěnové absorbéry energie mají poměrně nízké hodnoty průběhů průměrných hodnot zpomalení.

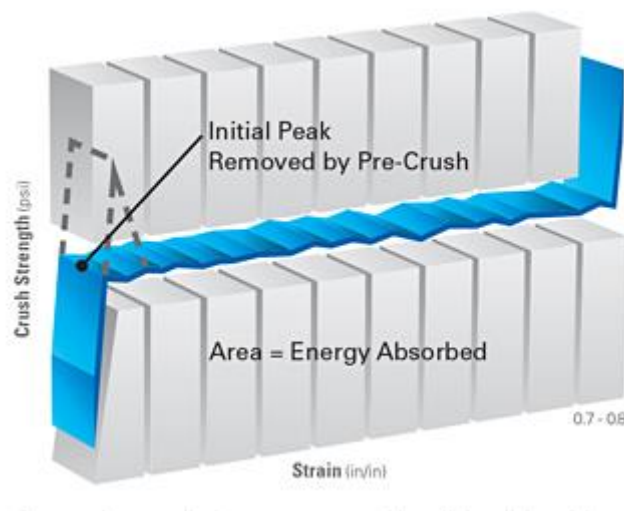
Chování pěny při pohlcování energie je zobrazeno na obrázku č. 5. V pěnovém materiálu nejdříve dochází k lineárně narůstající elastické deformaci, kdy lze chování pěny přirovnat k chování pružiny. V momentu, kdy je elasticita pěny vyčerpána, začnou kolabovat jednotlivé buňky pěny vlivem vzrůstajícího tlaku. V této fázi dochází k největšímu pohlcení energie, které probíhá při relativně konstantních působících silách. K ideálnímu průběhu pohlcování energie u pěnových materiálů dochází v závislosti na typu materiálu od 50 do 70 % deformace. V poslední fázi nárazu může dojít ke stlačování samotného materiálu. Z hlediska bezpečnosti se výrobci nedoporučuje se do této poslední fáze dostat. Při narůstajícím tlaku ve stlačené pění může dojít ke ztrátě soudržnosti materiálu.



Obrázek č. 5: Křivka charakteristického chování pěnových materiálů při kompresi [4]

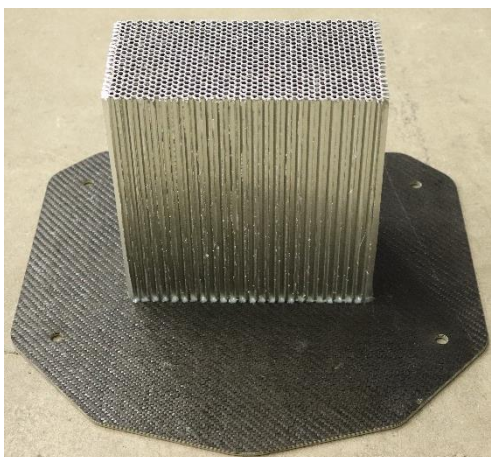
2.4 Absorbéry energie z hliníkových voštin

Dalším velmi vhodným a často používaným materiálem pro deformační prvky je voština z tenkých hliníkových plechů. V současné době se využívají převážně materiály s hexagonální strukturou. Absorbéry lze konstruovat z voštinových desek paralelně umístěných ve směru nárazu nebo ze speciálně vyrobených voštin s buňkami v celé délce absorbéru. Volbou deformačního členu z hliníkové voštiny se lze s hmotností dostat až k 0,3 kg. Výrobci hliníkových voštin navíc v dnešní době nabízejí voštinu již předdeformovanou. Materiál má na specifikovaném místě iniciovanou deformaci. Díky tomu je prvotní špička nárazu minimalizována a průběh pohlcování energie se odehrává při konstantní síle. Deformace se v materiálu navíc začne šířit primárně od tohoto místa. Tato úprava materiálu vede ke stabilnějšímu chování voštiny i nižším maximálním hodnotám zpomalení. Navíc se zamezí hrozbě podlomení voštiny při nárazu, protože deformace se začne šířit od předdeformované zóny absorbéru nikoli například v polovině délky buněk [5].



Obrázek č. 6: Ilustrační obrázek pohlcení prvotní špičky síly pomocí předdeformované oblasti [5]

Hustoty voštinových materiálů se pohybují od 10 kg/m^3 do přibližně 120 kg/m^3 . Pro parametry testu nejlépe vychází materiál s hustotou $91,3 \text{ kg/m}^3$, který používá většina z týmů používající hliníkové voštiny.



Obrázek č. 7: Absorbér z hliníkové voštiny eForce



Obrázek č. 8: Absorbér z voštinových segmentů [6]

Ke konstrukci voštinových absorbérů energie lze přistoupit několika různými návrhy. První možností je objednat od výrobce voštinu v požadovaných rozměrech a parametrech jako jeden kus. Další variantou je nákup voštinových desek a vytvoření kaskádové skladby, ve které lze kombinovat různé hustoty voštin v různých vrstvách nebo použít několik stejných desek řazených paralelně. V kaskádové skladbě absorbéru je nutné jednotlivé vrstvy voštin oddělit tuhou přepážkou a zamezit tak pronikání jednotlivých desek do sebe.

2.5 Kompozitní absorbéry energie

Při použití kompozitních absorbérů energie se nejčastěji volí mezi použitím sestavy z uhlíkových trubek, uhlíkových skořepin, sendvičových profilů nebo celokompozitních špiček. Obecně vzato mají všechny tyto varianty problém se stabilitou při nárazu. Velmi často při testování dojde k vyosení absorbérů z osy nárazu a jeho následnému podlomení na stranu. To se návrháři snaží minimalizovat pomocí použití jader ve skladbě. Přidáním jádra do kompozitní skladby se zvýší ohybová tuhost absorbérů a zvýší se i odolnost ve vzpěru, nicméně naroste i hmotnost samotného absorbérů. Nejlepší vlastnosti v kompozitech s epoxidovou matricí dosahují vysokomodulová uhlíková vlákna [7]. V porovnání s aramidovými nebo skelnými vlákny vykazují uhlíková vlákna pro impaktové zkoušky nejlepší vlastnosti. Absorbéry z vláknových kompozitů pohlcují energii několika různými mechanismy. Převážně se jedná o porušení a praskání vlákna nebo stříh matrice a delaminaci [8].



Obrázek č. 9: Uhlíkový absorbér, eForce

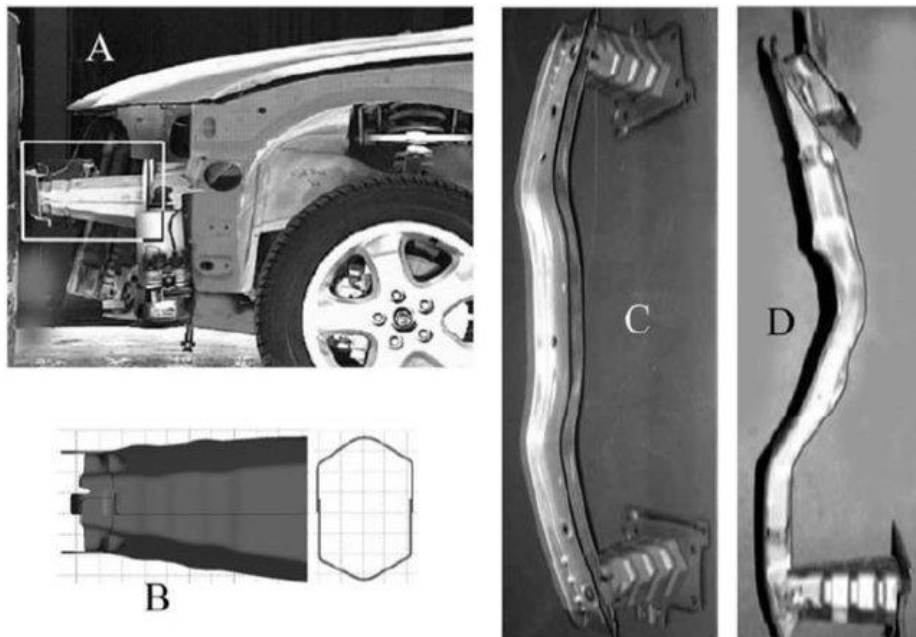


Obrázek č. 10: Absorbér po provedení zkoušky, eForce 2016

Ideálním absorbérem je profil kuželového tvaru či sestava uhlíkových trubek, které mají maximum vláken orientovaných v ose impaktu a profil je zároveň schopný při pohlcování energie udržet stabilitu. Výhodou kompozitních skořepinových a sendvičových absorbérů a také celokompozitních deformačních špiček je přenos síly do oblasti bulkheadu přes protistřepinovou přepážku. Obvykle je geometrie konstruována záměrně tak, aby byly působící síly přenášené absorbérem při nárazu co nejvíce rozloženy do dosedací plochy vozidla.

2.6 Plechové absorbéry energie

Dle práce *Návrh a analýza deformačního prvku sendvičové konstrukce pro vůz Formula Student* pana Ing. Záruby jsou tyto absorbéry nejrozšířenější v automobilovém průmyslu. Jsou lehce namontovatelné a snadno vyrobitelné. Mohou využívat různých deformačních módů, jako stříhu nebo zborcení materiálu. Pro iniciaci deformace využívají cílené oslabení předem určených míst pomocí výřezů, navrtaných otvorů či ohybů [10].



Obrázek č. 11: Příklady plechových absorbérů v automobilovém průmyslu [16]

Na rozdíl od kompozitních deformačních členů je lze snadno řešit pomocí MKP, protože jsou většinou konstruovány z oceli a hliníku, u kterých jsou dobře dostupné jejich vlastnosti.

2.7 Posouzení vhodnosti jednotlivých typů deformačního prvku

Pěnové a voštinové materiály vykazují velmi stabilní chování při deformaci od nárazu do tuhé přepážky. Voštiny navíc oproti pěnovým materiálům dávají prostor k odlehčení deformačních členů. Velice variabilním řešením pro absorpci energie jsou absorbéry z kompozitních materiálů, a zvláště potom z uhlíkových vláken a epoxidových pryskyřic. Poměr hmotnosti k schopnosti pohlcovat energii je ze zde diskutovaných materiálů nejlepší právě u uhlíkových kompozitů, ale jejich chování není většinou příliš stabilní a navíc jsou poměrně náročné na přesný návrh a výrobu. Bez MKP simulace je velmi těžké odhadnout průběh jejich deformace při nárazu. Nabízí ale možnosti největších inovací a také snížení hmotnosti.

3 Návrh zkušebních vzorků

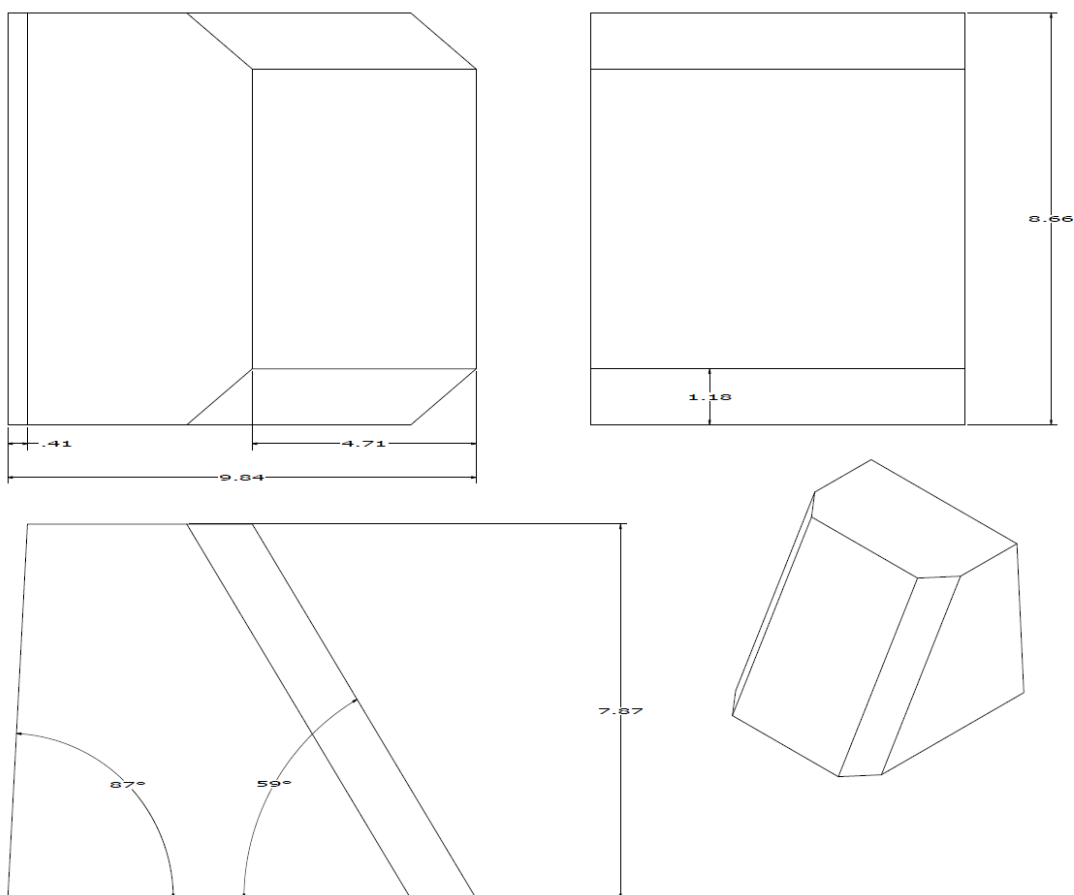
Pro návrh a následné pádové zkoušky bylo vybráno 5 variant absorbérů energie. Tyto absorbéry byly podrobeny stejné pádové zkoušce, při použití stejného vybavení.

Vybrané varianty byly následující:

- Pěnový absorbér energie
- Pěnový absorbér energie vyztužený uhlíkovou trubkou
- Absorbér z uhlíkových trubek a vedením z pěny
- Absorbér z hliníkové voštiny
- Kompozitní uhlíkový kužel

3.1 Pěnový absorbér energie

Pěnový absorbér energie se skládal ze 4 desek o tloušťce 50 mm. Návrh absorbéru vycházel z kvazistatického testování stejného materiálu. Při těchto testech byl zjištěn poměr absorbované energie v závislosti na objemu absorbéru. Pro návrh bylo použito poznateku, že 1 dm^3 je schopný absorbovat 1000 J energie. Z důvodu zástavbových rozměrů, minimálních rozměrů absorbéru a zvýšení jeho stability byl navržen tvar komolého jehlanu se zkosenými hranami, který odpovídal požadavkům zástavbového prostoru. Jako materiál byla použita pěna Divinycell H60. Pro absorbování požadované energie byl tedy určen potřebný objem pěny, a to 8 dm^3 .



Obrázek č. 12: Geometrie pěnového absorbér energie

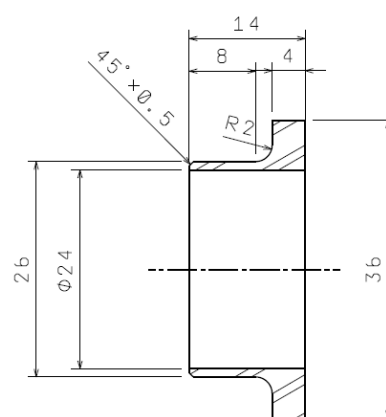
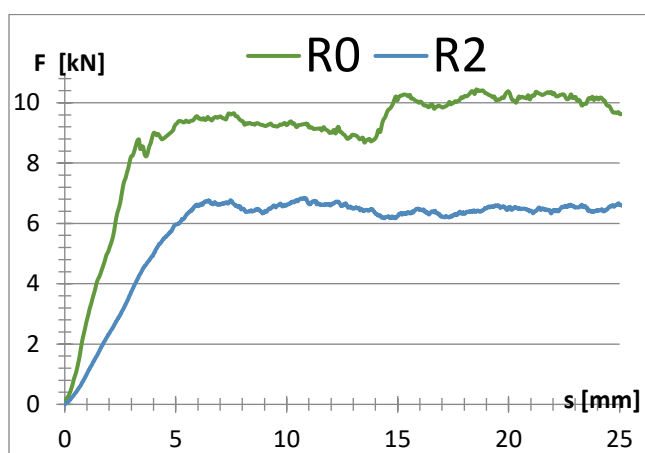
Tento absorbér energie byl testován se standardní hliníkovou protistřepinovou přepážkou, ke které byl přilepen lepidlem Loctite 9466. Jednotlivé pěnové segmenty byly spojeny stejným typem adhesiva.



Obrázek č. 13: Pěnový absorbér po provedeném testování

3.2 Pěnový absorbér energie vyztužený uhlíkovou trubicí

Z důvodu nedostatečně nízké hmotnosti předchozí varianty deformačního členu byl navržen absorbér jako kombinace pěnových segmentů a uhlíkové trubky, která jimi procházela. Tento návrh měl za cíl využít stabilního chování pěny a vysokého poměru absorbované energie k váze uhlíkové trubky [9]. Pěna byla využita jako vodící těleso pro udržení stability trubky. Na protistřeplinovou přepážku byl přilepen iniciátor deformace, který zaručil správnou deformaci trubky. Pro geometrii iniciátoru byl využit výzkum týmu eForce Prague Formula z roku 2013, zkoumající právě závislost geometrie iniciátoru na průběhu působící deformační síly [10]. Byl zvolen iniciátor nárazu s rádiusem 2 mm a geometrií navrženou členy týmu.



Obrázek č. 14: Porovnání rádiusu iniciátoru na průběhu deformační síly [10]

Obrázek č. 15: Geometrie iniciátoru

Byla zvolena navíjená uhlíková trubka od firmy Compotech Plus spol. s r.o. s označením VZ. 4 s vnitřním průměrem 26 mm

Vrstva	Objemový podíl vláken	Materiál	Tlouška	Úhel návínů
	[%]		[mm]	[°]
1	54	34-700-12K	0.397	0
2	54	34-700-12K	0.21	22.82
3	54	34-700-12K	0.208	-23.15
4	54	34-700-12K	0.189	87.15

Tabulka č. 1: Specifikace trubky Compotech Vz. 4 [10]

Dle kvazistatického testování v rámci práce Ing. Záruby byla zjištěna průměrná síla, při které se tato trubka deformuje. Síla činila 15,2 kN [10].

Pohlčená energie je rovna násobku hodnot působící deformační síly a velikosti deformace. Nahrazením průběhu působící síly průměrnou hodnotou lze použít zjednodušený vztah:

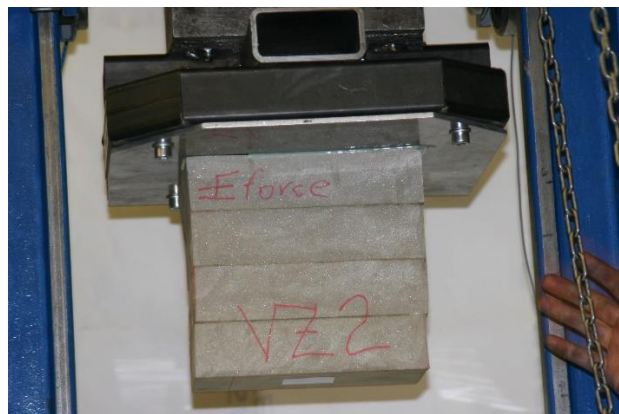
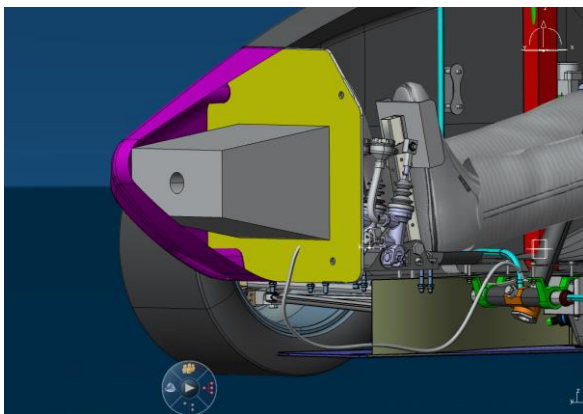
$$\text{Rovnice 3.2.1} \quad W = \bar{F}_{\text{deformační}} * x$$

Kde W ...pohlčená energie [J]

$\bar{F}_{\text{deformační}}$...průměrná deformační síla [N]

x ...deformace [m]

Jedna uhlíková trubka Vz. 4 o délce 195 mm tedy podle výše uvedeného vzorce může pohltit až 2964 J. Horní segment pěnové části absorberu byl tedy navržen tak, aby splňoval minimální rozměry dle pravidel. Ostatní segmenty potom byly z důvodu stability při nárazu rozšířeny. Byl zvolen objem pěnových segmentů 4,8 dm³. Uhlíková trubka byla umístěna do středu absorberu podélně s osou nárazu. Vypočtená energie, kterou je schopný tento absorber pohltit, byla vyčíslena na 7764 J. Veškeré části absorberu byly dohromady slepeny lepidlem Loctite 9466 a absorber byl následně umístěn na standardní protistřepinovou přepážku ze 4mm hliníku.



Obrázek č. 16: Pěnový absorber s uhlíkovou trubkou ve FSE.07 Obrázek č. 17: Absorbér před testováním pádové zkoušky

3.3 Kombinace uhlíkových trubek a vedení z pěny a vláknového kompozitu

Použití více trubek bylo po úspěšném testu varianty s jednou trubkou a pěnou logickou cestou. Z důvodu relativně malého průměru trubky nejsou příliš odolné na vzpěr. Byl zmenšen objem pěny. Z pěny Divinycell H60 bylo vytvořeno pouze vedení pro trubky, které se mělo pohybovat spolu s trubkami a stabilizovat tak jejich deformační chování. Pro další stabilizaci trubek v průběhu impaktu byl na trubky vlepen profil z pěny Divinycell H60 oblamovaný

uhlíkovým vláknem, což mělo pomoci proti roztržení profilu při vybočení trubek z osy nárazu. Z důvodu relativně malého průměru trubky nejsou příliš odolné na vzpěr. Byly použity tři uhlíkové trubky VZ. 4. Do všech 3 trubek byl umístěn shodný iniciátor jako u předchozí varianty absorbéru. Pro nutnost dodržet minimální rozměry deformačního členu byly trubky uzavřeny polykarbonátovou dutinkovou deskou. Rozměr absorbéru byl 100x200x200 mm. Oba pěnové segmenty měly společně objem přibližně 1 dm³ a spolu s 600mm trubek měl tento absorbér při ideálních chování pohltit 9120 kJ. Pro minimalizaci špičky zpomalení v prvních momentech impaktu byly délky uhlíkových trubek odstupňovány. Prostřední uhlíková trubka byla dlouhá 210 mm, zatímco krajní trubky měly délku 195 mm. Toto odstupňování mělo za cíl snížit maximální hodnotu zpomalení pod hranici 40 g vyžadovanou pravidly. U tohoto absorbéru bylo ale předem předpokládáno problematické chování z hlediska stability trubek při nárazu.

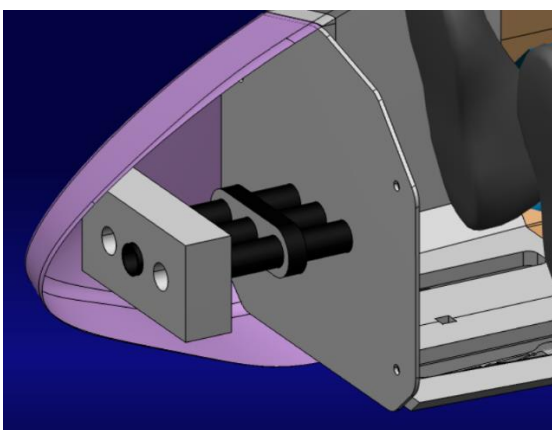
Absorbovaná energie tímto absorbérem byla vyčíslena následovně:

$$\text{Rovnice 3.3.1} \quad E = E_{\text{pěny}} + \bar{F}_{\text{deformační}} * x$$

Kde E ...pohlčená energie [J]

$E_{\text{pěny}}$...energie pohlčená pěnou [J]

x ...deformace [m]



Obrázek č. 18: Skica řešení v zástavbovém prostoru

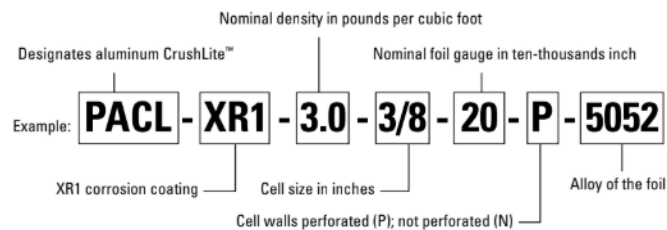
Obrázek č. 19: Absorbér z uhlíkových trubek a vedením z pěny

Tento absorbér měl po kompletaci hmotnost 0,32 kg, což je výrazné snížení hmotnosti oproti standardnímu i celopěnovému deformačnímu členu. Pro další snížení hmotnosti byl absorbér testován na částečně kompozitní protistřepinové přepážce. Přepážka byla

odlaminována v jednom kroku se skladbou 2mm Al 7075 a 2,5mm kompozitní vrstvy z uhlíkových a aramidových vláken. Veškeré komponenty byly následně spojeny pomocí lepidla Loctite 9466.

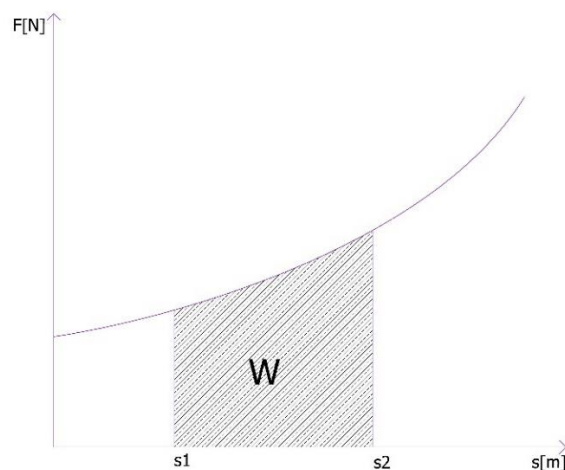
3.4 Absorbér z hliníkové voštiny

Kvůli vysokému poměru váhy k absorbované energii byla otestována i hliníková voština. Pro absorbér byl použit materiál od firmy Plastcore s označením PAMG-XR1-4,4-3/16-15-N-5052



Obrázek č. 20: Význam označení použitého typu voštiny [5]

Dle údajů od výrobce [5] se daný typ voštiny bude deformovat při síle 52,4 kN. Dále výrobce udává [5], že minimální deformace při této síle bude 70 % délky voštiny. Pro výpočet energie, kterou absorbér pohltí, vyjdeme z následujícího grafu.



Obrázek č. 21: Mechanická práce – absorbovaná energie

Dle závislosti z grafu můžeme sestavit rovnici pro absorbovanou energii.

$$\text{Rovnice 3.4.1} \quad W = F_{def} * (s_2 - s_1)$$

Kde F_{def} ...Deformační síla daná pro materiál [N]

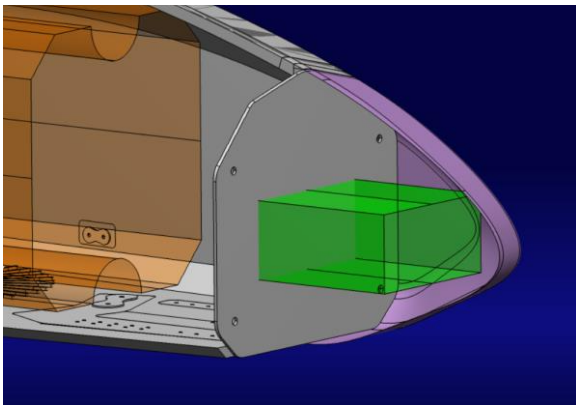
s_1 ...Počáteční deformace [m]

s_2 ...Minimální hodnota koncové deformace [m]

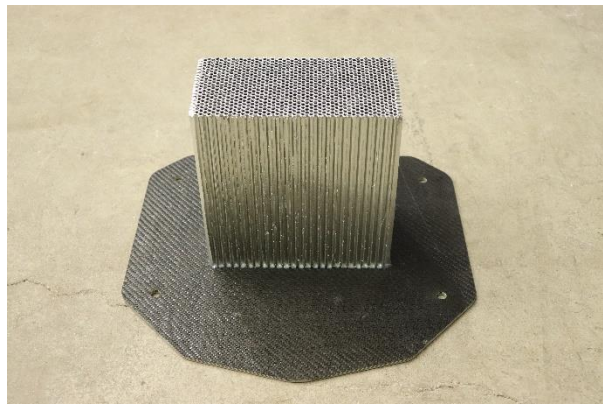
W ... pohlcená energie [J]

Výška voštinového absorbéru je 200 mm. Podle výrobce se bude při dané síle deformovat minimálně 70% délky voštiny, tedy minimální deformace s_2 je 140 mm. Po dosazení všech parametrů do vzorce dostáváme minimální absorbovanou energii absorbéru 7336 J.

Z důvodu odlehčení protistřepinové přepážky byl nahrazen hliník za kompozitní desku se skladbou 2,5mm uhlíkových a aramidových vláken a 2 mm tlustého plechu z hliníku Al 7075. Změna materiálu AIP vedla k ušetření třetiny hmotnosti tohoto dílu. Hliníková voština byla k přepážce uchycena opět pomocí lepidla Loctite 9466. Hmotnost hliníkové voštiny byla 370 g, což znamenalo oproti ostatním variantám další odlehčení.



Obrázek č. 22: Vizualizace absorbéru ve voze FSE.08



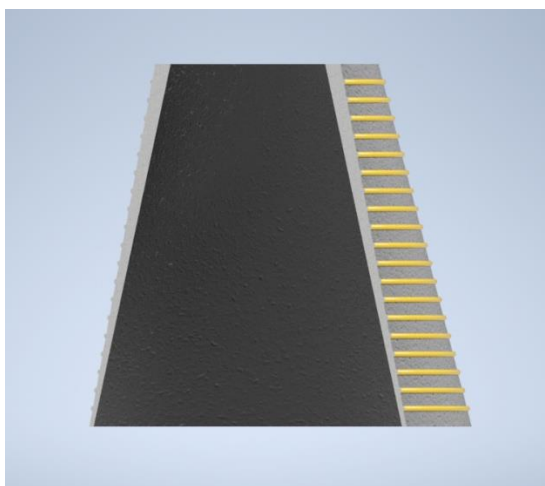
Obrázek č. 23: Absorbér z hliníkové voštiny

3.5 Kompozitní uhlíkový kužel

Kompozitní materiály mají schopnost pohltit přibližně čtyřnásobné množství energie na jednotku hmotnosti oproti absorbérům z hliníku nebo oceli [9]. Tohoto výborného poměru hmotnosti a schopnosti pohlcovat energii bylo využito pro vývoj skořepinového absorbéru energie. Byl navržen navíjený uhlíkový kužel s vlákny orientovanými převážně ve směru nárazu pro jejich maximální využití. Pro zajištění stabilního chování při deformaci byly kolem

kuželu vytvořeny aramidové obruče, které do laminátu vytvořily vruby, ve kterých bylo předpokládáno selhání kompozitní skladby.

Základní výpočet množství použitých vláken a aramidových obručí byl sestaven na základě zjednodušeného modelu vlákna s vrubem. V modelovém výpočtu se předpokládá, že při zatížení se v každém svazku vlákna vyvodí před porušením deformace, která pohltí část kinetické energie nárazu. Protože je kužel navíjený, v jakémkoli průřezu po délce je stejné množství svazků vláken. To znamená, že s klesající velikostí průměru roste tloušťka stěny kuželu. Pro výpočet se předpokládá, že vrub bude mít větší vliv tam, kde je menší tloušťka stěny, a proto první porušení vláken vznikne právě v místě vrubu, který je na největším průměru kužele.



Obrázek č. 24: Vizualizace navíjeného absorberu z uhlíkových vláken a aramidových obručí v řezu

Ve spolupráci s firmou Compotech Plus spol. s r.o. byly nadefinovány vstupní parametry pro výpočet navíjeného kompozitního kužele a sestaven zjednodušený výpočtový model.

Konstanty a parametry výpočtu			
A_f	0.47	-	Plocha svazku
V_f	0.50	-	Objemový podíl
δ	1200.00	MPa	Mez pevnosti vlákna T700 12K
δ^*	600.00	MPa	Smluvní mez pevnosti
l	200.00	mm	Délka absorberu
E_{11}	117500.00	MPa	Modul pružnosti kompozitu v podélném směru
E	235000.00	MPa	Modul pružnosti suchého vlákna v podélném směru
d_1	120.00	mm	Průměr horní
d_2	240.00	mm	Průměr spodní
ρ_0	1500	kg/m ³	Hustota uhlíku

Tabulka č. 2: Vstupní parametry pro výpočet uhlíkového absorberu

Pro výpočet pohlcené energie před porušením vlákna byly použity tyto vzorce [11]:

$$\text{Rovnice 3.5.1} \quad W = \frac{F * dl}{1000}$$

$$\text{Rovnice 3.5.2} \quad dl = \frac{F * l}{E * A}$$

$$\text{Rovnice 3.5.3} \quad F_{krit} = \delta^* * A$$

$$\text{Rovnice 3.5.4} \quad A = N_f * \frac{1}{V_f} * A_f$$

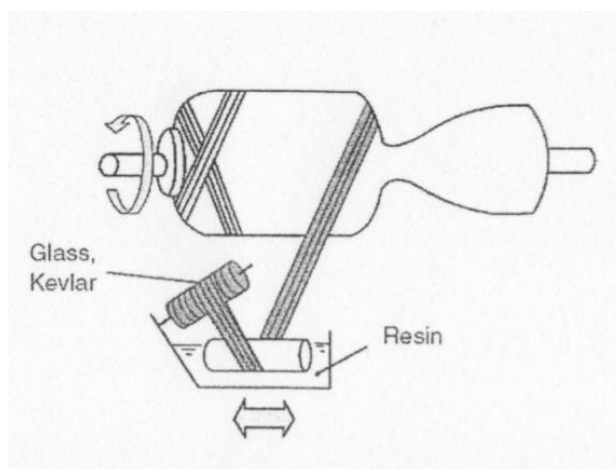
Kde N_f ...počet svazků vláken

F_{krit} ...kritická síla pro selhání vláken [N]

dl ...Deformace vyvozená ve vlákně [m]

W ... práce vyvozená ve vláknech před poruchou [J]

Celková energie, kterou podle zjednodušeného výpočtového modelu absorbér pohlítí, se vypočte jako součet energie spotřebované před jednotlivými porušeními vláken. Výpočtem byl navržen navíjený absorbér s 1600 svazky vláken a 15 aramidovými obručemi. Technologií výroby byla zvolena metoda axiálního navíjení. Výhodou této metody je možnost položit vlákna na navíjecí trn téměř axiálně za použití systému radiálních trnů (tzv. jehliček). Vlákna položená v podélném směru výrobku výrazně zvyšují axiální tuhost celého dílu [13].



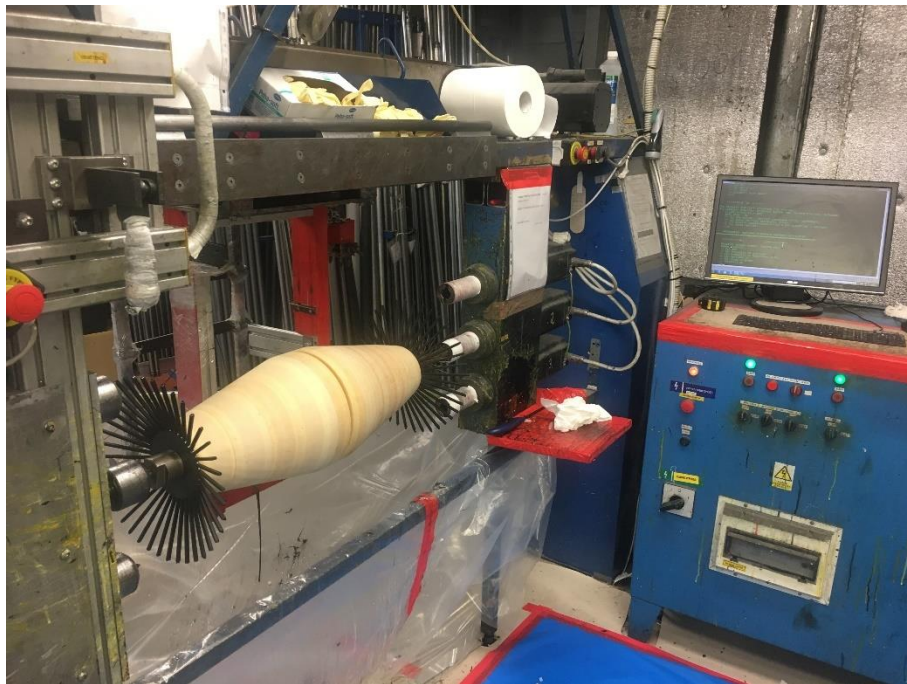
Obrázek č. 25: Schéma výroby kompozitních profilů metodou navíjení [12]

Pohlčená energie byla vypočtena jako součet energie spotřebované při deformaci vláken před porušením v místě vrubu. Po selhání v místě vrubu na průměru kužele s nejmenší tloušťkou stěny se předpokládá porušení v místě následujícího vrubu. Deformace bude takto postupovat až k poslednímu vrubu na průměru kužele s nejmenším poloměrem.

Lom - sekce	Délka absorbéru před lomem		Deformace			Absorbovaná energie	
1	l1=	200.00	dl1=	1.021277	mm	W1=	921.6 J
2	l2=	186.67	dl2=	0.953191	mm	W2=	860.16 J
3	l3=	173.33	dl3=	0.885106	mm	W3=	798.72 J
4	l4=	160.00	dl4=	0.817021	mm	W4=	737.28 J
5	l5=	146.67	dl5=	0.748936	mm	W5=	675.84 J
6	l6=	133.33	dl6=	0.680851	mm	W6=	614.4 J
7	l7=	120.00	dl7=	0.612766	mm	W7=	552.96 J
8	l8=	106.67	dl8=	0.544681	mm	W8=	491.52 J
9	l9=	93.33	dl9=	0.476596	mm	W9=	430.08 J
10	l10=	80.00	dl10=	0.408511	mm	W10=	368.64 J
11	l11=	66.67	dl11=	0.340426	mm	W 11=	307.2 J
12	l12=	53.33	dl12=	0.27234	mm	W12=	245.76 J
13	l13=	40.00	dl13=	0.204255	mm	W13=	184.32 J
14	l14=	26.67	dl14=	0.13617	mm	W14=	122.88 J
15	l15=	13.33	dl15=	0.068085	mm	W15=	61.44 J
Součet absorbované energie							7372.8 J

Tabulka č. 3: Výpočtová tabulka pro uhlíkový absorbér – 1600 svazků vlákna, 15 aramidových obručí

Pro výrobu byl navržen přípravek pro navíjení ve spolupráci s firmou Compotech Plus spol. s r.o. Technologie výroby navíjením byla zvolena z důvodu jednosměrného zatěžování vzorku při pádové zkoušce. Pro zefektivnění výroby byl navíjecí trn navržen na výrobu dvou kusů najednou. Jako materiál pro výrobu byla zvolena uhlíková vlákna T700 a epoxidová pryskyřice LG 900 UV spolu s aramidovým vláken Twaron Aramid 8050 DTEX F 5000. Byl vyroben přípravek pro navíjení, který byl následně upnut na navíjecí stroj ve společnosti Compotech Plus spol. s r.o..



Obrázek č. 26: Přípravek pro navíjení na navíjecím stroji v Compotech Plus spol. s r.o.

Technologem byla navržena skladba navíjených vláken respektující návrhový výpočet. Navinuty byly dvě vrstvy uhlíkových vláken, a poté byly v 3. vrstvě na absorbéru vytvořeny vruby pomocí suchých aramidových vláken.

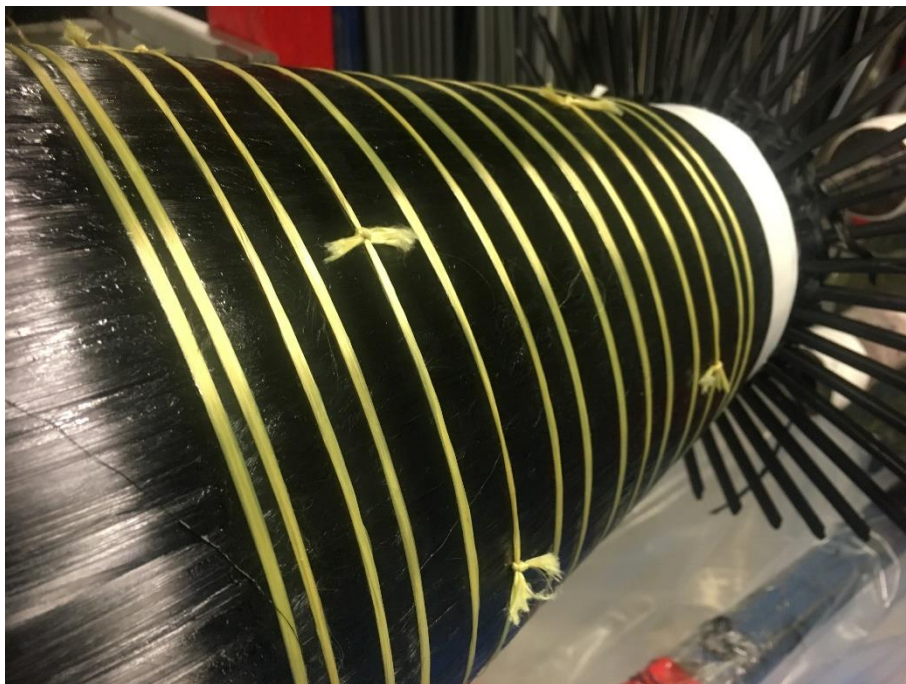
Layer Nr.	Fibre Volume Fraction	Type of Fibre	Layer Thickness*	Laminate Winding Angle*	Axial Stress*	Tangencial Stress*	Torsion Shear*	Layer Cr. s. area*
	%		mm	°	MPa	MPa	MPa	mm ²
1	55	t700	0,284	89,77	0,88	235,70	0,00	211,461
2	55	t700	1,839	0,00	22,77	9,16	0,00	1382,780
3								

Obrázek č. 27: Skladba uhlíkových vláken při navíjení absorbéru [10]



Obrázek č. 28: Absorbér v průběhu navíjení

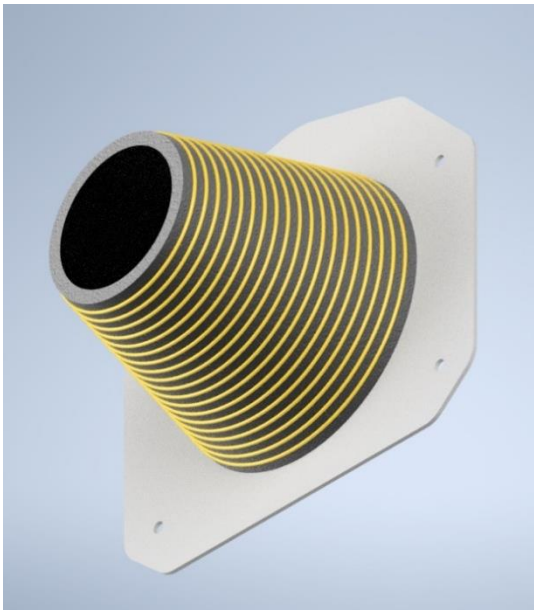
Po navinutí uhlíkových vláken byla vlákna rozprostřena rovnoměrně po povrchu válce. Poté byly navázány aramidové obruče, které vytvořily v uhlíkových vláknech vruby. Zároveň se dá předpokládat, že v místě, kde bylo aramidové vlákno navázáno se zvýšil podíl vláken vůči epoxidové matrici. Úmyslné oslabení pomocí vrubů v uhlíkových vláknech by mělo vést k poruše kompozitu v daném místě, a tak zajistit průběh deformace dle předpokladů výpočtu.



Obrázek č. 29: Aramidové obruče

Navinutý absorbér byl obalen strhvací tkaninou z materiálu nylon 66 pro odvod přebytečné matrice kompozitu. Následně byl navíjecí trn i s výrobkem umístěn do termokomory, kde se za teploty přibližně 45°C epoxid předvytverdil. Po sejmutí z přípravku byly absorbéry ořezány na požadovaný rozměr a poté temperovány v peci na 100°C po dobu 8 hodin.

Tato varianta deformačního prvku byla testována s částečně kompozitní protištrepinovou přepážkou shodnou jako u testu absorbéru z hliníkové voštiny.



Obrázek č. 30: Umístění absorbéru na AIP



Obrázek č. 31: Vyrobený kompozitní absorbér

Při navíjení těchto absorbérů byla zjištěna (pro technologii výroby) nevhodná geometrie absorbéru. Úhel kuželu, který byl zvolen, byl příliš velký a navíjené vlákno po kuželu sjíždělo. Na přípravek byly nalepeny 3 pruhy smirkového papíru, na kterém se vlákna první vrstvy zachytila a bylo možné navíjení na přípravku realizovat. Druhým problémem při výrobě se stalo navíjení aramidových obručí. Opět díky sklonu se nedařilo pomocí aramidového vlákna vytvořit vruby. Vlákna sjížděla směrem ke kraji přípravku. Aramidové obruče musely být navázány ručně a tím se snížila přesnost jejich rozestupů i hloubka vytvořených vrubů v uhlíkových vláknech.

Technologické problémy při výrobě absorbérů mohly výrazně ovlivnit chování absorbérů při dynamických testech.

3.6 Zhodnocení výpočtových modelů

Dimenzování absorbérů energie se nejlépe provádí na základě testování materiálu, z kterého jsou konstruovány, nebo detailních informací od výrobce. Díky dobrým informacím bylo snadné dimenzovat pěnový, voštinový a pěnový absorbér vyztužený uhlíkovou trubkou. U absorbérů z uhlíkových trubek bylo z počátku návrhu počítáno s problémy se stabilitou, proto byl absorbér lehce naddimenzovaný. Díky údajům z kvazistatických testů trubek [10] by výpočet absorbérů měl být relativně přesný při udržení správného chování při deformaci. U uhlíkové skořepiny byl výpočtový model založený na základních principech pružnosti a pevnosti. U kompozitních skořepin je vhodné analytický výpočet podpořit MKP simulací. Díky použití technologie navíjení uhlíkových vláken rovnoběžně s osou kuželu by uhlíkový absorbér v této práci mohl svým chováním odpovídat analytickému výpočtu. Pokud navržený absorbér při pádové zkoušce udrží stabilitu, potom analytický výpočet obvykle zhruba odpovídá deformačním vlastnostem. Otázka stability deformačních členů je ale obvykle složitá a je lepší si analytický návrh ověřit MKP simulací. U kompozitních absorbérů je také velmi důležité dodržet správné technologické postupy výroby, vytvrzení i samotné montáže.

3.7 Výběr nejvhodnější varianty

Pro výběr nejvhodnější varianty bylo rozhodnuto o použití metody vícekriteriální analýzy variant, přesněji metody bodovací s váhami. Byly stanoveny výběrové parametry, které přímo ovlivňují vhodnost použitého řešení. Klíčovou podmínkou pro výběr je úspěšné absolvování pádové zkoušky předepsané pravidly soutěže Formula Student. Výběrová tabulka byla doplněna o standardní absorbér z pěny Impaxx 770®, který je pravidly předepsán jako standardní řešení a nemusí se tak u něj provádět dynamické testy [14].

Parametry pro volbu absorbérů byly zvoleny: hmotnost, cena, objem, kvalita využití zástavbového prostoru a délka práce jednoho pracovníka nutná pro kompletaci absorbérů. Tyto kritéria byla bodově hodnocena, dle požadavků a zkušeností týmu eForce FEE Prague Formula. Bodovací škála byla od 1 do 10 bodů, kde 10 bodů symbolizuje nejlepší hodnocení.

	Standardní absorbér	Pěnový	Pěnový s trubkou	Voštinový	Uhlíkový	Uhlíkové trubky
Hmotnost [kg]	0.7	0.57	0.39	0.37	0.41	0.35
Objem [dm ³]	14.7	8	4.8	4	5.3	0.4
Cena [Euro]	130	35	30	30	60	35
Práce pro kompletaci [dny]	0.5	1.5	1.5	0.5	2	2.5
Využití zástavbového prostoru [-]	-	-	-	-	-	-

Tabulka č. 4: Hodnoty kritérií pro bodovací metodu s váhami

K této hodnotě byla vytvořena tabulka s bodovým ohodnocením variant:

	Standardní absorbér	Pěnový	Pěnový s trubkou	Voštinový	Uhlíkový	Uhlíkové trubky
Hmotnost [kg]	3	6	10	10	9	10
Objem [dm ³]	1	5	9	10	8	10
Cena [Euro]	1	9	10	10	6	9
Práce pro kompletaci [dny]	10	8	6	10	3	1
Využití zástavbového prostoru [-]	1	5	6	5	10	5

Tabulka č. 5: Bodové ohodnocené parametry absorbérů

K takto ohodnoceným parametrům již stačilo stanovit váhy jednotlivých kritérií. Váhy kritérií byly rozděleny procentuálně mezi všechny parametry.

Dalším krokem bylo přenásobení bodového hodnocení variant k nim přiřazenou váhou a vytvoření sumy sloupců takto upravené tabulky č. 5.

Hmotnost	0.3
Objem	0.1
Cena	0.2
Práce pro kompletaci	0.2
využití zástavbového prostoru	0.2

Tabulka č. 6: Váhy zvolených kritérií

Standardní absorbér	3.4
Pěnový	6.9
Pěnový s trubkou	8.3
Voštinový	9
Uhlíkový	7.3
Uhlíkové trubky	7

Tabulka č. 7: Finální hodnocení variant po zohlednění váhy kritérií

Z Tabulky č. 7 je zřejmé, že pomocí této systémové metody hodnocení variant bylo rozhodnuto, že v konfiguraci vzorků při testování je nejvhodnější volbou absorbér z hliníkové voštiny. Na nejnovějším monopostu týmu eForce je z tohoto důvodu tento absorbér použit. Při úspěšném splnění podmínek pádové zkoušky, se jeví jako nejlepší i pro další monoposty.

4 Experimentální vyhodnocení navržených variant

Pro provedení testování byla zvolena pádová zkouška. Testy byly realizovány na Ústavu letadlové a kosmické techniky při FS ČVUT v Praze. Pro testování byl postaven padostroj vybavený jedním akcelerometrem.

4.1 Testovací aparatura, testování

Pro testování bylo použito toto vybavení:



Obrázek č. 32: National instruments 923



Obrázek č. 33: Kalibrátor akcelerometru – type 4294



Obrázek č. 34: Akcelerometr – PCB Piezotronics type 353B01



Obrázek č. 35: Váha – Martes IT46LN [15]

Pro testování byl vyroben přípravek, který reprezentuje přední bulkhead vozidla a splňuje požadavky pro shodné uchycovací body jako na vozidle. Zároveň musel být přípravek navržen tak, aby byl kompatibilní s padostrojem.



Obrázek č. 36: Padostroj



Obrázek č. 37: Přípravek uchycený na padostroji

Vozík, na kterém byl uchycen přípravek, byl vytažen do požadované výšky a pomocí pneumatické spouště byl uvolněn. Následoval volný pád požadovaných parametrů (dle nastaveného závaží a výšky pádu) a dopad na ocelovou desku, která byla pro potřeby testu považována jako absolutně tuhá. Valivý odpor v ložiscích vozíku i tření vzduchu při pádové zkoušce byly zanedbány.

Data z testování byla uložena do textového souboru a následně byl pro analýzu použit program v softwaru MATLAB. Tento program byl vytvořen v týmu eForce Prague Formula, nicméně pro potřeby testování a kompatibilitu s novou verzí programu MATLAB musel být upraven. Pro testování byla nastavena maximální frekvence snímání senzoru $25600 [s^{-1}]$



Obrázek č. 38: Umístění akcelerometru na padostroji bez přidané zátěže

4.2 Způsob vyhodnocení

Pro vyhodnocení byla použita metodika vytvořená mezi lety 2013–2014 v týmu eForce FEE Prague Formula. Volný překlad principů vyhodnocení je popsán níže.

Při testování bylo měřeno zpomalení ve vertikální ose padostroje. Rychlost a deformace byly spočteny iteračně s použitím předpokladu rovnoměrně zrychleného pohybu.

”

4.2.1 Rychlost

$$\text{Rovnice 4.2.1.1} \quad v_{i+1} = v_i - aT$$

Kde v ...rychlost [m.s-1]

a ...měřené zpomalení [m.s-2]

T ...snímací perioda [s]

Počáteční rychlost v momentu nárazu v_0 byla vypočtena ze zákona zachování mechanické energie, u kterého zanedbáme tření a odpor vzduchu.

$$\text{Rovnice 4.2.1.2} \quad \frac{1}{2}mv_0^2 = mgh$$

$$\text{Rovnice 4.2.1.3} \quad v_0 = \sqrt{2gh}$$

Kde g ...gravitační konstanta [m.s-2]

h ...výška volného pádu [m]

4.2.2 Deformace

$$\text{Rovnice 4.2.2.1} \quad d_{i+1} = d_i + v_iT - \frac{1}{2}aT^2$$

Kde d ...deformace [m] (v okamžiku nárazu bylo nastaveno $d_0=0$)

4.2.3 Energie

Absorbovaná energie $E_a[\text{J}]$ byla vypočtena jako rozdíl mechanické energie na začátku nárazu a momentu, ke kterému je počítána.

Rovnice 4.2.3.1

$$E_{ai} = (E_k + E_p)_0 - (E_k + E_p)_i = \frac{1}{2}mv_0^2 - \left(\frac{1}{2}mv_i^2 - mgd_i\right) = \frac{1}{2}m(v_0^2 - v_i^2) + mgd_i$$

4.2.4 Průměrné zpomalení

Průměrné zpomalení $\bar{a}_{test}[\text{m} \cdot \text{s}^{-2}]$ bylo vypočteno jako střední hodnota zpomalení mezi okamžikem nárazu a koncem odrazu – okamžiky kdy zrychlení je 0. Protože test byl konfigurován jako pádová zkouška, je nezbytné počítat s gravitační konstantou. Konstanta byla přičtena k měřeným hodnotám zrychlení. Po této úpravě výpočtu je výpočet odpovídající testování pomocí vozíku jedoucího po kolejnicích.

Rovnice 4.2.4.1

$$\bar{a}_{test} = \frac{1}{n_{end} - n_{start} + 1} \sum_{n_{start}}^{n_{end}} (a_i + g)$$

Hmotnost m_{test} přípravku a přidaného závaží byla odlišná od požadované hmotnosti $m_{req} = 300\text{kg}$. Průměrné zpomalení muselo být přepočteno v závislosti na požadované hmotnosti.

Rovnice 4.2.4.2

$$F_{test} = F_{req}$$

Rovnice 4.2.4.3

$$m\bar{a}_{test} = m_{req}\bar{a}_{req}$$

Rovnice 4.2.4.4

$$\bar{a}_{req} = \frac{m}{m_{req}} \bar{a}_{test}$$

4.2.5 Vrcholové hodnoty zpomalení

Nejvyšší hodnota zpomalení při testu $\hat{a}_{test}[\text{m} \cdot \text{s}^{-2}]$ byla určena jako nejvyšší hodnota zpomalení mezi momentem nárazu a koncem odpružení (momentem, kdy $a=0$). Pro výběr této hodnoty byl na data aplikován standardní filtr (definovaný v pravidlech soutěže). Kvůli konfiguraci testu jako pádové zkoušky bylo opět do výpočtu zahrnuto i gravitační zrychlení.

$$\text{Rovnice 4.2.5.1} \quad \hat{a}_{test} = \max_{nstart \leq i \leq nend} \{a_i + g\}$$

$$\text{Rovnice 4.2.5.2} \quad \hat{a}_{req} = \frac{m}{m_{req}} \hat{a}_{test} \quad \text{”}$$

4.2.6 Výpočet uchycení předního přítláčného křídla

Z důvodu umístění přítláčného křídla pře deformační člen je nutné výpočtem potvrdit, že při nárazu uchycení předního křídla selže při nižším zatížení, než je síla působící na deformační člen při limitním zpomalení. Pro tento výpočet jsou využity limitní hodnoty zpomalení a váha vozidla definovaná pro testování deformačního prvku.

$$\text{Rovnice 4.2.6.2} \quad a_{max} = 40g$$

$$\text{Rovnice 4.2.6.3} \quad m = 300kg$$

Síla působící na deformační člen při limitním zpomalení je dána vztahem:

$$\text{Rovnice 4.2.6.4} \quad F_{limit} = m * g * a_{max} = 300 * 9,81 * 40 = 117,72 \text{ kN}$$

Pro přední přítláčné křídlo bylo zvoleno uchycení do celouhlíkového šasi na 6 hliníkových šroubů M6 skrz uchycovací uhlíkovou desku. Materiál šroubů byl EN AW 6060 T.6 s těmito vlastnostmi:

$$\text{Rovnice 4.2.6.5} \quad R_{p0,2} = 160 \text{ Mpa}$$

$$\text{Rovnice 4.2.6.6} \quad R_m = 215 \text{ Mpa}$$

Šrouby byly umístěny kolmo na směr čelního nárazu. Proto pro výpočet postačí vypočítat mezní stříhové napětí pro daný počet použitých šroubů. Nejmenší průměr šroubu M6 je $d_{min} = 4,6 \text{ mm}$

Stříhové napětí ve šroubu bylo vypočteno jako:

$$\text{Rovnice 4.2.6.7} \quad S = \frac{4F}{\pi * d^2} [\text{MPa}]$$

Střihová síla pro 1 šroub:

$$\text{Rovnice 4.2.6.8} \quad F_{bolt} = \frac{S * \pi * d^2}{4} [N]$$

$$\text{Rovnice 4.2.6.9} \quad F_{bolt} = \frac{R_m * \pi * d^2}{4} = \frac{215 * \pi * 4,6^2}{4} = 3,57 [kN]$$

Celková síla potřebná pro selhání uchycení předního křídla:

$$\text{Rovnice 4.2.6.10} \quad F_{wing} = 6 * F_{bolt} = 21,42 [kN]$$

Celková síla při nárazu byla spočtena jako součet síly působící při maximálním zpomalení a_{peak} deformačního členu a síla potřebná pro uchycení předního křídla.

$$\text{Rovnice 4.2.6.11} \quad F_{IA} = m * g * a_{peak} = 300 * 9,81 * 22,69 = 66,78 [kN]$$

$$\text{Rovnice 4.2.6.12} \quad F_{total} = F_{wing} + F_{IA} = 21,42 + 66,78 = 88,2 [kN]$$

Pro tento výpočet byla použita a_{peak} pro absorbér z hliníkové voštiny. Pro tento absorbér je uchycení předního křídla vyhovující, protože platí:

$$\text{Rovnice 4.2.6.13} \quad F_{total} < F_{limit}$$

5 Výsledky pádové zkoušky

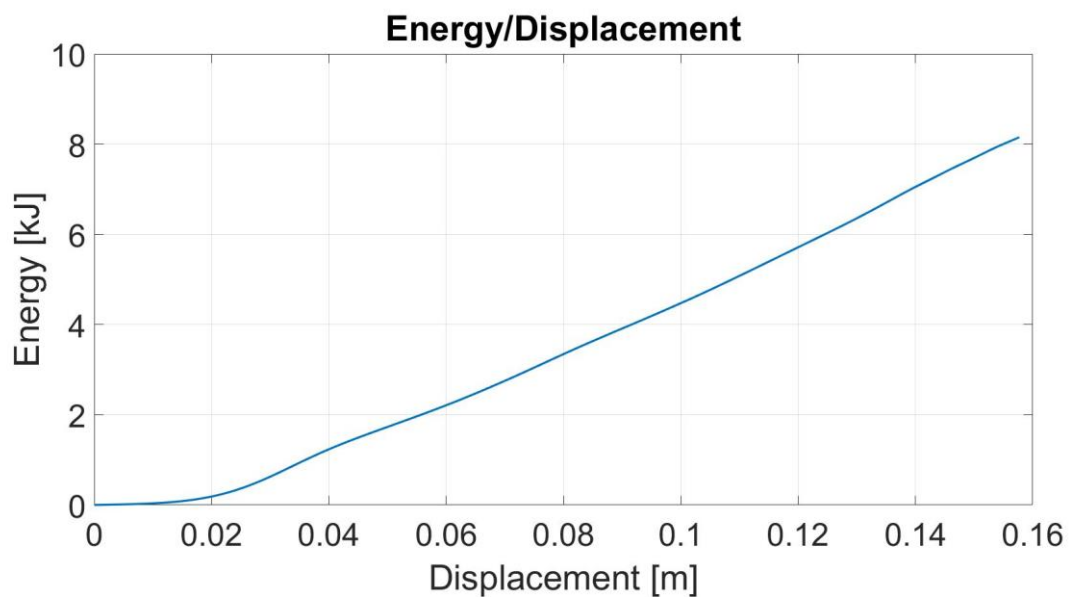
5.1 Pěnový deformační člen

U pěnového deformačního členu byla provedena pádová zkouška s parametry:

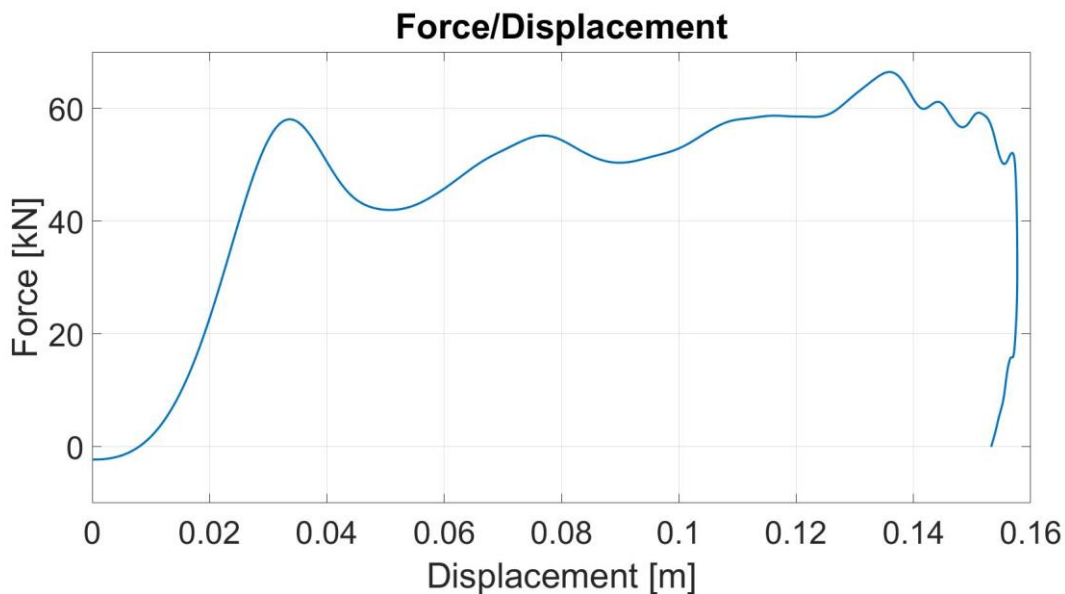
Výška volného pádu	1,52 m
Hmotnost závaží	493 kg
Měřená veličina	Zrychlení
Kalibrace senzoru	ANO
Frekvence snímání	25600

Tabulka č. 8: Parametry pádové zkoušky

Po provedení pádové zkoušky byla data vyhodnocena pomocí programu v Matlabu. Výsledky jsou znázorněny na následujících dvou obrázcích.



Obrázek č. 39: Závislost pohlcené energie na deformaci



Obrázek č. 40: Závislost deformační síly na deformaci

Pěna se deformovala ukázkově. Průměrné zpomalení bylo vypočteno jako 15,96 g a maximální hodnota po aplikaci filtru byla 22,77 g.

Absorbér z pěnových segmentů pohltil 8150 J. Maximální deformace absorbéru byla 157,7 mm. Deformace protistřepinové přepážky nebyla vizuálně znatelná. Deformace hliníkového plechu tedy ani nezasáhla do oblasti plastických deformací, a proto nebylo nutné deformaci měřit. Do protokolu byla zapsána hodnota deformace protistřepinové přepážky 0 mm.

Pěnový materiál se při absorpci energie choval dle předpokladů. Po elastické deformaci je na Obrázku č. 39 vidět plastická deformace, kdy se pěna stlačovala pod téměř konstantní silou. Z grafu je také patrné, že absorbér se nedostal do fáze, kdy je plastická deformace vyčerpána a dále se již jen zhutňuje samotný materiál ze kterého byla pěna vyrobena.

Testovaný absorbér vyhověl všem pravidlům pro testování deformačního členu studentské formule.

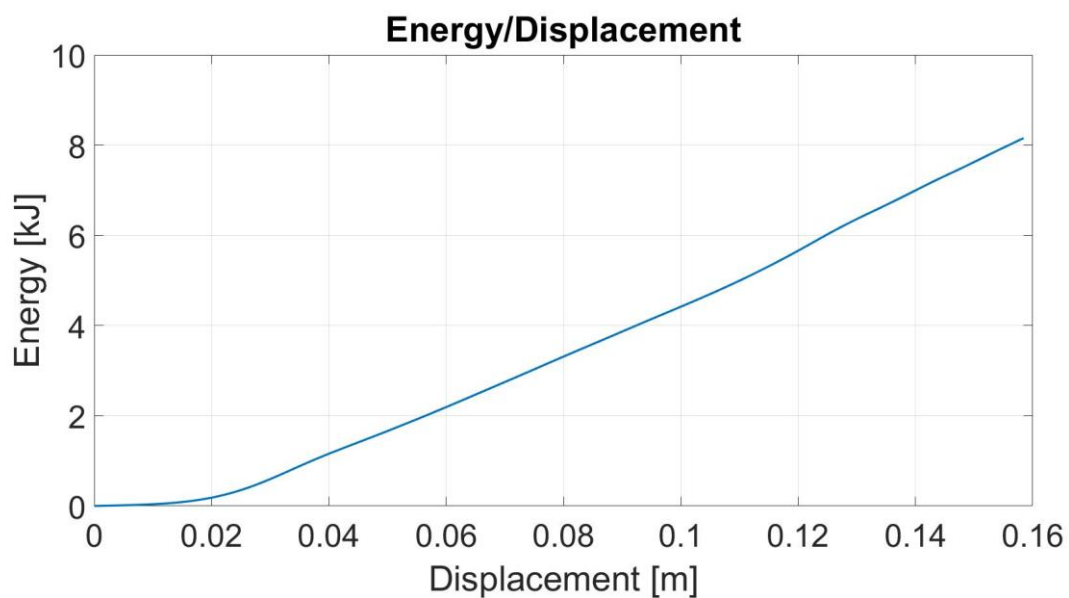
5.2 Pěnový deformační člen s uhlíkovou trubicou

U pěnového absorbéru s uhlíkovou trubicou byla provedena pádová zkouška s parametry:

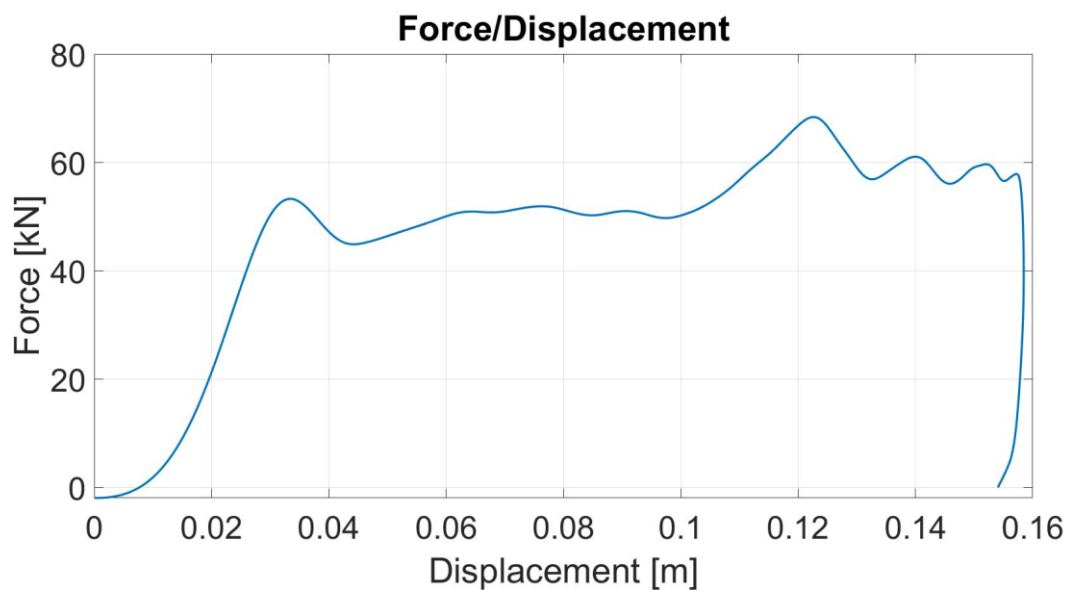
Výška volného pádu	1,52 m
Hmotnost závaží	493 kg
Měřená veličina	Zrychlení
Kalibrace senzoru	ANO
Frekvence snímání	25600

Tabulka č.9: Parametry pádové zkoušky

Po provedení pádové zkoušky byla data opět vyhodnocena pomocí programu Matlab. Z programu jsem opět vynesl dva charakteristické grafy pro tento test.



Obrázek č. 41: Závislost pohlcené energie na deformaci



Obrázek č. 42 Závislost deformační síly na deformaci

Uhlíková trubka se díky správně zvolenému iniciátoru deformovala ukázkově. Pěna v grafech vykazuje velmi konstantní schopnost pohlcovat energii pádové zkoušky a zajistila také dokonalou stabilizaci trubky.



Obrázek č. 43: Deformovaná trubka s iniciátorem



Obrázek č. 44: Absorbér po nárazu

Díky stabilnímu chování obou materiálů byla síla působící do protistřepinové přepážky dostatečně malá a v hliníkovém plechu nevyvodila průhyb větší než 25 mm, který by byl v rozporu s pravidly. Deformace protistřepinové přepážky byla přibližně 1,5 mm v místě umístění iniciátoru pod trubkou. Výsledkem testu bylo pohlcení 8153,8 J a maximální vyvozená deformace absorbéru byla 158 mm.

Průměrné zpomalení při nárazu bylo vypočteno na 16,18 g a maximální hodnota po použití pravidly definovaného filtru byla 24,33 g.

Tento deformační prvek byl uznán komisaři soutěže jako vyhovující. Úspěšně splnil podmínky pro aplikaci na vůz týmu eForce FEE Prague Formula pro rok 2018.

Absorbér byl navržen s ohledem na stabilitu a zástavbový prostor monopostu. Absorbér měl hmotnost 392 g.

5.3 Absorbér z kompozitních trubek s vedením z pěny

U absorbéru z uhlíkových trubek byla provedena pádová zkouška s parametry:

Výška volného pádu	1,50 m
Hmotnost závaží	502,8 kg
Měřená veličina	Zrychlení
Kalibrace senzoru	ANO
Frekvence snímání	25600

Tabulka č. 10: Parametry pádové zkoušky

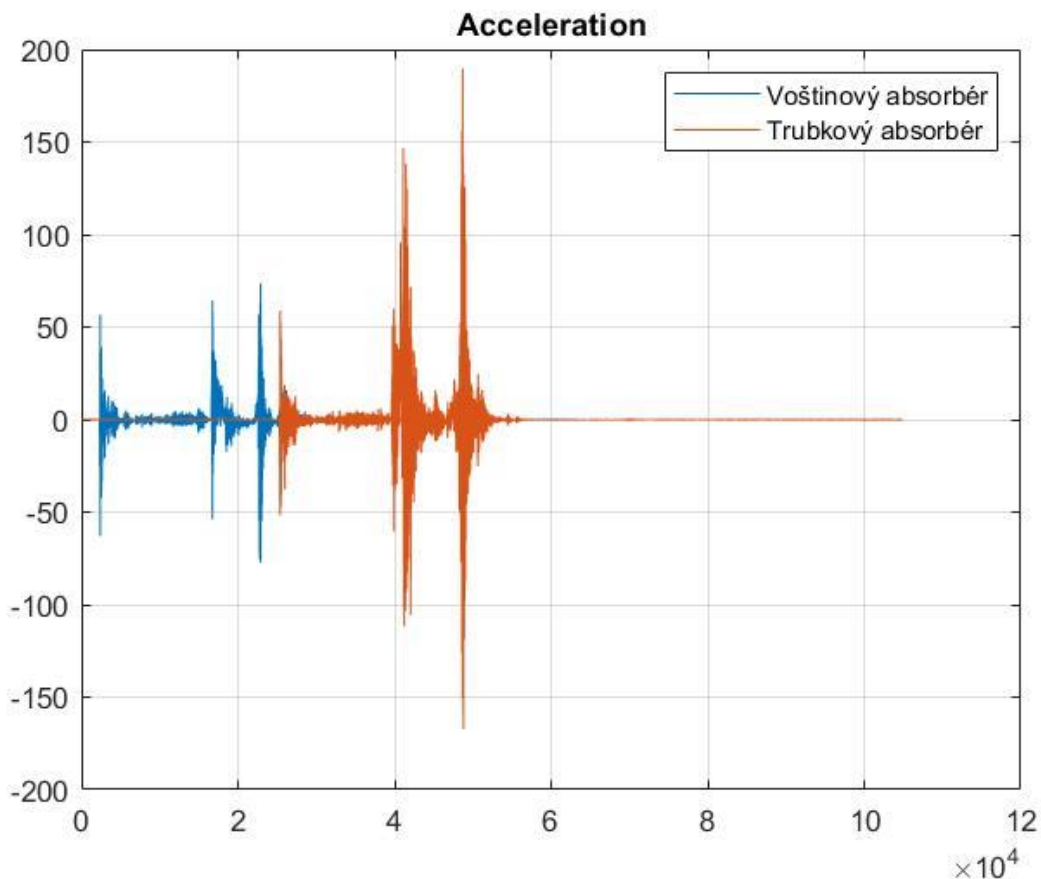


Obrázek č. 45: Absorbér po provedení zkoušky

Tento absorbér nevyhověl požadavkům v pravidlech soutěže. Průměrné zpomalení při deformaci bylo 35,75g a peaková hodnota pro aplikaci filtru byla 80,50g. Tyto hodnoty přibližně dvakrát překračují pravidly definované limity. Tyto hodnoty byly způsobeny kritickým selháním kompozitních trubek. Na záznamu vysokorychlostní kamery bylo znatelné, že trubky se i přes vedení z pěny Divinycell H60 deformovaly nerovnoměrně a nerovnoměrně

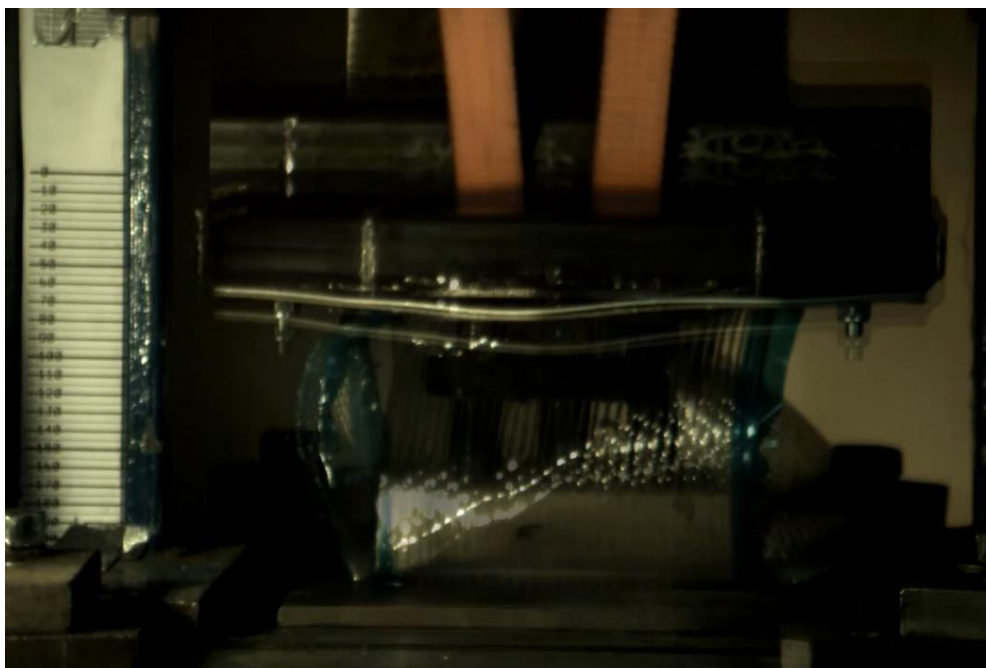
zatížení způsobilo vyosení trubek a jejich následné zhroucení mimo osu nárazu. Trubky selhaly přibližně při 60 mm deformované délky. Při tomto testu tedy nebyla využita celá délka trubek, a proto absorbovaná energie nebyla dostatečná. Z důvodu extrémních naměřených hodnot zpomalení, které akcelerometr zaznamenával, je jisté, že vyhodnocené grafy neodpovídají skutečnému průběhu nárazu. Výsledkem pádové zkoušky bylo pohlcení 71 kJ energie a počáteční síla při dopadu byla výrazně posunuta od očekávané nulové hodnoty. Ani skript v Matlabu a ani filtr dat nebyl nastaven pro výpočet přímého nárazu do dopadové plochy.

Z důvodu nesplnění podmínek daných pravidly soutěže Formula Student pro hodnoty maximálního a průměrného zrychlení (40 g a 20 g) nebylo nutné vynášet grafy z testování. Pro porovnání chování absorbérů byl vykreslen graf porovnávající zpomalení trubkového a voštinového absorbéru.



Obrázek č. 46: Porovnání měřených hodnot zpomalení pro trubkový a voštinový absorbér

Z porovnání naměřených dat je zřejmé, že po prvním odskoku přípravku z dopadové plochy nemělo, co dostatečně utlumit následný dopad. Jediné, co částečně tlumilo náraz přípravku do dopadové plochy bylo, pěnové vedení trubek. Objem pěny však nebyl pro utlumení takového nárazu dostatečný.



Obrázek č. 47: Okamžik podlomení uhlíkových trubek

Tento absorbér byl testován na částečně kompozitní protistřepinové přepážce. Náraz byl natolik silný, že delaminoval kompozitní vrstvy od hliníkového plechu. V místech uchycení AIP k přípravku bylo zřejmé, že kompozitní deska nebyla vhodně dimenzována pro náraz do dopadové plochy.

Pádová zkouška tohoto absorberu byla neúspěšná. Uhlíkové trubky svým chováním potvrdily při návrhu panující obavy z jejich nízké stability. I přes použití pěnových segmentů pro udržení stability se nepodařilo vytvořit trubkám dostatečnou oporu pro využití jejich potenciálu k pohlcení energie.

5.4 Absorbér z hliníkové voštiny

U absorbéru z hliníkové voštiny byla provedena pádová zkouška s parametry:

Výška volného pádu	1,50 m
Hmotnost závaží	502,8 kg
Měřená veličina	Zrychlení
Kalibrace senzoru	ANO
Frekvence snímání	25600

Tabulka č.11: Parametry pádové zkoušky

Hliníková voština se dle výrobce začne deformovat při okamžité deformační síle přibližně 52,4 kN. Při prvotním nárazu přesáhla síla působící na absorbér 60 kN, což lehce překročilo hodnotu udávanou výrobcem po zohlednění odchylky 10 %.

Průměrné zpomalení skript v Matlabu vyhodnotil na 15.03 g a peaková hodnota byla 22,69 g. Při testu bylo absorbérem pohlceno 8271 J. Tyto hodnoty splňují požadavky dané pravidly soutěže.

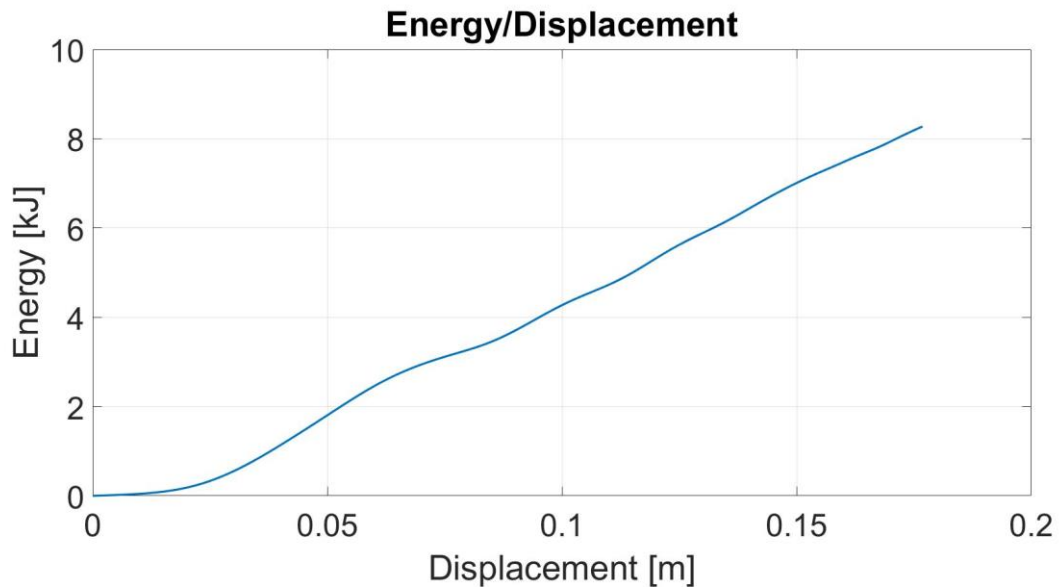


Obrázek č. 48: Absorbér pro provedení testu

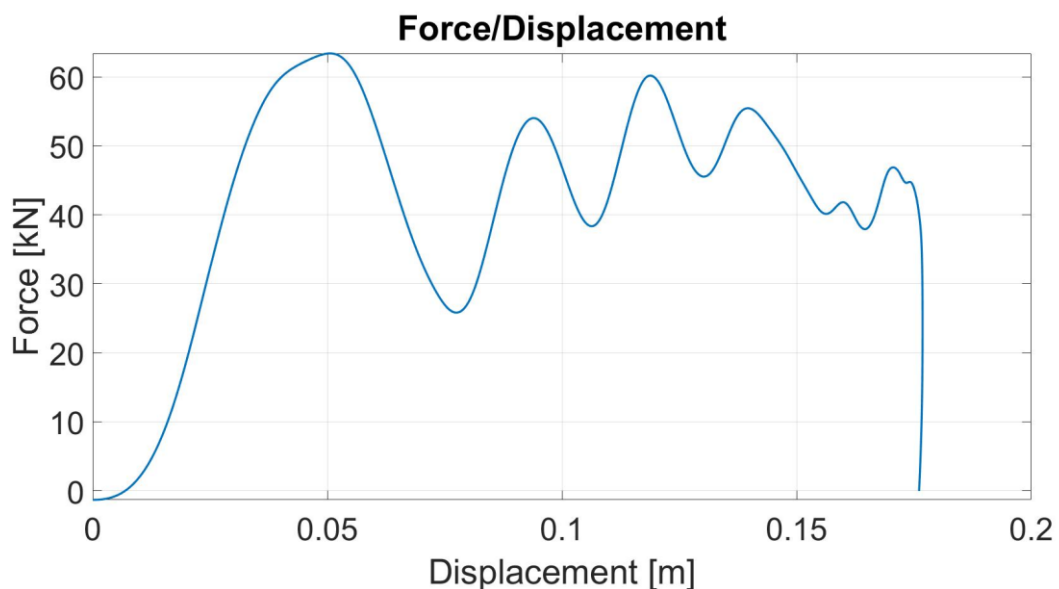
Poměrně kritickou byla pro výsledky testu částečně kompozitní protistřepinová přepážka. Hliníkový absorbér se začal deformovat při silách o přibližně 15 % vyšších, než bylo při návrhu předpokládáno. Protistřepinová přepážka byla pro tento náraz lehce poddimenzovaná. Do protistřepinové přepážky se před začátkem deformace přenesla přes absorbér taková energie nárazu, že plastická deformace přepážky dosáhla 12,3 mm. Maximální povolená deformace je 25 mm. Absorbér i v tomto ohledu vyhověl pravidlům.

Pro použití stejného typu absorbéru je nutné při návrhu alternativní přepážky počítat s tolerovanou hodnotou deformační síly udávané výrobcem.

Po provedení pádové zkoušky byla data vyhodnocena pomocí skriptu v Matlabu. Výsledky jsou znázorněny na následujících dvou obrázcích.



Obrázek č. 49: Závislost pohlcené energie na deformaci



Obrázek č. 50: Závislost deformační síly na deformaci

Tento deformační prvek úspěšně splnil podmínky soutěže pro aplikaci na vůz týmu eForce FEE Prague Formula pro rok 2019.

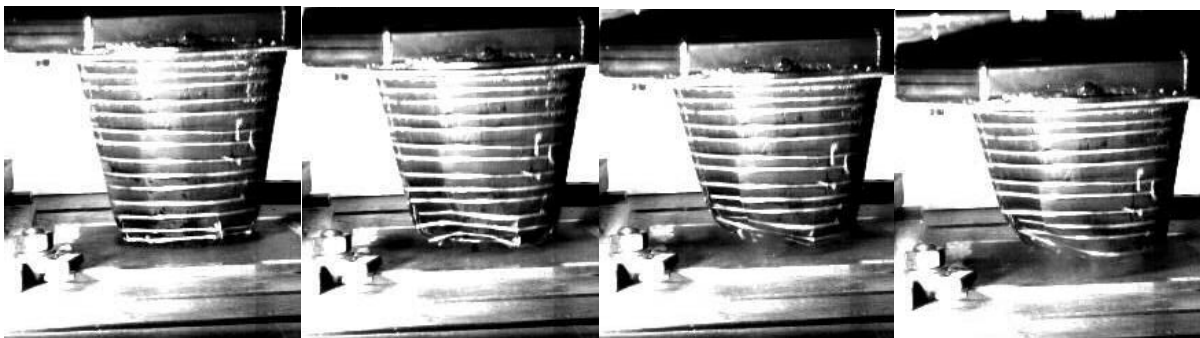
5.5 Uhlíkový absorbér

U pěnového absorbérů s uhlíkovou trůbkou byla provedena pádová zkouška s parametry:

Výška volného pádu	1,49 m
Hmotnost závaží	503,2 kg
Měřená veličina	Zrychlení
Kalibrace senzoru	ANO
Frekvence snímání	25600

Tabulka č. 12: Parametry pádové zkoušky

Dle předpokladů při návrhu se měl absorbér začít deformovat ze strany protistřepinové přepážky a deformace měla postupovat s klesající tloušťkou stěny uhlíkové skořepiny. Při pádové zkoušce průběh deformace postupoval z druhé strany.



Obrázek č. 51: Iniciační deformace uhlíkového absorbérů

V první třetině deformace absorbérů došlo k nevhodné deformaci osově umístěných vláken. Stěny absorbérů neměly dostatečnou tuhost a prohnyly se směrem k ose uhlíkového kuželu.



Obrázek č. 52: Pokračující deformace uhlíkového absorbérů

Průběh deformace absorbéru zůstal stejný přibližně do poloviny jeho délky. Tedy přibližně 100 mm délky absorbéru při deformaci ztratilo stabilitu a vlivem ohybového zatížení se podlomilo směrem do středu absorbéru ve velkých segmentech. To zapříčinilo nedostatečné pohlcení energie, protože velká část vláken zůstala neporušená.



Obrázek č. 53: Podlomené segmenty skořepiny s nevhodným průběhem deformace

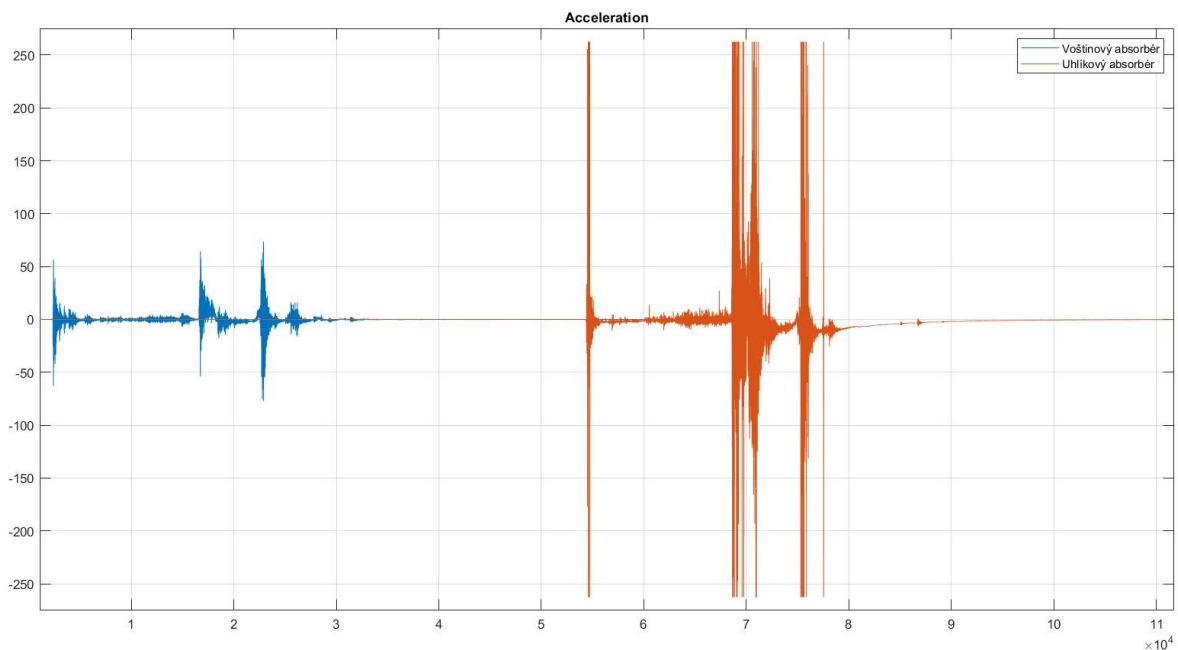
Druhá polovina absorbéru se deformovala dle předpokladů návrhu. Podle částí deformovaných částí se sekce absorbéru deformovaly převážně lomem v délce mezi obručení a vzájemnou delaminací podélných vláken kompozitu.



Obrázek č. 54: Koncová část deformace uhlíkového absorbéru

Z důvodu nevhodného průběhu deformace absorbér nevyhověl podmínkám uvedeným v pravidlech. Průměrná hodnota zpomalení při pádové zkoušce byla 32.16 g a maximální hodnota dokonce 54.39 g po použití datového filtru.

Pro porovnání naměřených hodnot zpomalení byly hodnoty z měření při pádové zkoušce porovnány s naměřenými daty z testování voštinového absorbéru. U voštinového absorbéru došlo k dostatečnému pohlcení energie v mezích splňující pravidla. U uhlíkového absorbéru došlo k nedostatečnému pohlcení energie, což způsobilo dosednutí přípravku na dopadovou plochu a následnými odskokem a opětovnými dopady. Odskoky a dopady již nebyly tlumené žádnými částmi absorbéru, a proto akcelerometr zaznamenal hodnoty překračující limit měření 260 g. Pro výpočet maximálního zpomalení byly extrémní hodnoty odstraněny datovým filtrem.



Obrázek č. 55: Porovnání naměřených dat voštinového a uhlíkového absorbéru

Díky jinému chování při deformaci absorbéru, než předpokládal analytický výpočet, absorbér kriticky selhal. Toto selhání bylo nejspíše způsobeno technologickými chybami při výrobě přípravku a samotném navíjení absorbéru. Změněná a nepřesná geometrie nejspíš způsobila zvýšený ohybový moment působící na podélná vlákna a praskání velkých segmentů absorbéru. Samotná geometrie absorbéru byla problém jak při výrobě, tak při ztrátě stability první poloviny absorbéru. Úhel stěny kuželu byl příliš velký a pro další varianty je nutné geometrii změnit.

5.6 Zhodnocení testování

Absorbér z kompozitních trubek a vedením z pěny vynikal svojí nízkou hmotností, avšak při testování nesplnil požadavky dané pravidly. Kompozitní trubky při prvotním nárazu nejspíše nedokázaly udržet stabilitu a vyosily se z trajektorie nárazu. To způsobilo podlomení trubky a nedostatečné pohlcení energie. Selhání trubek vedlo k nárazu přípravku do dopadové plochy a zarušení měření. Hodnoty zpomalení po profiltrování dat byly více než čtyřnásobně přesahující limity dané pravidly soutěže. Tento absorbér byl vyhodnocen jako nevyhovující.

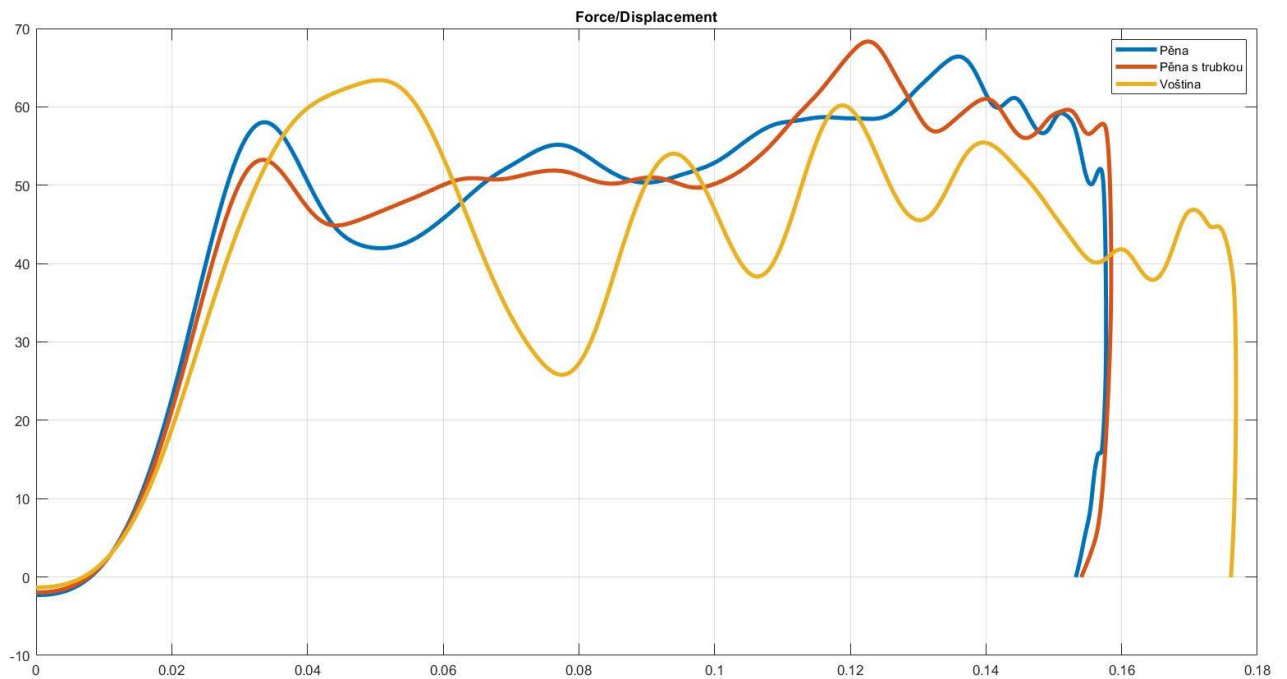
Podobně se při pádové zkoušce choval i navíjený kompozitní kužel. Polovina deformované délky kriticky selhala. Absorbér tedy nemohl pohltit dostatečné množství energie dle výpočtu. Největší vinu na neúspěchu tohoto testu nejspíše měla nedokonalá technologie výroby i nevhodně zvolená geometrie kuželu. Pro verzi navíjeného uhlíkového absorbéru bude třeba přidat iniciátor nárazu, zmenšit úhel stěny kuželu a při výrobě zajistit lepší vytvoření vrubů aramidovými vlákny v uhlíkových podélných vláknech. Případné další testy této varianty absorbéru bude vhodné ověřit analýzou MKP.

Ostatní absorbéry prošly pádovou zkouškou bez větších problémů. Všechny varianty se chovaly dle předpokladu, a tedy prokázaly stabilní chování při nárazu jak průměrné, tak i peakové hodnoty zpomalení v limitech vynucenými pravidly.

	Al voština	Pěnový absorbér	Pěnový absorbér s uhlíkovou trúbkou
Maximální zpomalení [g]	22,69	22,17	24,33
Průměrné zpomalení [g]	15,03	15,96	16,18
Pohlčená energie [J]	8271	8150,1	8153,8

Tabulka č. 13: Shrnutí výsledků úspěšných zkoušek

Výsledné průběhy působících sil v průběhu deformace u absorbérů s úspěšnými pádovými testy byly vyneseny do společného grafu pro porovnání pádových zkoušek.



Obrázek č. 56: Porovnání působících sil u absorbérů, které splnily požadavky testování

Z porovnání působících sil v obrázku č. 56 je vidět, že průběh deformace vykazuje stabilnější chování u pěnových absorbérů než u voštinového. Síly působící při deformaci jsou téměř konstantní, a proto je průběh pohlcování energie plynulejší.

6 Závěr

Cílem práce bylo navrhnout a otestovat deformační člen pro umístění na studentskou elektrickou formuli eForce FEE Prague Formula.

Po zadefinování řešeného problému byla provedena krátká rešerše používaných absorbérů energie pro sportovní vozidla, převážně pak pro monoposty soutěže Formula Student. Bylo vybráno 5 variant deformačních členů.

Klíčovými parametry pro použití absorbéru na závodním voze soutěže Formula Student jsou nízká hmotnost, bezproblémové využití zástavbového prostoru a splnění pravidly daných požadavků pro testování deformačních prvků.

Při testování bylo zjištěno, že uhlíkové skořepiny mají výrazný problém s udržení stability při nárazu. Obě testované varianty vedly ke katastrofickému selhání kompozitní struktury a nedostatečnému pohlcení energie. To v důsledku vedlo k hodnotám zpomalení přesahující více jak dvojnásobně pravidly dané limity. Jak absorbér z uhlíkových trubek, tak navíjený kompozitní kužel pádovou zkouškou neprošly úspěšně. Pro další práci s těmito variantami bude nutné změnit geometrii absorbérů a provést návrhové simulace pomocí analýzy MKP.

Ostatní varianty deformačních členů obstály v testování na výbornou a splnili všechny podmínky pravidel soutěže Formula Student i předpoklady analytických výpočtů. Pro výběr absorbéru, který je nejvhodnější pro použití na monopostu elektrické formule eForce FEE Prague Formula byla použita metoda vícekritériální analýzy variant – bodovací s váhami [14].

Z testovaných variant byl jako ideální pro dané použití vybrán absorbér z hliníkové voštiny. Jeho stabilní chování při deformaci a nízká hodnota průměrného zpomalení zaručuje studentům pilotujícím monopost týmu eForce FEE Prague Formula nejvyšší míru bezpečnosti a v případě čelního nárazu pomůže ochránit jejich zdraví i snížit materiální škody na vozidle. Tento absorbér byl použit na monopostu FSE.08 pro sezónu 2019 a je i vybraným řešením pro použití na budoucím monopostu FSE.09 pro sezónu 2020.

Zdroje

- [1] FEL [online]. ČVUT: ©2019 [cit. 5.08.2019]. Dostupné z: <https://eforce.cvut.cz/>
- [2] Formula Student Germany GmbH. *FS-Rules 2019 V1.1*. 2019. Dostupné z: https://www.formulastudent.de/fileadmin/user_upload/all/2019/rules/FS-Rules_2019_V1.1.pdf
- [3] BSCI ENERGY IMPACT SYSTEMS [online]. *FSAE Impact Attenuator*. 2019. Dostupné z: <https://www.rollbarpadding.com/product/id-48>
- [4] ERG Aerospace Corp [online]. Foam Energy Absorption. Dostupné z: <http://ergaerospace.com/technical-data/duocel-foam-energy-absorption/>
- [5] Plascore Incorporated [online]. Plascore CrushLite™. Dostupné z: <https://www.plascore.com/honeycomb/energy-absorbition/crushlite/>
- [6] ALMERICCO, Davide. *Impact Attenuator design*. Milán, 2010. Politecnico of Milano
- [7] Farley, Gary L.. *Energy Absorbition of Composite Materials*. Hampton, VA. 1983. Technical Memorandum. NASA. Dostupné z: <https://apps.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a129020.pdf>.
- [8] Segala, David B.. *Energy Absorbition Mechanisms in Unidirectional Composites Subjected to Dynamic Loading Events*. Newport. 2012. Naval Undersea Warfare Center Division
- [9] Auwal, Muhammad. *Energy Absorbition Behaviour of Filament Wound Glass and Carbon Epoxies Composite Tubes*. Wudil. 2014. Kano University of Science and Technology
- [10] Záruba, Petr. *Návrh a analýza deformačního prvku sendvičové konstrukce pro vůz Formula Student*. Praha. 2016. České vysoké učení technické
- [11] MICHALEC, Jiří. *Pružnost a pevnost I. 3. vyd.* V Praze: České vysoké učení technické, 2009. ISBN 978-80-01-04224-3.
- [12] BARBERO, Ever J. *Introduction to composite materials design*. 2nd ed. Boca Raton: Taylor & Francis, 2011. ISBN 9781420079159.
- [13] ING. ZDENĚK KOŘÍNEK, *Kompozity - Doc. Ing. Zdeněk Kořínek, CSc.* [online] © 2016. [cit. 2019] Dostupné z: <https://kompozity.webnode.cz/>
- [14] ŠUBRT, Tomáš. *Ekonomicko-matematické metody*. 2. upravené vydání. Plzeň: Vydavatelství a nakladatelství Aleš Čeněk, 2015. ISBN 978-80-7380-563-0.

[15] LeonScale.cz [online]. 2019 [cit. 2019-08-08]. Dostupné z: <https://www.leonscale.cz/>

[16] BORIA, Simonetta, Stefano MACCAGNANI, Roberto GIAMBÒ a Fabio GIANNONI. *Crashworthiness and lightweight design of an innovative microcar. International Journal of Automotive Composites* [online]. 2015, 1(4) [cit. 2019-08-09]. DOI: 10.1504/IJAUTO.2015.071124. ISSN 2051-8218. Dostupné z: <http://www.inderscience.com/link.php?id=71124>