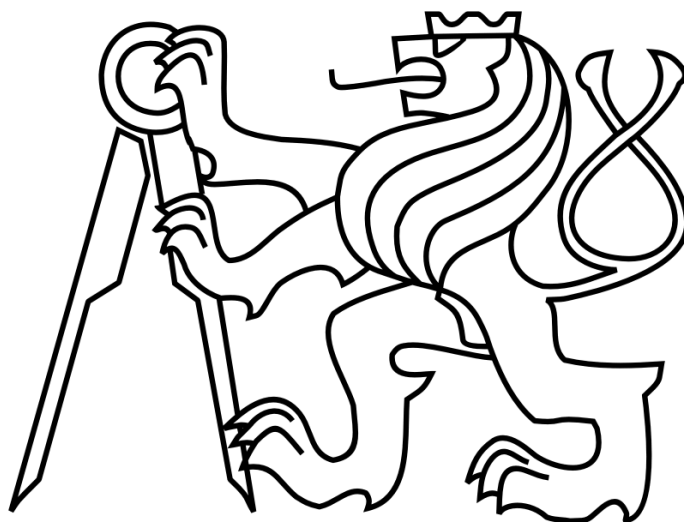


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ

12 120 – Ústav automobilů, spalovacích motorů
a kolejových vozidel



**Návrh a analýza deformačního prvku sendvičové konstrukce
pro vůz Formula Student**

Diplomová práce

Autor:

Bc. Petr Záruba

Vedoucí práce:

Ing. Michal Vašíček, Ph.D.

Studijní obor:

Dopravní, letadlová a transportní technika

Praha 2016

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Záruba** Jméno: **Petr** Osobní číslo: **397283**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel**
Studijní program: **Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Dopravní, letadlová a transportní technika**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Návrh a analýza kompozitového deformačního prvku sendvičové konstrukce pro vůz Formula Student

Název diplomové práce anglicky:

Design and Analysis of a Sandwich Composite Impact Attenuator for a Formula Student Car

Pokyny pro vypracování:

- 1) Vypracujte rešerši na téma sendvičových kompozitních absorbérů nárazu
- 2) Navrhněte konstrukci absorbérů nárazu pro vůz kategorie Formula Student v podobě sendviče
- 3) Simulačně a fyzicky konstrukci ověřte

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Michal Vašíček Ph.D., ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel FS

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

,

Datum zadání diplomové práce: **24.10.2016**

Termín odevzdání diplomové práce: **06.01.2017**

Platnost zadání diplomové práce: _____

Podpis vedoucí(ho) práce

Podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

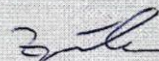
Podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

7.11.2016

Datum převzetí zadání



Podpis studenta

Prohlášení o autorství

Prohlašuji, že jsem svoji diplomovou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady uvedené v seznamu použité literatury.

V Praze dne 5.1.2017



Podpis

Poděkování

Rád bych úvodem poděkoval mému vedoucímu práce panu Ing. Michalu Vašíčkovi, Ph.D., za cenné rady při návrhu deformačního prvku a za přivedení soutěže Formula Student do České republiky. Dále bych chtěl poděkovat Ústavu letadlové techniky, zejména panu Ing. Tomáši Čenskému, Ph.D. za realizaci pádové zkoušky a panu Ing. Karlu Doubravovi, Ph.D. za pomoc při kvazi-statických zkouškách. Děkuji také Ing. Viktoru Kulíškovi za uvedení do problematiky chování kompozitů při nárazových zkouškách.

Poděkování patří i členům týmu eForce FEE Prague Formula, za pomocnou ruku při výrobě experimentu. Závěrem chci poděkovat Ing. Michalu Řadovi, který mi poskytl výchozí simulační model z jeho diplomové práce.

Anotační záznam

Jméno autora:	Petr
Příjmení autora:	Záruba
Název práce česky:	Návrh a analýza deformačního prvku sendvičové konstrukce pro vůz Formula Student
Název práce anglicky:	Design and Analysis of a Sandwich Composite Impact Attenuator for a Formula Student Car
Rozsah práce:	stránky: 109 obrázky: 73 tabulky: 10 grafy: 29 přílohy: 6
Akademický rok:	2016/2017
Jazyk práce:	CZ
Ústav:	12 120 – Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel
Studijní program:	Magisterský – Dopravní, letadlová a transportní technika
Vedoucí diplomové práce:	Ing. Michal Vašíček, Ph.D.
Anotace:	Práce se zabývá problematikou kompozitních deformačních prvků sendvičové konstrukce vozů Formula Student.
Klíčová slova:	deformační prvek, kompozitní technologie, uhlíkové vlákno, sendvičová konstrukce, Formula Student
Využití:	Tato práce lze využít jako podklad pro návrh a testování deformačních prvků vozů Formula Student.

Abstrakt

Tato práce popisuje ucelenou problematiku návrhu deformačních prvků používaných ve vozech Formula Student. Hlavním cílem autora je navrhnout kompozitní deformační prvek, který vyhoví kritériím soutěže Formula Student a zvýší technickou úroveň konstrukce vozu.

Teoretická část se zabývá rešerší používaných konstrukcí v soutěži a je diskutováno o problematice kompozitních struktur jakožto absorpčního materiálu pro nárazové děje. Práce se zaměřuje především na vláknové kompozity z uhlíkových tkanin. Dále jsou popsány poruchy kompozitní struktury, představeny jsou možnosti návrhu pomocí analytických výpočtů a virtuálních modelů metody konečných prvků (MKP). Závěrem teoretické části je uvedení druhů fyzických zkoušek experimentů.

Experimentální část práce pojednává o návrhu a realizaci fyzických zkoušek deformačních prvků pro dvě generace vozů týmu eForce FEE Prague Formula. Každý z nich je založen na jiné bázi kompozitní konstrukce a v práci jsou diskutovány výhody a nevýhody použitých řešení. Při návrhu konstrukce je využito reverzního inženýrství k identifikaci vlastností a nalezení průniku reálné zkoušky s virtuálním modelem MKP vytvořeným v programu PAM-CRASH.

Abstract

This diploma thesis describes the whole issue of the design impact attenuators used in Formula Student cars. The main aim of the author is to propose a composite impact attenuator, which meets the criteria of Formula Student Competition, and will increase the technical level of car.

The theoretical part describes solutions of attenuators commonly used in competitions and will discuss about carbon fiber material as a absorbent material for crashworthiness. The following part describes the possibility of failure modes in the structures and shows analytical solutions, compare to Finite Element Method (FEM). Next chapter describes method of physical testing.

Experimental part designs four evolutions of carbon fiber impact attenuator for cars of team eForce FEE Prague Formula. Each attenuator is based on a different composite structure. During designing attenuators was use reverse engineering to identify material properties and correlate them with FEM using PAM-CRASH software.

Obsah

1	ÚVOD.....	10
2	FORMULA STUDENT.....	11
2.1	HISTORIE	12
2.2	DISCIPLÍNY	12
2.3	MONOPOSTY TÝMU EFORCE FEE PRAGUE FORMULA.....	13
2.4	PRÁVIDLA DEFORMAČNÍHO PRVKU.....	14
3	POUŽÍVANÉ DEFORMAČNÍ PRVKY.....	14
3.1	STANDARDNÍ SAE®	14
3.2	PĚNOVÉ	15
3.3	VOŠTINOVÉ.....	16
3.4	PLECHOVÉ	18
3.5	KOMPOZITNÍ	19
3.5.1	<i>Kompozitní profily.....</i>	<i>19</i>
3.5.2	<i>Integrovaný deformační nos.....</i>	<i>21</i>
3.5.3	<i>Sendvičové</i>	<i>22</i>
3.6	POUŽÍVANÝ TYP TÝMEM EFORCE FEE PRAGUE FORMULA	23
3.7	ZÁVĚR	24
4	KOMPOZITY.....	25
4.1	ROZDĚLENÍ.....	25
4.2	VLÁKNOVÉ VÝZTUŽE	26
4.2.1	<i>Typy výztuží.....</i>	<i>26</i>
4.2.2	<i>Vazby.....</i>	<i>27</i>
4.3	TECHNOLOGIE VÝROBY.....	27
4.4	UHLÍKOVÉ VLÁKNO.....	29
4.5	SENDVIČOVÉ KONSTRUKCE	30
4.6	DRUHY PORUCH VLÁKNOVÝCH KOMPOZITŮ	31
4.7	PORUCHY SENDVIČOVÝCH STRUKTUR	33
4.8	PORUCHY POD DYNAMICKÝM ZATÍŽENÍM	36
5	ZÁKLADNÍ NÁVRHOVÉ PRINCIPY	39
5.1	ANALYTICKÉ METODY.....	39
5.2	NUMERICKÉ SIMULACE	40
5.2.1	<i>Software.....</i>	<i>41</i>
6	ZKOUŠKY	42
6.1	PÁDOVÁ ZKOUŠKA.....	43

7	DEFORMAČNÍ PRVEK VOZU FSE.03	45
7.1	NÁVRH	45
7.1.1	<i>Kvazi-statické zkoušky</i>	46
7.1.2	<i>Návrhové výpočty</i>	49
7.2	DYNAMICKÁ ZKOUŠKA	50
7.3	ZÁVĚR	51
8	DEFORMAČNÍ PRVEK FSE.04X	52
8.1	NÁVRH	53
8.1.1	<i>Kvazi-statická zkouška</i>	54
8.1.2	<i>Skladba</i>	55
8.2	PÁDOVÁ ZKOUŠKA	57
8.2.1	<i>Vzorek VZ2</i>	57
8.2.2	<i>Vzorek VZ3</i>	58
8.2.3	<i>Vzorek VZ4</i>	59
8.3	VYHODNOCENÍ	59
8.3.1	<i>Kvazi-statika vs. dynamika</i>	61
8.4	NUMERICKÝ MODEL	61
8.4.1	<i>Přístup modelování</i>	62
8.4.2	<i>Materiálové modely</i>	62
8.4.3	<i>Kalibrace materiálových modelů</i>	63
8.4.4	<i>Tvorba dynamické simulace</i>	76
8.4.5	<i>Výsledky dynamické simulace</i>	80
8.4.6	<i>Závěr</i>	89
9	ZÁVĚR	90
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	93
	SEZNAM POUŽITÝCH JEDNOTEK	94
	SEZNAM PŘÍLOH	95

1 Úvod

Tato diplomová práce vznikla díky inženýrské soutěži **Formula Student** (FS), která má za cíl navrhnout, postavit a otestovat závodní monopost formulového typu týmem studentů vysokých škol. Na ČVUT má tato soutěž kořeny v roce 2007, kdy vznikl první monopost se spalovacím motorem. Tři roky poté se pod hlavičkou jednoho týmu CTU Cartech přidal monopost s elektrickým pohonem na bázi vozu se spalovacím motorem FS.02. Později se vývoj elektrické formule oddělil a vznikl nový tým **eForce FEE Prague Formula** jehož monopostům je věnována diplomová práce. Úroveň monopostů i soutěže exponenciálně roste a to je největší motivací pro návrh a vývoj nových konstrukcí. V soutěži FS nemusí vždy vyhrát ten nejrychlejší, jde i o technickou vyspělost a znalosti týmu. Právě v této oblasti je velkým přínosem vývoj kompozitního deformačního prvku se sendvičovou konstrukcí, který používá jen opravdu několik nejlepších týmů.

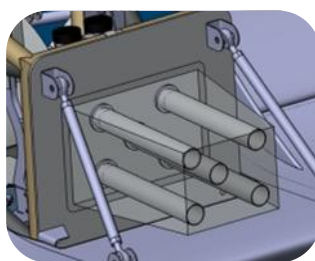
Deformační prvek je již nedílnou součástí každého sériového automobilu. Pod tímto názvem si lze představit konstrukční prvek absorbující většinu kinetické energie při čelním nárazu vozu. Při závodech se nehody stávají, a proto předpisy ukládají nejrůznější druhy ochrany. Motorsport byl vždy disciplínou, kde jde především o rychlost a souboj s časem. Proto je potřeba vytvářet nové lepší typy konstrukcí vedoucí ke zlepšení výkonu automobilu. To je motivací pro vývoj inovativních druhů ochrany a pro použití jiných materiálů v pasivní bezpečnosti vozů. V posledních desetiletích se vývoj začal směřovat ke kompozitním strukturám, které se ukázaly jako velmi výhodné z hlediska absorpce energie. Dnes při okruhových závodech prakticky nenaleznete jiný deformační člen než kompozitní. Jeho předností je schopnost pohlcení velké energie nárazu při velmi nízké hustotě materiálu. Tyto vlastnosti jsou, ale vykoupeny náročností výroby, výpočetní složitostí a náchylností k mimo osým nárazům.

Cílem této práce je prohloubení znalostí ohledně deformačních členů a nárazových zkoušek. Jako praktická část je brán vývoj deformačního prvku pro dvě generace elektro formule. Tyto dva deformační prvky byly reálně ozkoušeny a jejich výhody, či nevýhody jsou shrnuty v závěru. Vývoj deformačního prvku je z velké části založen na reálných testech, které se často iterovaly k úspěšnému výsledku. Následně bylo využito metody reverzního inženýrství k připravení podkladů pro další generaci vývoje deformačního členu. Na grafice níže je vidět postup řešení práce.



Rešerše

- problematika
- stávající řešení



FSE.03

- návrh
- testování
- vyhodnocení



FSE.04x

- návrh
- testování
- vyhodnocení
- reverzní inženýrství

2 Formula Student

Bezpochyby největším a nejrozšířenějším projektem studentské činnosti v oblasti technického inženýrství je soutěž Formula Student. FS má za cíl vychovat a zdokonalit dovednosti studentů v technickém směru. Je to činnost, které studenti obětují svůj volný čas a zdokonalují sami sebe při stavbě závodního monopostu.

Když absolvent zakončí vysokoškolské vzdělání, nemá vždy lehkou cestu k uplatnění se na trhu. Každý zaměstnavatel požaduje adekvátní praxi a zaměstnavatelé často dají přednost pracovníku pouze se středoškolským vzděláním, který už ale má za sebou pár let zkušeností v oboru. Tato inženýrská soutěž by měla studenty připravit i v praktických zkušenostech. Například v Německu, kde je soutěž nejrozšířenější a odkud také pochází mnoho nejlepších týmů, si firmy uvědomují, jak cenné zkušenosti studenti získají. Proto mají obrovský zájem spolupracovat s týmy už v průběhu jejich studia. Často se tedy stává, že absolventi rovnou nastupují do firem podporujících projekt FS již v době studia.

O čem tedy soutěž je? Hlavní motivací projektu je stavba závodního monopostu a následné otestování na závodech. Aby byl zajištěn vývoj celé soutěže, jsou pravidla postavena tak, že týmy musí provést zásadní konstrukční změnu každý rok. Což v praxi znamená nový monopost. Pravidla soutěže přesně definují, jak mají vypadat jednotlivé konstrukční celky a udávají výchozí stavy zatížení na jednotlivé struktury.

Časový koncept evropské odnože soutěže probíhá současně se semestrální výukou. V období zimních semestrů se monopost navrhuje a v letním semestru probíhá výroba. V období letních prázdnin se po celé Evropě pořádají soutěže a mezi pořadateli je již také Česká republika.



Obr. 1 - Soutěž FS Czech 2016 [1]

2.1 Historie

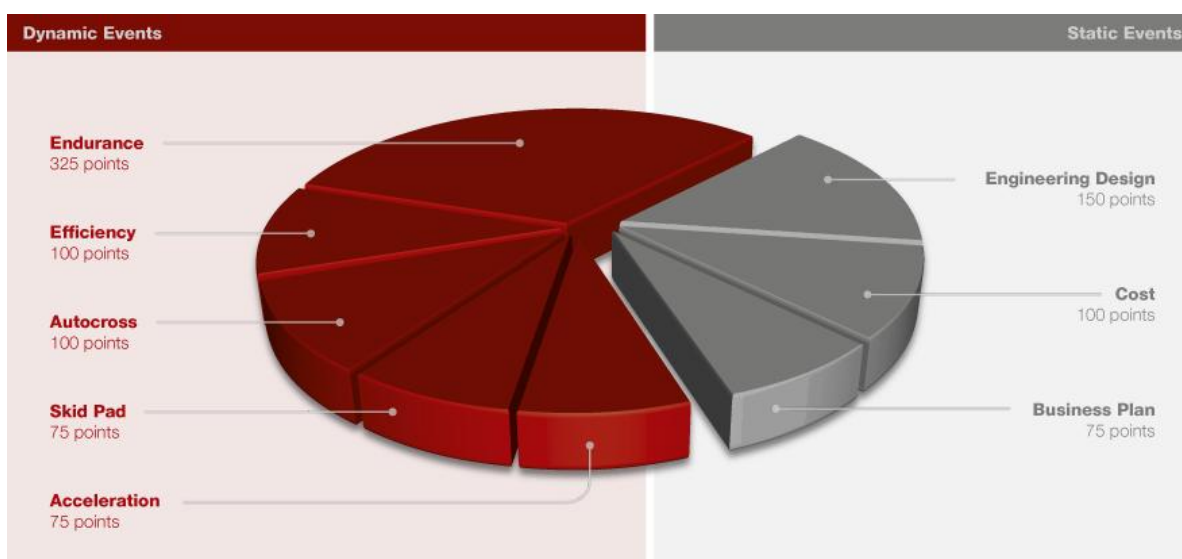
Vznik soutěže se traduje od roku 1981, kdy se v USA pod záštitou Society of Automotive Engineers (SAE) odjel první ročník. Do Evropy se tato myšlenka přenesla pod organizací IMECHE (Institution of Mechanical Engineers) a první soutěž se konala v roce 1998 v Anglii. [1]

V současnosti se jí každoročně účastní přes 600 univerzitních týmů z celého světa, ve třech kategoriích. Monopostů se spalovacím motorem, elektrickým pohonem a týmy, které mají dvouletý cyklus výroby monopostu a účastní se pouze statických disciplín bez reálného monopostu.

Monoposty s elektrickým pohonem začaly soutěžit od roku 2010 a na většině soutěží mají oddělené kategorie. Existují ale i závody, kde jezdí obě kategorie dohromady a je zajímavé sledovat postupný vzestup elektroformulí vzhůru výsledkovou listinou.

2.2 Disciplíny

Soutěž se skládá z takzvaných statických a dynamických disciplín. Disciplíny jsou bodově rozděleny s celkovým možným počtem získaných 1000 bodů. Ve statických disciplínách týmy představují monoposty světoznámým znalcům z oborů ekonomiky, automobilového průmyslu i z prestižních závodních stájí Formule 1.



Tab. 1 - Rozdělení bodů za disciplíny [1]

Statické

- **ENGINEERING DESIGN** - Zhodnocení technických aspektů, konstrukčních a klíčových vlastností vozidla
- **COST** - Finanční plánování celého vozidla včetně (sériové) výroby
- **BUSINESS PLAN** - Prezentace mající za úkol přesvědčit teoretického investora, aby investoval do projektu sériové výroby závodního vozidla

Dynamické

- **ACCELERATION** - Akcelerace na 75m ze zastaveného startu
- **SKID PAD** - Silně točitá trať připomínající osmičku má za úkol prověřit postranní akceleraci vozidla
- **AUTOCROSS** - Kvalifikace do hlavního závodu "Endurance", vozidlo s nejlepším časem na kolo má nejvyšší bodový přiděl
- **ENDURANCE & EFFICIENCY** - Vytrvalostní závod na 22 km s výměnou řidiče v půlce závodu. Efektivita vozidla je hodnocením množství spotřebované energie vůči celkovému času

2.3 Monoposty týmu eForce FEE Prague Formula

Elektro formule vznikající pod Fakultou elektrotechnickou začínala v roce 2010. První dvě generace vycházely z konceptu týmu CTU Cartech, do jejichž monopostů se implementovaly motory a akumulátor. Od roku 2014 po separaci týmů, má elektro formule svůj vlastní vývoj. Třetí generace vozu s označením FSE.03 disponovala dvěma synchronními elektromotory bez převodovky s prostorovým trubkovým rámem z chrom-molybdenové oceli. Vůz měl hmotnost 278kg. Vůz čtvrté generace FSE.04x znamenal značný upgrade pohonného ústrojí a přechod na pohon 4x4 se čtyřmi motory. Přední byly umístěny v kolech s planetovou převodovkou a zadní v prostorovém rámu s převodovkou s čelním ozubením. Jeho hmotnost byla 200kg, především díky redukci hmotnosti na baterkách. Na těchto vozech byl deformační prvek vyvinutý touto prací.



Obr. 2 - Monopost FSE.04x – první vůz se sendvičovým deformačním prvkem [1]

Technické parametry vozu FSE.04x	
Rozvor	1540 mm
Rozchod (vpředu / vzadu)	1286 / 1200 mm
Rozložení hmotnosti	50 : 50 %
Motor	Vpředu PMSM (2x6kW) Vzadu PMSM (2x25kW)
Zrychlení 0-100 km/h	3.7 s
Maximální výkon	58kW při 5220 ot/min
Maximální točivý moment	702Nm do 50 km/hod
Baterie	Li-Ion 96s8p, celková energie 7,1 kWh, jmenovité napětí 345 V
Hmotnost vozu	200 kg

2.4 Pravidla deformačního prvku

Pravidla soutěže FS velmi podrobně popisují konstrukční zásady pro stavbu monopostu. Jsou v nich specifikovány přesné zátěžné stavy, které musí struktura splnit. Deformační prvek je v nich specifikován jako: „Zařízení pohlcující deformační energii, umístěné před přední částí rámu.“ [2] Další ustanovení T3.20 pravidel předepisuje minimální rozměr 100x200x200mm, musí být pevně uchycen k nosné struktuře minimem 4 šroubů M8, pevnosti 8.8, toto uchycení musí přenést i mimo osé nárazy. Deformační prvek musí být připevněn na impaktní přepážce z hliníku tloušťky 4mm, či oceli tloušťky 1.5mm.

Deformační prvek musí splnit předpis T3.21.2, který ukládá, že vozidlo o celkové hmotnosti 300kg jedoucí rychlostí 7 m/s musí při nárazu do absolutně tuhé zdi zpomalit s průměrným zpomalením 20g, přičemž špička zrychlení nepřeroste 40g. Při tomto nárazu musí být deformační člen schopen pohltit minimálně 7350J energie.

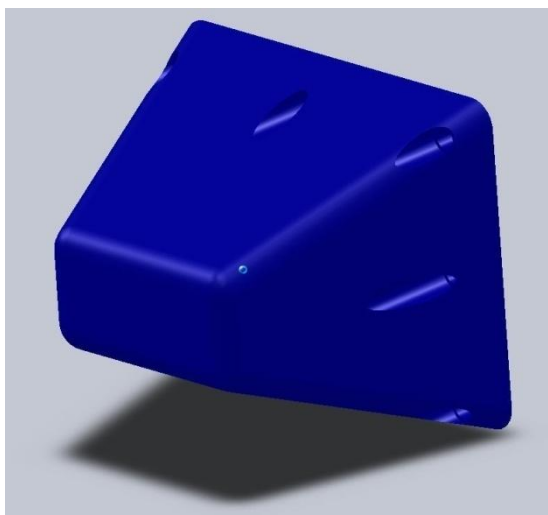
Pokud týmy používají přední křídlo, musí se celek křídla s uchycením podrobit testům a to dvěma způsoby. Fyzickým testem, nebo kombinací fyzického testu deformačního členu a kalkulace stříhu šroubů uchycení předního křídla. Přičemž kombinace špičkové síly při porušení uchycení a špička při nárazu deformačního prvku nesmí přesáhnout 120kN, neboli 40g.

Týmům není dovoleno testovat deformační člen bez odborného dohledu z hlediska bezpečnosti. Týmy musí doložit zprávu o testu provedeném specializovaným testovacím střediskem.

3 Používané deformační prvky

3.1 Standardní SAE®

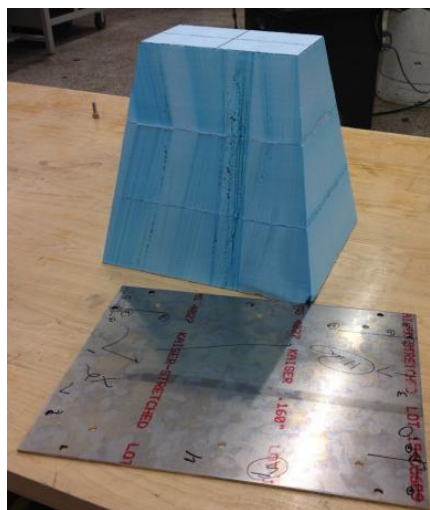
Nejrozšířenějším typem je standardní deformační prvek. Lze ho zakoupit od pořadatelské organizace. Především nově vzniklé týmy využívají tento typ. Pokud tento schválený typ zakoupí, nemusí jej dále podrobovat fyzickým testům. Jeho hmotnost je však 2.2kg, proto si pokročilé týmy navrhují vlastní typy. Deformační prvek je z pěny s označením Dow Impaxx® 700 Energy Absorbing Foam. Jedná se o strukturální pěnu podobnou polyuretanům, či extrudovaným polypropylenům. Jeho hustota je 45 kg/m³.



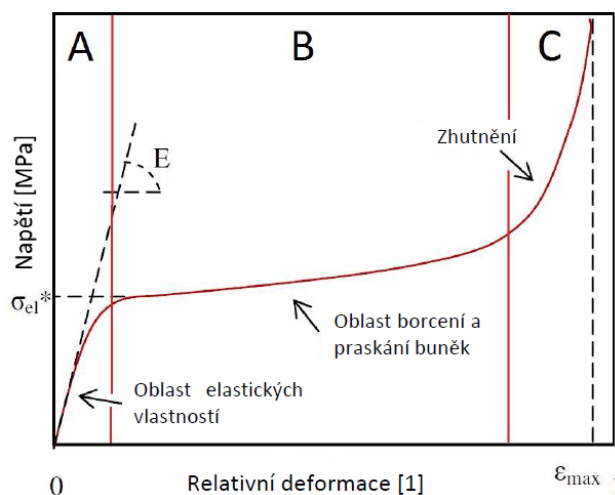
Obr. 3 - Standardní deformační prvek [1]

3.2 Pěnové

Pěnové absorbery jsou jednoduché pro návrh i výrobu a mají optimální vlastnosti při nárazu. Využívá se především polyuretanových pěn jako je Divinycell, či Rohacell a jím obdobným. Hustoty těchto pěn se liší, nejrozšířenější jsou však od 60 kg/m^3 po 100 kg/m^3 .



Obr. 4 - Pěnový deformační člen a impaktní přepážka [3]



Obr. 5 - Typická charakteristika deformace pěny [4]

Pohlcení energie je založeno na unikátních kompresních vlastnostech pěny. Typická deformační charakteristika je zobrazena na obrázku Obr.5.

Úvodní část A je oblast elastických vlastností pěny, kdy síla v závislosti na posunutí lineárně narůstá. Zde se materiál chová v podstatě jako lineární pružina. [4]

Část B je část střední nárazové síly viz Kapitola 5. V této části je pohlceno největší množství energie. Principem je mechanismus zborcení uzavřených buněk, které jsou základními elementy pěny. V každé z nich je uzavřen vzduch a vlivem stlačování materiálu dochází k jeho kompresi. Jakmile tlak v buňkách překročí mezní hodnotu, dojde k jejich prasknutí.

Část C nastává v okamžiku, kdy jsou ideální deformační vlastnosti pěny vyčerpány a stěny buněk dosednou na sebe. Dochází k tzv. zhutnění.

Jakmile je veškerá kinetická energie spotřebována, dochází vlivem akumulované energie v elastické deformaci z oblasti A ke zpětnému pohybu impaktoru.

Kromě pěn polyuretanových týmy využívají hliníkové pěny. Jedná se o strukturovaný hliník vylehčený vzduchovými dutinami. Výsledný povrch tvoří porézní s buňkami. Materiál má vlastnosti kovu, ale s nižší hustotou. Princip absorpce energie funguje stejně jako u pěn polyuretanových. Jejich relativní hustota je 8-12% k hustotě monolitního materiálu.

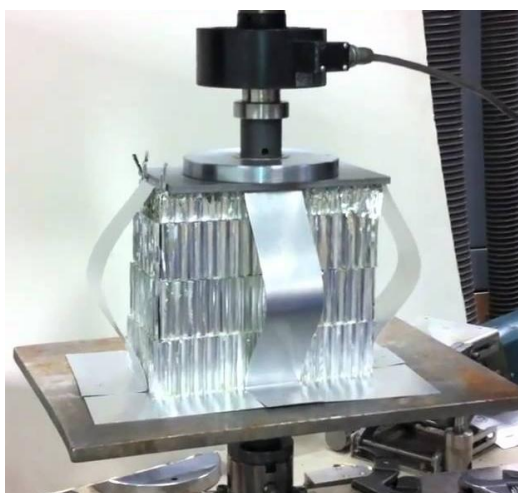


Obr. 6 - Hliníková pěna [3]

3.3 Voštinové

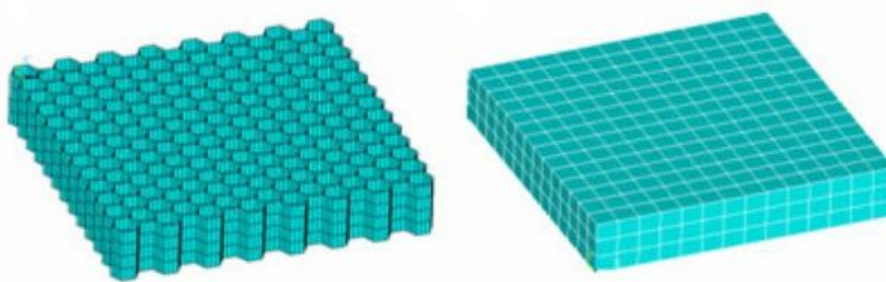
Dalším velmi rozšířeným typem jsou voštinové deformační prvky. Z pravidla se používají dva typy materiálu a to voštiny hliníkové, nebo nomexové (aramidové). Jejich hlavní předností je lehká konstrukce. Hustota, díky otevřeným buňkám se pohybuje od 20 kg/m^3 do 160 kg/m^3 .

Deformace voštiny probíhá na základě hroucení jednotlivých buněk. Jejich deformace díky tenkostěnné konstrukci a vzpěrové tuhosti velmi rychle nabude plastické deformace, konstantně se šířící materiálem. Díky tomuto jevu je tedy možné velmi jednoduše navrhnout potřebnou deformační energii. Stačí pouze zjistit sílu, při kterém dochází ke kolapsu buněk. Toto lze provést pouhou tlakovou zkouškou a analyticky dopočítat potřebnou energii.



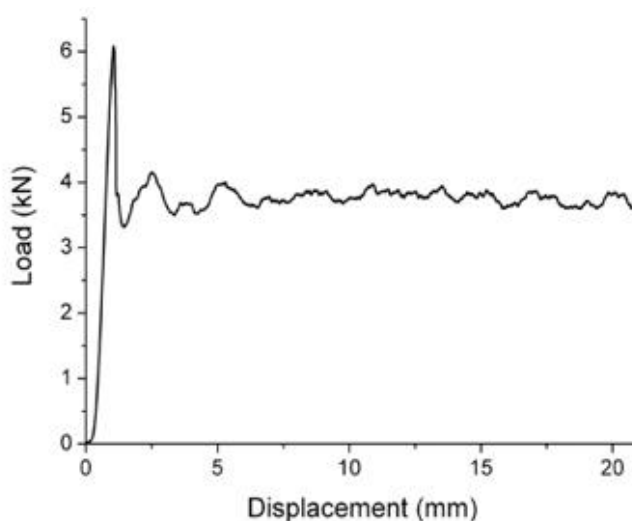
Obr. 7 - Kaskádovitá hliníková voština [3]

Voštiny lze dimenzovat i numericky pomocí MKP softwarů, kde se využívá přístupu přesnějšího modelováním jednotlivých buněk, nebo přístupu objemovému, kde se buňky nahrazují objemovými prvky typu tetrahedron apod. Obr. 8.



Obr. 8 - Rozdílné přístupy simulace v MKP softwaru [5]

Tato struktura lze navrhnout buďto jako monoblok, nebo se využívá kaskádové konstrukce. U pyramidových typů je nutné mít mezi jednotlivými vrstvami desky zamezující zařízení buněk do sebe, a které distribuují tlakovou sílu.



Graf. 1 - Typická deformační charakteristika hliníkové voštiny [3]

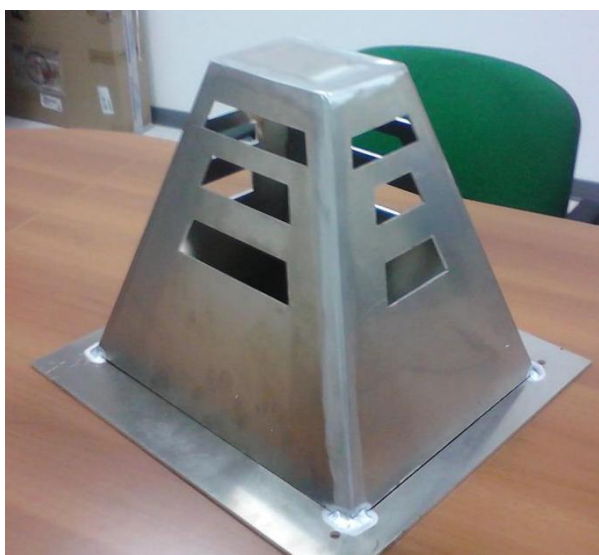
Vhodné absorpční schopnosti voštiny v poměru s její nízkou hustotou se jako deformační prvky osvědčily i ve vrcholových formách motorsportu. Kde díky náročným požadavkům je třeba pohltit velké množství energie. Proto se voštiny velmi často objevují v kombinaci s kompozitem, který díky synergickému efektu, zlepšuje absorpční schopnosti. Na Obr. 9 je řez zadním deformačním prvkem Formule 1 staršího typu.



Obr. 9 - Kombinovaný deformační prvek Formule 1 [3]

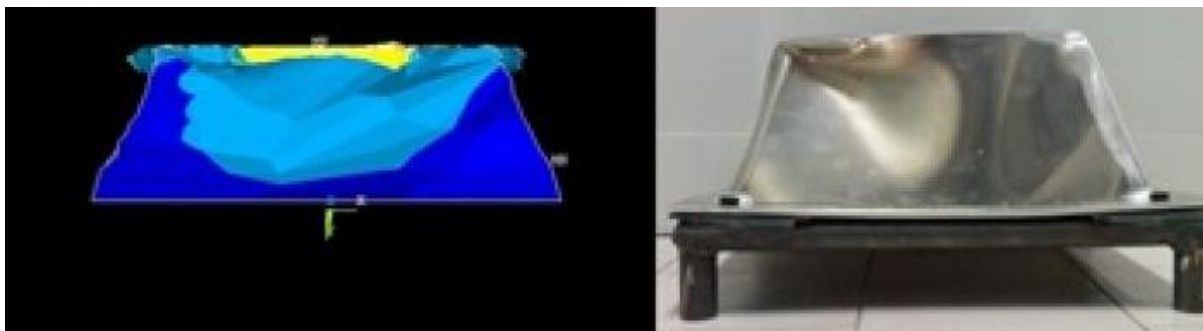
3.4 Plechové

Jsou nejrozšířenějšími v sériovém automobilovém průmyslu. Jejich výroba je pro série velmi jednoduchá a prvek lze jednoduše připojit k nosné struktuře automobilu. Existuje mnoho různých typů využívajících odlišné deformační módy. Lisování, zborcení, stříh materiálem. Nejrozšířenějším jsou však typy, kde je pomocí geometrie oslabena struktura a na deformačním prvku tak vzniknou iniciátory plastické deformace. Jako materiál se běžně využívá ocel, nebo hliník.



Obr. 10 - Plechový deformační člen s iniciátory [3]

V soutěži FS nejsou příliš rozšířeny a využívají je především týmy s nižšími rozpočty z asijského kontinentu. Týmy využívají iniciačních prvků a pro výpočet lze použít jednoduché řešení MKP, kde jsou velmi dobře známy materiálové charakteristiky a tak reálný test dobře koreluje se simulací. Deformační prvek není náchylný na mimo osé nárazy v rámci několika desítek stupňů. Jejich nevýhodou je však nízká hodnota absorpce energie, tzv. SEA viz Kapitola 4.4, která se pohybuje kolem 30 kJ/Kg a vysoká hustota 2700 kg/m³. Nízká hodnota absorpce energie způsobí i rozměrové nevýhody prvku.



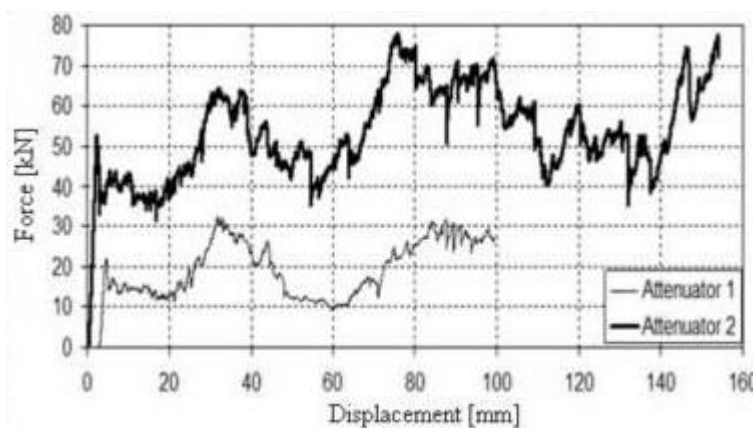
Obr. 11 – Simulace a reálná zkouška [3]

3.5 Kompozitní

Jak již bylo zmíněno, kompozitní struktura vychází z konstrukčních materiálů nejméně výhodněji z hlediska hodnoty specifické absorpce energie SEA. Její hodnota dosahuje až 102 kJ/kg. Což je o 70% více než u hliníku. V kombinaci s hustotou kolem 1500 kg/m³ je absolutně nejméně výhodným materiálem pro použití v motosportu z hlediska hmotnosti a pohlcené energie impaktoru.

Složitější je však vyvolání vhodného módu porušení struktury, o kterém pojednává kapitola 4.6. Velmi záleží na tvaru, kuželovitosti a samotné konstrukci. Protože kompozit je z hlediska opakovatelnosti výroby velmi nehomogenní je náročné vyrobit funkční deformační člen. Je to podmíněno několika cykly zkoušek a u některých experimentů se velmi snadno stane, že požadavky nesplní.

U předchozích typů deformačních prvků díky mnohaletému vývoji bylo prokázáno, že pro daný materiál jsou výhodné právě tyto tvary a koncepce se mnoho neliší. U kompozitních prvků konstrukce není uniformní. Tudíž ani nelze charakterizovat typickou křivku deformace. Některé struktury, jako například kompozitní trubky vykazují podobné vlastnosti jako deformace voštiny v Graf. 1 - Typická deformační charakteristika hliníkové voštiny. Jiné tvary deformačních prvků vykazují v jejich charakteristikách značné propady síly, při jiných módech poruchy.



Obr. 12 - Příklad průběhu deformační křivky uhlíkového crashboxu [6]

3.5.1 Kompozitní profily

Trubky

Jednou z používaných konstrukcí jsou rovnostěnné profily různých průřezů. Například tým z TU v Mnichově využívá k absorpci energie několik kompozitních trubek. Návrh takové konstrukce není příliš složitý, jelikož při správném osovém zatížení trubka vykazuje konstantní hodnoty deformace a i z tlakové zkoušky lze přibližně definovat, jakou energii trubka pohltí při dynamickém ději. Takováto skladba lze navrhnout i analyticky. Tým vytvořil určitou skladbu trubek, kterou zakryl uhlíkovým boxem o požadovaných rozměrech z důvodu pravidel FS o uzavřeném profilu přední části deformačního prvku.

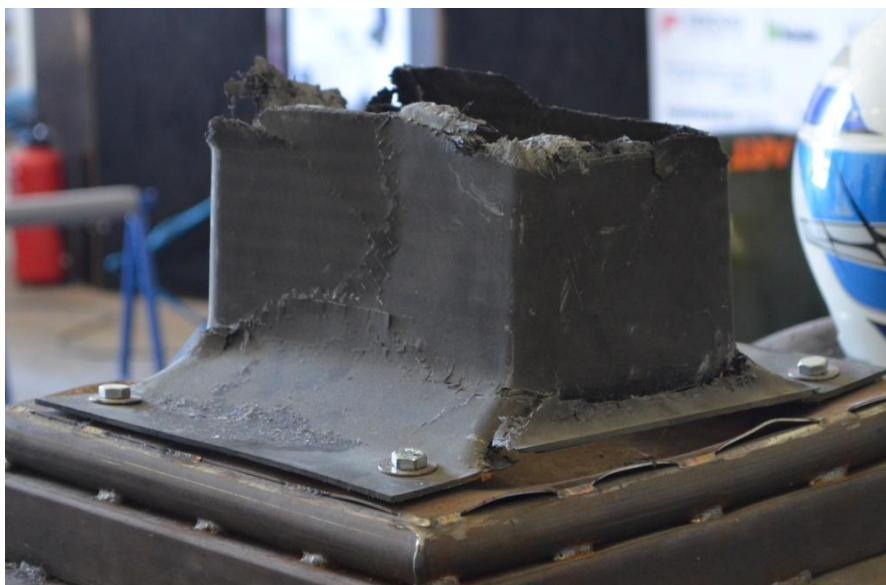
Nevýhodou této konstrukce je lokální zatížení impaktní přepážky. Při velké nárazové síle se tedy může stát, že přepážka nesplní dovolenou deformaci 25mm.



Obr. 13 - Trubkový deformační člen [3]

Crash box

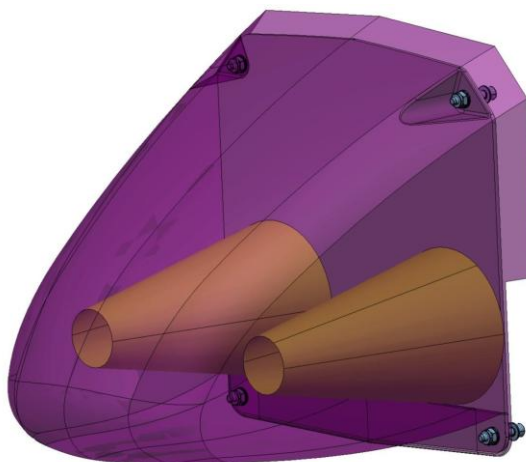
Další řešení vyvinul tým z polytechniky Torino. Průřez deformačního prvku byl obdélníkový o minimálních rozměrech 200x100mm. U tohoto průřezu je problém stability delší stěny. Jednoznačně nelze predikovat zda-li se stěna neprolomí dovnitř. Poté může nastat lom v místech o malém rádiu a hrozí zásadní dysfunkce absorbéru. Posledním objeveným problémem byla iniciace porušení, která při tomto návrhu nelze předem predikovat. Návrh takového řešení si žádá pokročilé metody MKP softwaru. Tým splnil požadovaná pravidla díky filtraci dat a velké tloušťce stěn (2mm), což znamenalo vyšší hmotnost, než při použití pěny, či voštiny.



Obr. 14 - Deformační prvek týmu Sapiensa corse

Kužely

Doposud nejstabilnějším řešením je deformační prvek vyvinutý týmem CTU Cartech. Jejich návrh obsahuje dva absorpční kužely zakryty kapotáží monopostu. Geometrie kuželu je pro deformační prvek velmi výhodná. Předem lze určit místo iniciace porušení materiálu, místo s nejmenším průřezem a kuželovitost navíc dodává prvku stabilitu. Problémem při návrhu byla optimalizace skladby a zachycení správného módu porušení. Charakteristická křivka kuželovitého absorbéru má počáteční špičku následovanou mírným propadem síly a opětovným narůstáním síly téměř lineárně z důvodu zvětšujícího se průřezu. Toto řešení je velmi výhodné z hlediska hmotnosti a funkčnosti. Týmu se navíc podařilo ušetřit hmotnost na zakrytí deformačního prvku a to tím, že jeho kryt integrovala do nosu karoserie. Jako deformační člen je tedy považován celý předek formule.



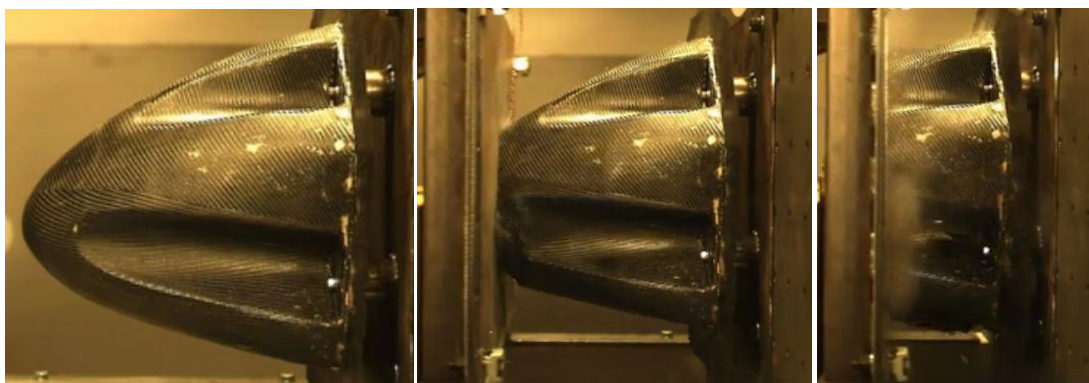
Obr. 15 - 3D geometrie deformačních kuželů CTU Cartech [4]

3.5.2 Integrovaný deformační nos

Týmy používající nosnou strukturu z uhlíkové skořepiny (monocoque) nejčastěji využívají přední část karoserie, zvaný nos monopostu, jako integrovaný deformační člen. Obdobnou strukturu lze najít ve vrcholovém motosportu Formule 1 a i v nižších soutěžích. Tento deformační člen má opravdu velmi málo týmů na světě a jedná se o zcela nejsložitější strukturu z hlediska návrhu. Analytický výpočet je zcela vyloučen z důvodů aerodynamických tvarů a designové koncepce. Jeden přístup návrhu tedy spočívá ve vytvoření velmi složitého MKP modelu, který i přes detailní modelování ne vždy koreluje s reálným testem.

Z těchto důvodů se používají především reálné testy, vedoucí k ověření chování absorbéru, módu poruchy a odhalí slabá místa. Na základě těchto výsledků se upravuje skladba a konstrukce. Tento typ absorbéru téměř nikdy nevykazuje známky konstantního šíření deformace díky složitým tvarům. Zejména je důležité vhodně navrhnout tvar konstrukce a vyhnout se malým rámusům způsobujícím koncentraci smykové napětí.

Tým z anglického Oxfordu integroval do skořepiny nosu čtyři čtvrtkruhy pohlcující hlavní energii. Návrh tohoto řešení byl proveden na základě dat z deformace trubky. Skořepina mezi čtvrtkruhy slouží jako podpora těchto deformačních elementů a nepohlcuje velké množství energie. Tento návrh byl úspěšně otestován a plně vyhověl pravidlům. Toto řešení však zcela nezapadá do designového konceptu monopostu.



Obr. 16 - Sekvence deformace deformačního prvku týmu OBR [3]

Jiný přístup zvolil tým ze švýcarského Zurichu. Ten upřednostnil konstrukci výhodnou z aerodynamického a designového hlediska. Velká série celkem pěti variant s různou skladbou laminátu vedla až k finální podobě pro sezónu 2015.



Obr. 17 - Deformační nos AMZ Zurich před a po testu [3]

3.5.3 Sendvičové

Použití sendvičové struktury má jednoznačné přednosti. Cíl použití této konstrukce je zvýšení ohybové tuhosti materiálu. Ohybová tuhost se řídí dle tloušťky průřezu, tudíž přidáním lehkého pěnového jádra s mnohem nižšími mechanickými vlastnostmi než mají laminy, docílíme v určitých mezích navýšení tuhosti viz kapitola 4.5. Tento koncept se využívá především pro deformační prvky s velkou deformační délkou. Pro náraz to znamená zvýšení stability a kontrolovaný mód porušení. V soutěži FS se tato konstrukce příliš nevyužívá z důvodu komplikovanějšího návrhového výpočtu a následně pracnosti při výrobě.

Ty nejlepší týmy si vývoj těchto pokročilých konstrukcí sježí a na internetu není mnoho zmínek využití této konstrukce v FS. Autor se setkal pouze s jedním týmem z německé univerzity v Erlangenu, který využil sendvičové struktury pro deformační nos formule. Dle záznamů na webu takovýto typ konstrukce používá tým z italské polytechniky v Torině se strukturou v podobě kuželu s oválnou průřezovou charakteristikou.

V ostatních formách motosportu jako je Formule 1, se tyto konstrukce běžně využívají z důvodů nižší hmotnosti při dobrých deformačních vlastnostech. V těchto aplikacích se jako jádro nejběžněji používá hliníkový honeycomb z důvodu nižší hmotnosti, než má polyuretanová pěna. Na Obr. 18 je vidět řez Formulí 1 týmu Sauber, kde lze pozorovat sendvičovou strukturu po celé délce nosu formule.



Obr. 18 - Řez vozem Sauber F1

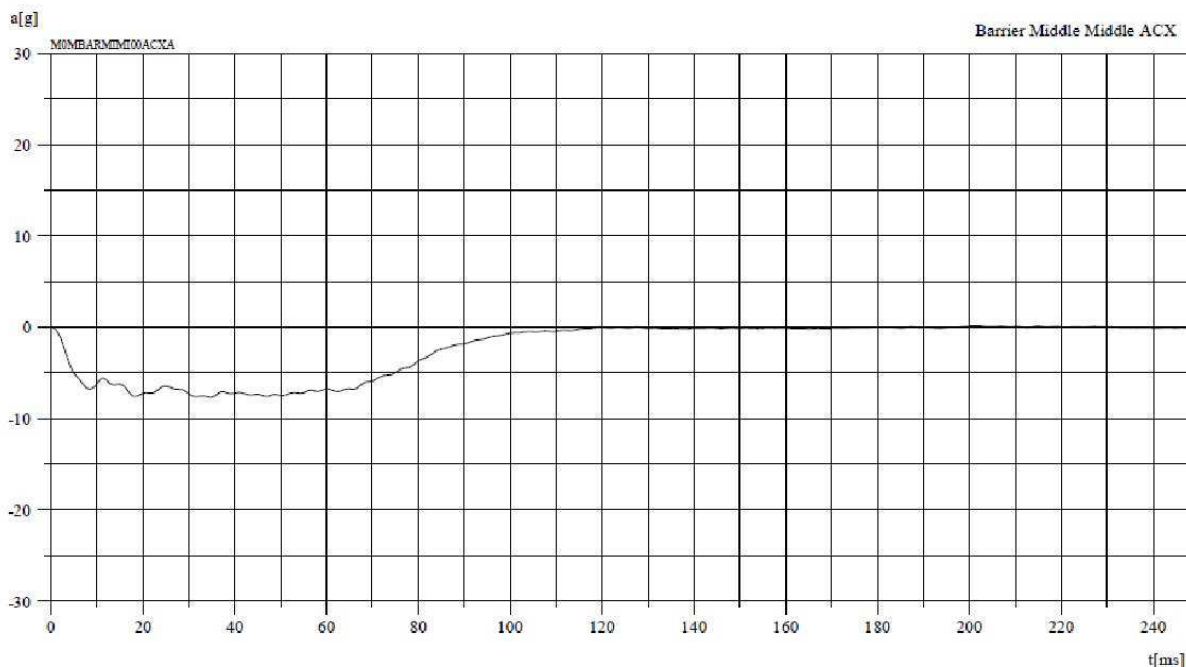
3.6 Používaný typ týmem eForce FEE Prague Formula

Tým na svých vozech FSE.01 a FSE.02 převzal konstrukci deformačního členu od spalovacího týmu. Ti používali spolehlivé řešení absorpční pěny Divinycell H60. Tato polyuretanová pěna byla dimenzována dle kvazi-statické tlakové zkoušky provedené Ústavem mechaniky ČVUT. Ze zkoušky byla vypočtena deformační energie a dle této hodnoty, byly upraveny rozměry. Ze zkoušky bylo patrné, že pěna nepřekročí mezní silové podmínky dané pravidly. Výsledný deformační člen měl rozměry menší než standardní deformační prvek a jeho hmotnost byla 550g.



Obr. 19 - Monopost FSE.02 s pěnovým deformačním prvkem

Výsledky dynamické zkoušky byly velmi uspokojivé. Pohlcená energie absorbérem byla 7416 J, což splnilo předepsané minimum 7350J. Tuto energii prvek pohltil na 140mm délky při průměrném zpomalení 5g a špičkovém zpomalení 9g. Ani jedna z hodnot nepřesáhla dovolené limity a deformační prvek splnil návrhové očekávání.



Graf. 2 - Průběh nárazové zkoušky vozu FSE.02

3.7 Závěr

V soutěži FS existují různá řešení deformačních prvků. Používaný pěnový prvek na voze FSE.02 velmi dobře splňuje požadavky na absorpci energie i nároky na zpomalení. Jeho technická vyspělost, která se hodnotí v disciplíně design, nedosahuje takové úrovně jako prvek kompozitní a také hmotnost 550g lze u jiných typů také snížit. Po rešerši se tedy nabízí několik možností, jak prvek inovovat. Hliníková voština by byla zcela nejjednodušší náhradou z hlediska návrhu, funkčnosti i výroby. Tento koncept však nemá takové hodnocení jako struktury kompozitní a pouze kompozit může snížit hmotnost. Navíc tým eForce FEE Prague Formula směřuje ke změně nosné struktury, kde by bylo vhodné integrovat deformační prvek do nosu formule.

Zpočátku je tedy nutné získat znalosti o chování kompozitu při dynamických zkouškách. Proto bylo rozhodnuto o použití kompozitních trubek na vůz FSE.03. Ty lze dimenzovat analyticky z kvazi-statických zkoušek a ve spolupráci s firmou CompoTech je možné trubky jednoduše získat. Navíc k těmto trubkám byly dobře dostupné vlastnosti z dynamických zkoušek.

Na základě znalosti absorpce energie v kompozitním materiálu byl další vývoj na voze FSE.04x směřován na do podoby sendvičové struktury, proto tento typ byla zvolena jednoduchá geometrie elipsoidního kuželu se sendvičovou strukturou. Tato konstrukce je velmi náročná a v disciplíně design kladně hodnocena.

4 Kompozity

Když se hovoří o kompozitním materiálu, rozumí se tím heterogenní materiál složený ze dvou, či více fází, přičemž obě fáze mají zcela odlišné fyzikální, chemické a mechanické vlastnosti. [7] Kompozitní materiál jako celek může převzít napětí, které by jeho slabší fázi porušilo. Od pevnější fáze kompozitu může převzít vyšší podíl její teoretické pevnosti, než kdyby byla fáze namáhána samostatně. [8, s. 21] Zjednodušeně řečeno, kompozit má ve výsledku mnohem lepší celkové vlastnosti, než kterých by se docílilo pouhou sumací vlastností jednotlivých fází. Znamená to tedy, že v kompozitech funguje tzv. **synergický efekt**. Nejběžnějším příkladem kompozitu je železobeton. Beton je sám o sobě málo houževnatý, ale v kombinaci s železem se vlastnosti celku mnohonásobně zlepšují. Dalším nejběžnějším kompozitem je skelný laminát a lze najít v konstrukci lodí, letadel, apod.

Základním stavebním materiálem pro kompozit jsou dvě fáze, či složky. Těmto složkám se říká **matrice** a **výztuž**. Matrice neboli pojivo, má většinou horší mechanické vlastnosti než výztuž a slouží k zachování tvaru výrobku. Výztuž se skládá ze základního nosného materiálu zachycující největší podíl namáhání.

Kompozity jsou materiálem nehomogenním, jejich vlastnosti nejsou v celém objemu stejné. Jsou to **materiály anizotropní**, mají nesterjnorodé chování v různých směrech napětí. Kvůli těmto vlastnostem se kompozity dají obtížněji dimenzovat. Anizotropní vlastnosti se však v mnohých aplikacích uplatňují jako výhoda. Nejvhodnějším druhem namáhání pro vláknové kompozity je tahové a naopak nejneprůznivější je smykové.

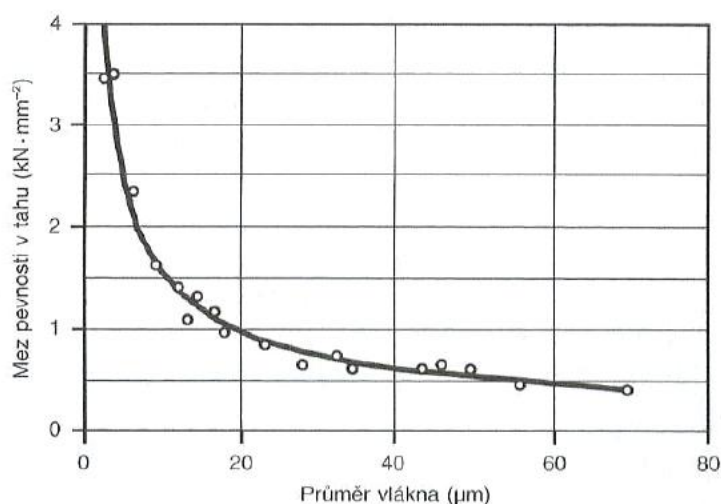
4.1 Rozdělení

Druhů kompozitů je celá řada, a proto jejich dělení není jednoduché. Dají se však určit hlavní kategorie dle:

- **materiálu výztuže** - skla (E; S), uhlík, polymery (aramidová vlákna - Kevlar, polyamidová vlákna – Nylon atd.)
- **materiálu matrice** – polymery, termoplasty (polyetylen, polystyren, polyamidy), reaktoplasty -termosety (epoxidové pryskyřice, fenolické pryskyřice), elastomery (polyuretan)
- **geometrického tvaru výztuže**
 - **Vláknové** - útvary výztuže (vlákna) jsou v jednom směru výrazně rozměrnější než v ostatních směrech
 - **Částicové** - jeden rozměr útvaru výztuže nesmí výrazně přesahovat ostatní a vyztužující částice mají tvar kulovitý, destičkovitý, tyčinkovitý případně nepravidelný
 - **Skeletové** - jsou tvořeny pórovitou maticí prostoupenou souvislými nosnými skelety

4.2 Vláknové výztuže

V práci budou použity vláknové výztuže uhlíkového kompozitu, proto se zaměříme především na ně. Výztuž je hlavním distributorem napětí v laminátu. Materiál ve formě vlákna má mnohonásobně vyšší pevnost než stejný materiál v kompaktní formě. Čím je vlákno tenčí, tím je jeho pevnost vyšší. [8, s. 20] Takovému výroku se říká paradox vláknité struktury a vyřkl ho A. A. Griffith. Pevnost vlákna je dána počtem vad v materiálu, malý příčný průřez vláken, znamená, že ve vláknech jsou minimalizovány rozměry vrozených vad materiálu a také výskyt povrchových vad je při malých příčných průměrech nižší.



Graf. 3 - Vliv průměru vlákna na pevnost v tahu, materiál skleněné vlákno [8]

4.2.1 Typy výztuží

Pro samostatná vlákna se najde využití pouze ve speciálních případech, nejběžněji se proto aplikují upravené produkty.

Roving je nejběžnějším typem sdružených pramenců. Obsahuje sdružené pramence s nulovým, nebo malým počtem zákrutů. [9] Počet elementárních vláken v rovingu se pohybuje od 1 do 24 tis. vláken. Značí se 1K, 3K, až 24K. Číslo udává počet tisícovek vláken. V metrickém systému se jemnost (počet vláken) značí jednotkami *tex*. Dle ČSN ISO 1144 *tex* představuje délkovou hustotu, konkrétně hmotnost 1 km pramence v gramech. Často je použita i větší jednotka *dtex*, která udává počet gramů na 10 km vláknitého produktu. Starší míra je *denier*, hmotnost v gramech při délce produktu 9000 m. [9]

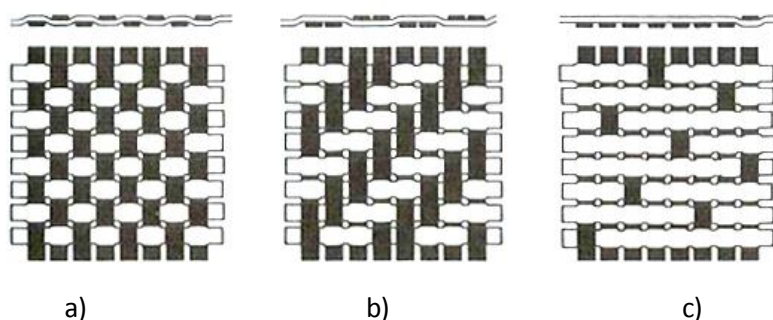
Rohož je soubor nepravidelně orientovaných nasekaných krátkých vláken, která jsou kladena v několika vrstvách. Celek je impregnován pojivem, pro zachování konstantního tvaru. Rohože se vyrábějí ve větších gramážích 300 – 900 g/m². Jejich použití je pro výrobu forem, tvarově komplikovaných dílů, bez požadavků na velkou pevnost.

Tkaniny jsou plošné výrobky z pramenců uložených pravoúhle v útku a osnově. Navýšením počtu vláken vznikají v osnově různé druhy křížení vláken a tomuto křížení říkáme vazby. Hmotnost vláken v tkanině můžeme změnit v obou směrech až do poměru 1:20, tím vznikají kvazijednosměrné vazby. [8] Tkaním vláken se v materiálu tvoří zvlnění, které má často za následek poruchy mechanických vlastností, viz kapitola 4.6. Nejlepší mechanické vlastnosti má tkanina s nejvolnější vazbou.

4.2.2 Vazby

Pramencové tkaniny mají nejrůznější typy vazeb. Při návrhu výrobku je potřeba zkušených pracovníků, pro správné zvolení vazby. Na tvarově složitý díl s mnoha rádiusy je vhodné použít volnější typy vazeb. Naopak na jednodušší výrobky se může použít pevnější vazba, se kterou se lépe pracuje. Vzájemné uspořádání osnovy a útku vytváří tři základní typy vazeb:

- **Plátnová vazba** – nejjednodušší z vazeb, útek a osnova se křížují s každým pramenem 1/1, vazba velmi těsná, velké zvlnění vláken
- **Keprová vazba** – složitější na výrobu, útek a osnova se křížují přes každý druhý pramen 2/2, vazba volnější, velmi dobře tvarovatelná, lepší mechanické vlastnosti díky menšímu zvlnění vláken
- **Atlasová (saténová) vazba** - je nejvolnější vazbou, vhodná na velmi členité díly, dobrá řasitelnost, lze dosáhnout velmi hladký povrch, složitější při zpracování



Obr. 20 - a) Plátnová vazba b) Keprová vazba c) Atlasová (saténová) vazba [8]

4.3 Technologie výroby

Zásadním aspektem pro výrobu kompozitu je reprodukovatelnost výroby. Existuje několik technologií výroby, ale pouze některé zaručují reprodukovatelnost výroby v rozumné míře. Proto se v leteckých aplikacích používá 100% výstupní kontrola. Kontrola dílu se nejběžněji dělá vizuálně, kde se hodnotí angl. pin hole, tj. tvorba vzduchových bublin na povrchu laminátu. Dále lze kontrolovat delaminaci rezonanční zkouškou - poklepáním na díl. Vyžaduje to však zkušeného operátora. V průmyslu lze delaminace vrstev a vady v materiálu kontrolovat ultrazvukem ve vodě, nebo rentgenovou zkouškou. V práci budou uvedeny pouze technologie, které jsou nejběžnějšími při výrobě elektro formule.

Ruční laminace

Nejběžnějším způsobem výroby je ruční (kontaktní) laminace, jde také o nejstarší technologii. Její princip spočívá v kladení suchých neimpregnovaných vláken do naseparované formy a na tyto vlákna se následně štětcem, či válečkem nanáší matrice. Díl se nechá vytvrdit na vzduchu, nebo za zvýšené teploty. Tato technologie však nezaručí dobrou kvalitu dílu. Sice díl nemá povrchové vady typu pin hole, ale mezi

jednotlivými laminami je velká vrstva matrice a často dochází k jejímu porušení. Kompozit nemá dobrý objemový poměr výztuže k matrici.

Značné vylepšení této technologie je použití vakua. Pro dobrou kvalitu dílu je potřeba mít velký objemový podíl výztuže a ten se dosáhne odebráním přebytečné matrice. To zajistíme pouze konstantním tlakem na díl. Na díl prosycený matricí se položí odtrhová tkanina, separační fólie a odsávací tkanina, která zajistí rovnoměrný rozvod tlaku. Takto připravený díl se vloží do uzavřeného pytle, ze kterého se vysaje vzduch a utvoří se vakuum tj. -1bar. Díl se následně nechá vytvrdit.

Vakuová technologie je z hlediska kvality dílu, mnohem příznivější, než klasická laminace. Vytvrzený díl má objemový poměr vláken až 70%, pokud se jedná o sendvičové struktury, je objemový poměr vláken k matrici zhruba 50-60%. Problematická je reprodukovatelnost, která vyžaduje zkušenost operátora.

Prepreg

Prepregová technologie je v průmyslu nejrozšířenější. Její předností je mnohem lepší reprodukovatelnost a přesně daný objemový podíl vláken a matrice. Principem je již předem impregnovaná tkanina (angl. pre-impregnated). Typ tkaniny si každý zákazník může zvolit sám, stejně tak lze kombinovat druh matrice. Nejběžnější matricí je epoxidová s objemovým podílem cca. 30% vůči vláknům.

Nanášení matrice na tkaninu se realizuje pomocí nástřiku, nebo lubrikační ponořením. Podle aplikací lze nanášet matrici oboustranně, či jednostranně. K procesu polymerizace u prepregových matric nedochází za běžných teplot. Za pokojové teploty je prepreg stabilní po dobu 1 měsíce. Poté matrice postupným uvolňováním látek degraduje a ztrácí lepivost i mechanické vlastnosti. Proto se prepregy uchovávají v chladu cca -18°C, kde vydrží až 1 rok. Dle typu matrice se díly vytvrzují. Nejběžněji je to v teplotách okolo 120°C po dobu 3 hodin. Každý výrobce uvádí přesnou dobu náběhu teploty, výdrž i chladnutí pro nejlepší mechanické vlastnosti.

Vytvrzení může probíhat podobně jako u kontaktní laminace, kde na díl působí tlak vakua a takto připravený díl se vytvrzuje v peci. Nejlepší technologií vytvrzení je pomocí autoklávu. Autokláv je přetlaková nádoba, kam se vloží připravené díly ve vakuu a autokláv na ně dokáže vyvinout okolní přetlak do desítky bar. Na díl působí velký tlak a proto uvnitř laminátu vznikají velmi silné vazby mezi laminami. Díly z této technologie mají dobré mechanické vlastnosti.

Z hlediska výroby tato technologie není příliš náročná. Pokud má operátor již předem připravené nástřihy tkaniny je otázkou pouze několika laminací, aby si tuto techniku osvojil. I z tohoto důvodu je u prepregů možnost dobré reprodukce dílů.

Navíjení

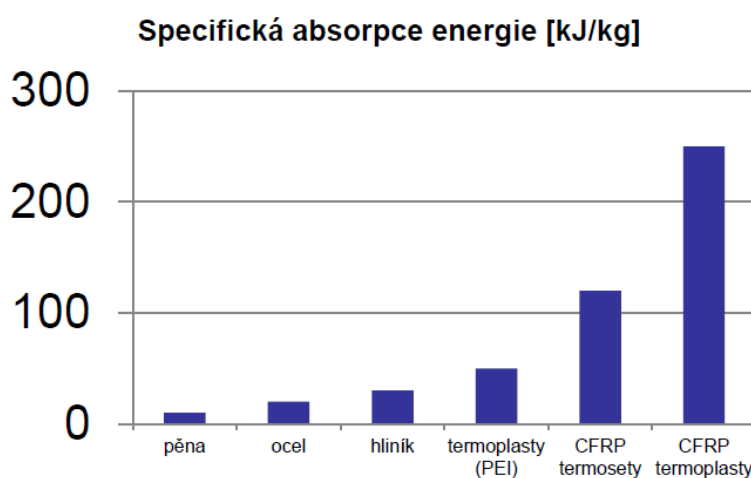
Je technologií, kterou lze vyrobit různé otevřené profily ve speciálních případech i uzavřené. Její podstatou je navíjení jednotlivých rovingů na trn. Proces navíjení je podobný soustružení. Trn se otáčí a support odvíjí lubrikovaný roving. Touto technologií lze velmi dobře kontrolovat úhel natočení vláken a jejich předpětí. Takto vyrobené díly mají velmi dobré mechanické vlastnosti a patří k nejlepší technologiím.

4.4 Uhlíkové vlákno

Uhlíková vlákna (angl. CF – Carbon Fibre) je technickým materiálem s extrémně vysokou pevností, ale nízkou tažností. Pokud rozebereme elementární krystal grafitu zjistíme, že vykazuje značnou anizotropii v kolmém směru na bazální roviny šesterečné mřížky. Je to dáno tím, že na něj působí jen malé Van der Waalsovy síly. V rovinách basálních vrstev v tzv. „aromatických“ rovinách, jsou atomy vázány velmi pevnými kovalentními vazbami, které tvoří celkovou pevnost vlákna. Teoretická pevnost grafitového monokrystalu namáhaného tahem, ve směru rovnoběžném s basálními rovinami, činí až 100 GPa a teoretický modul pružnosti v tahu je přibližně 1000 GPa. [9] Tyto hodnoty jsou ovšem velmi vzdálené od hodnot reálných a u nejlepších kompozitů se pohybují do desítky GPa.

Kompozitní konstrukce z uhlíkových vláken se v moderním průmyslu velmi rychle rozšiřují. Kompozity se používají především v leteckém průmyslu, kde je zásadní požadavek na hmotnost a pevnost konstrukce. V současnosti můžeme narazit dokonce na ultralehký letoun vyrobený kompletně z uhlíkového vlákna ve formě prepregu. Uhlíkové vlákno je také nejrozšířenějším materiálem v motosportu, kde se z něj vyrábějí nosné konstrukce. Na trhu se ale potkáme i s aplikacemi na průmyslových robotech, kde se používají nosná ramena robotů z uhlíku, z důvodů nízké setrvačnosti umožňující zrychlit práci robota. Dále se zavádějí kompozitní lóže do strojů v náročných aplikacích, kde je po stroji požadována vysoká přesnost. Kompozitní konstrukce velmi dobře tlumí vibrace a mají velmi vysoké vlastní frekvence.

Uhlíkové vlákno, jakožto deformační prvek se začal používat především v motorsportu. V komerčním sektoru se s takovýmto typem absorbéru setkáváme jen ojediněle. Nicméně existují studie použití kompozitních trubek jako absorbér nárazu do nárazníků autobusů. Bohužel kompozitní absorbér z uhlíkového vlákna má jednoznačnou nevýhodu a to extrémní citlivost na směr nárazu. Pokud náraz neproběhne v přímé ose, je velká pravděpodobnost, že takový absorbér zcela selže. Měřítkem účinnosti materiálu vhodného pro absorbér energie je hodnota SEA, což je podíl absorbované energie vůči deformované hmotnosti, některé zdroje však uvádí podíl celkové hmotnosti absorbéru. Celkovou hmotností se bude řídit i tato práce. Graf 4. porovnává hodnoty SEA pro unifikovaný tvar absorbéru.



Graf. 4 - Specifická absorpční energie SEA [10]



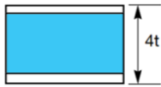
Z grafu je patrné, že kompozitní vlákna mohou dosahovat až 3x vyšší specifické absorpce energie než běžné konstrukční materiály. Bohužel tyto hodnoty jsou vykoupeny mnoho neznámými, jako je například vliv úhlu natočení vláken, vliv použité matrice, vady při výrobě a v neposlední řadě i vyvolání správného módu poruchy pro daný tvar. Všechny tyto vlivy značně ovlivňují hodnoty SEA. Dle výzkumu [6] epoxidová matrice má SEA 80 kJ/kg a termoplastická matrice PEEK má SEA 200 kJ/kg. Proto nelze přesně určit hodnoty SEA pro uhlíkový kompozit.

4.5 Sendvičové konstrukce

Pokud hovoříme o sendvičové konstrukci, máme tím na mysli konstrukci, která se zpravidla skládá ze dvou potahů s vysokým modulem pružnosti a jádra mezi potahy z materiálu s mnohem nižším modulem pružnosti. Motivací vzniku sendvičových struktur byla nutná redukce hmotnosti v letectví, při zachování těch nejlepších vlastností materiálu. Celá myšlenka vznikla ze znalosti průběhu namáhání desek v ohybu. Zjistilo se, že největší koncentrace napětí je na horním a dolním potahu Obr. 22 a mezi potahy působí jen malé namáhání. Z tohoto důvodu se zavedly materiály s nízkými mechanickými vlastnostmi a především nízkou hustotou. Již ve druhé světové válce byl použit sendvič na britském letounu Mosquito a to s dřevěnými potahy a balzovým dřevem jako jádro. Druhým přístupem pro použití sendvičů je použití na součástech, kde je potřeba výrazně zvýšit ohybovou tuhost při nízké hmotnosti. Ohybové napětí na nosníku σ_o obdélníkového průřezu je dáno vztahem

Rov. 1, ze kterého je patrné, že ohybové napětí je závislé na druhé mocnině tloušťky průřezu h.

Rov. 1
$$\sigma_o = \frac{M_o}{\frac{bh^2}{6}}$$

	Laminát	Sendvičová struktura	
			
Relativní tuhost	1	7	37
Relativní pevnost	1	3,5	9,25
Relativní hmotnost	1	1,03	1,06

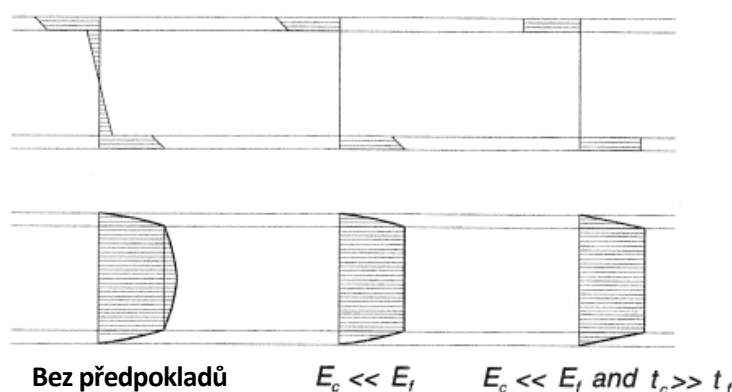
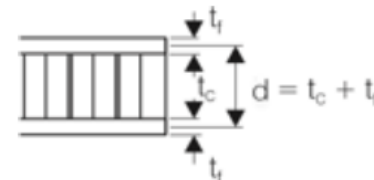
Obr. 21 - Přednosti sendvičových struktur [10]

Dle Obr. 21 je hlavní výhodou zvýšení relativní pevnosti a tuhosti, potahy přenášejí dominantní namáhání při zatížení ohybem. Tlačný potah přenáší tlakové namáhání a volný potah přenáší tah. Jádro má za úkol stabilizovat desky proti vybočení a propojit tyto typy namáhání uzavřením smykového pole desky. Proto jsou jádra namáhána převážně smykem, což umožňuje použití materiálů s nižší pevností, jako jsou pěny, či voštiny. Průběh napětí v sendviči popisuje Obr. 22.

Díky rozdílným tuhostem potahů a jádra je výraz pro určení tuhosti $(EI)_{eq}$ o trochu složitější. Analytický přístup vede přes základní poznatky pružnosti Eulerova nosníku a Steierovi věty. První dva členy Rov. 2 reprezentují průřezovou charakteristiku dle Steinerovi věty pro potahy a třetí člen průřezovou charakteristiku pro jádro. Pokud přistoupíme ke zjednodušení a zajistíme, že $E_c \ll E_f$ a zároveň bude platit, že $t_f \ll t_c$ můžeme vztah zjednodušit a dostaneme Rov. 3.

Rov. 2
$$(EI)_{eq} = \frac{E_f b t_f^3}{6} + \frac{E_f b t_f d^2}{2} + \frac{E_c b t_c^3}{12}$$

Rov. 3
$$(EI)_{eq} = \frac{E_f b t_f d^2}{2}$$



Obr. 22 - Průběh napětí v sendvičovém nosníku s postupným zjednodušením [11]

U sendvičové struktury je nejdůležitější částí rozhraní mezi potahem a jádrem. Pokud dojde k porušení tohoto spojení, konstrukce ztrácí na pevnosti a vlivem cyklických účinků jí čeká porušení. Toto spojení je u vláknových kompozitů realizováno přes matici vláken. Při laminaci se jádro pokládá jako další vrstva a spojení je realizováno vytvrzením matrice. U výrobní technologie je potřeba dbát na maximální pevnost v tlaku jádra. Například u pěn nízkých hustot (60kg/m^3) je pevnost v tlaku nízká a se zvýšenou teplotou se dále exponenciálně snižuje. Proto na výrobu kompozitu v autoklávu se používají speciální drahé pěny, jako je Rohacell apod.

Kromě těchto nízkohustotních pěn se používají i hliníkové, či aramidové (nomexové) voštiny. Voština má buňky typu hexa, které připomínají včelí plástve, jejich hlavní výhodou je nižší hustota než mají pěny a velká pevnost v tlaku a vzpěrová stabilita buněk. Naopak jejich nevýhodou je pracnější příprava a samotná výroba laminátu.

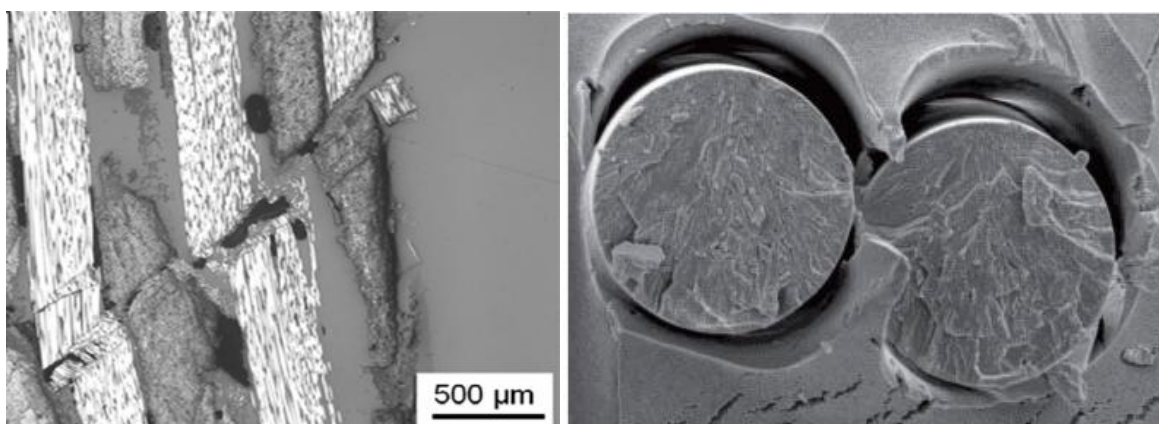
4.6 Druhy poruch vláknových kompozitů

Poruchy v kompozitním materiálu jsou specifickou kapitolou. Není jednoduché predikovat, jaký typ poruchy nastane, jelikož jich existuje celá řada ovlivněná typem zatížení, typem tkaniny, materiálem matrice a ve výsledku i třením mezi impaktorem a vzorkem. Hlavní druhy poruch však lze rozdělit do několika základních skupin.

Porušení vlákna

Zatížení tahem a tlakem ve směru vláken může vyvolat odlišné módy poruchy. Při zatížení tlakem má na vlákna velký vliv Poisonovo číslo udávající poměr mezi příčnou a podélnou deformací. Tento jev vyvolá mikro trhliny na rozhraní vlákno-matrice a vlákna se následně poruší v příčném směru. Dalším módem porušení v tlaku je ztráta stability ve vzpěru. Vlákna, která překročí svojí mez pevnosti, dosáhnou poruchy nejtypičtěji ve směru 45°. Tento mód je velmi podobný smykové poruše vláken a je nejtypičtější pro zatížení tlakem.

Při tahovém namáhání nedochází k poruše všech vláken najednou, pokud správně funguje rozhraní mezi vlákny a matricí, stane se, že při dosažení meze pevnosti u jednoho vlákna se namáhání přeneso přes matrici na ostatní vlákna laminátu. Pokud se v materiálu naakumuluje dostatečný počet porušených vláken, dojde ke globálnímu porušení. Nejvyšší pevnost při tahové zkoušce dosahují vazby typu roving. Je to dáno tím, že vlákna nejsou zvlněná díky vazbě a tudíž se namáhání přenáší rovnou přes vlákna. U tkanin vypadá typický průběh zkoušky tahem tak, že nejprve dochází k natažení vláken ve směru namáhání, následně se poruší matrice a pokud není laminát schopen přenést namáhání na další vlákna, dochází k poruše.

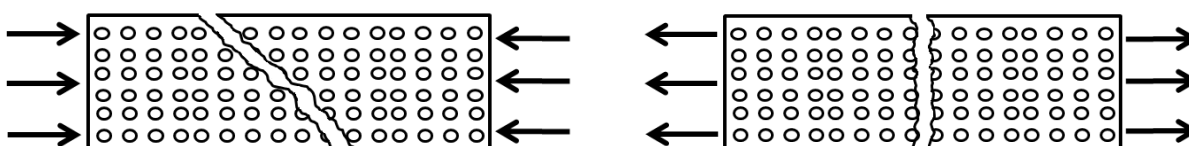


Obr. 23 - Ztráta stability vláken při zatížení tlakem (vlevo), tahové porušení vlákna (vpravo) [8]

Porušení matrice

K selhání matrice dochází především u jednosměrných kompozitů, tedy rovingů. Pevnost této tkaniny ve směru kolmém na vlákna závisí pouze na matrici. U tkanin plátnové, či keprové vazby se tyto poruchy příliš neobjevují. Mají vlákna propletena přes sebe a většinou mají stejnou pevnost v obou směrech 0° i 90°.

Pokud zatížíme roving tlakem, vznikne v matrici charakteristický lom pod úhlem kolmým na vlákna. Obr. 24. Pokud jde o čistý tah, lom má charakteristiku kolmou na vlákna.



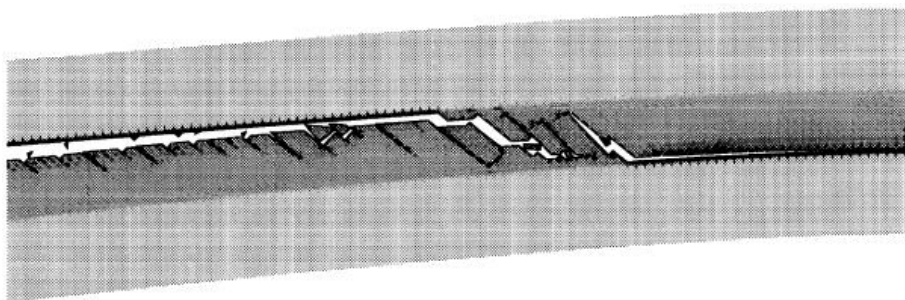
Obr. 24 - Porušení matrice v tlaku a tahu na jednosměrném kompozitu

Delaminace

Je nežádoucím dějem při statických zkouškách pevnosti, naopak pro pohlcení energie nárazu se této poruchy využívá a vyvozuje se tak díky ní střední nárazová síla angl. Plateau crushing load. Porucha vzniká na rozhraní vlákna a matrice, kde dochází k trhlinám, které se postupně materiálem šíří až se jednotlivé laminy od sebe odtrhnou.

Delaminace je nežádoucí především na pevnostních dílech vystavených cyklickému namáhání. Pokud se trhlina mezi laminami objeví, nelze jejímu šíření zabránit. Kompozitní díl dříve, či později vykáže fatální poruchu funkčnosti.

Problematické jsou i delaminační zkoušky a to z hlediska zkoušení jednotlivých módů delaminace. Módy rozeznáváme tři - Mód I tahový, kde se vyvolává tah kolmo na směr vláken, Mód II rovinný osový smyk, kde je vyvoláno smykové namáhání v ose jednotlivých lamin a Mód III antirovinný smyk vyvolaný smykem lamin kolmo na směr vláken. Prakticky lze nejjednodušeji zkoušet pouze tahový mód I, kde se na kompozit přilepí příložky a v kolmém směru na vzorek se vyvolává tah. Problematické je vytvoření pevnějšího spoje na příložce, než na laminách.



Obr. 25 - Delaminační trhlina materiálem - matrice tmavě šedivá, vlákno světle šedivá

4.7 Poruchy sendvičových struktur

Sendvičové struktury mají nejčastější poruchu delaminací rozhraní jádra a potahu, tato oblast je nejslabším místem sendviče a většinou je porušení způsobené špatným výrobním postupem, například nedostatečným tlakem na díl, či špatnou úpravou povrchu jádra před laminací. Je proto nutné mít technologie odladěnou, aby tato elementární chyba nenastala. Při zkouškách sendvičů tří bodým ohybem rozlišujeme několik typů poruch viz Obr. 26.

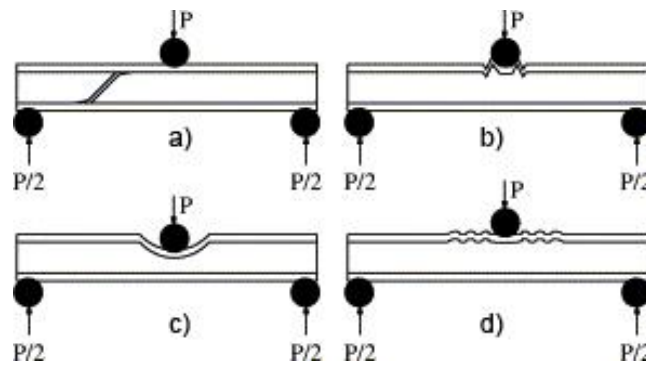
Poruchy v ohybu

Lokální vzpěr (angl. microbuckling), je poruchou objevující se na tlačném potahu, který dosáhne svého kritického napětí.

Zvlnění desky (angl. wrinkling), jsou krátké vlny na horní desce. Pro jejich identifikaci lze nahlížet jako na nosník zatížený axiálním tlakem podepřený elastickým podkladem – jádrem. [12]

Smyk jádra, (angl. shear) je nejčastější poruchou u sendvičů větších tloušťek (>5mm). V praxi se rozlišují dva módy kolapsu smykem a to Mód A, kde se vytvoří čtyři plastické klouby na potahu pod impaktorem. Nebo Mód B, ve kterém se vytvoří 8 plastických kloubů – čtyři pod impaktorem a dvě na každé z podpor.

Protlačení (angl. indetation), porucha je běžná u pěn s malou tloušťkou (<4mm) a nízkou hustotou. Jádro ztratí pevnost v tlaku a potah se následně propadne, dokud jeho deformace nepřekročí mez pevnosti.

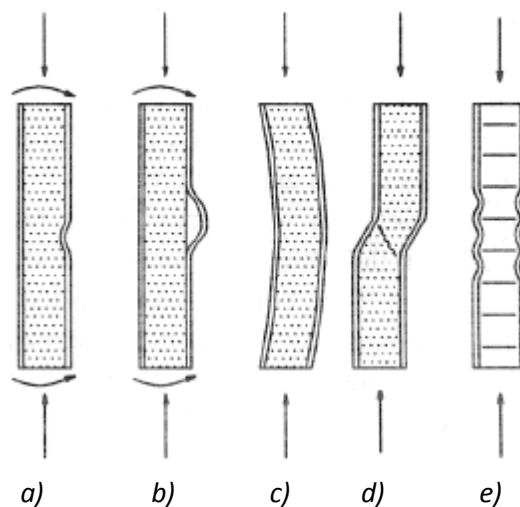


Obr. 26 - druhy poruch 3 bodého ohybu

a) smykem b) lokální ztrátou stability c) protlačení d) zvlněním potahu

Poruchy v tlaku

Pro deformační prvek je však důležitější formou poruch, poruchy způsobené tlakem. Mechanismů poškození tlakem je mnoho a pro porozumění chování sendvičové struktury je nutné je představit. V tlaku se především projevují poruchy vyvolané mezi pevnosti na potahu. Mechanismy poruch jsou však podobné jako při zatížení ohybem.



Obr. 27 - Poruchy při zatížení tlakem

a) vrásnění b) vrásnění s delaminací c) globální vzpěr d) zvlnění smykem e) zvlnění potahu (voštiny)

Vrásnění – projevuje se ztrátou stability potahu ve vzpěru a dochází k vybočení v typicky sinusovém průběhu. Vyosení může být symetrické na obou potazích, tak asymetrické tedy pouze na jednom. Metody predikce vzniku analytickou metodou byly prozkoumány Hoffem a Mautnerem [5] již roku 1945. Jejich teorie byla založená na isotopickém chování potahu a byla počítána jako nosník podepřený elastickým materiálem. Výzkum je přivedl na Rov. 4, která předepisuje kritické napětí pro ztrátu stability σ_{Hoff} . E_f je modul pružnosti potahu, E_c modul pružnosti jádra a G_c smykový modul. Jejich hodnota napětí však byla

vyšší než reálná a proto do vzorce zavedli koeficient 0.91. Z dostupných zdrojů [11] však vyplynulo, že toto napětí je reálné až s koeficientem 0.5.

$$\sigma_{Hoff} = 0.91 \sqrt[3]{E_f E_c G_{core}}$$

Rov. 4

Tato rovnice však platí za předpokladu symetrického vrásnění na obou potazích a isotropnímu chování laminátu. V realitě je však uhlíkový kompozit ortotropním materiálem, a pokud bychom chtěli dostat reálnějších vztahů pro limitní napětí dostali bychom se do mnohem složitějších výrazů, které nejsou předmětem této práce.

Vrásnění s delaminací – mechanismy vzniku jsou podobné jako u klasického vrásnění. Vyvolaný tlak v kombinaci s ohybovým momentem vyvolá napětí vyšší, než je schopné přenést rozhraní laminy a jádra. Díl se delaminuje směrem ven z potahu.

Globální vzpěr a zvlnění smykem – globální ztráta stability lze analyticky predikovat pomocí výpočtů dle Eulera pro vzpěr nosníků. Rozdílem ve výpočtu může být nestabilita způsobená smykem v jádru. Proto výsledná kritická síla se spočítá z Rov. 5. Kde P_{cr} je kritická síla pro porušení, P_b je kritická síla nosníku v ohybu dle Eulera a P_s reprezentuje pevnost jádra ve smyku.

$$\frac{1}{P_{cr}} = \frac{1}{P_b} + \frac{1}{P_s}$$

Rov. 5

$$P_b = \frac{\pi^2 D_B}{\eta L}$$

Rov. 6

V Rov. 6 je L celková délka nosníku, η je koeficient pro uložení nosníku dle Eulera v našem případě, nejčastěji $\eta=2$, vetknutí na spodní straně. Horní okraj „volný“. A D_B je ohybová tuhost dle Rov. 3 $D_B=(EI)_{eq}$.

$$P_s = \frac{G_{core} b d^2}{t_c}$$

Rov. 7

Rov. 7 představuje smykovou tuhost jádra, kde G_{core} je smykový modul pružnosti, b je šířka panelu, d je vzdálenost neutrálních os lamin a t_c je tloušťka samotného jádra.

Zvlnění potahu – se objevuje především u sendvičů s nesouvislým jádrem, jako je například voština. Hexagonální buňky voštiny fungují jako podpory potahu a v jednotlivých buňkách se vytvoří lokální nestabilita v podobě vzpěru. Kritické napětí na potahu pro tento jev lze podle teorie vyjádřit Rov.8.

$$\sigma_{f,cr} = \frac{2E_f}{1-\nu_f^2} \left(\frac{t_f}{s} \right)^2$$

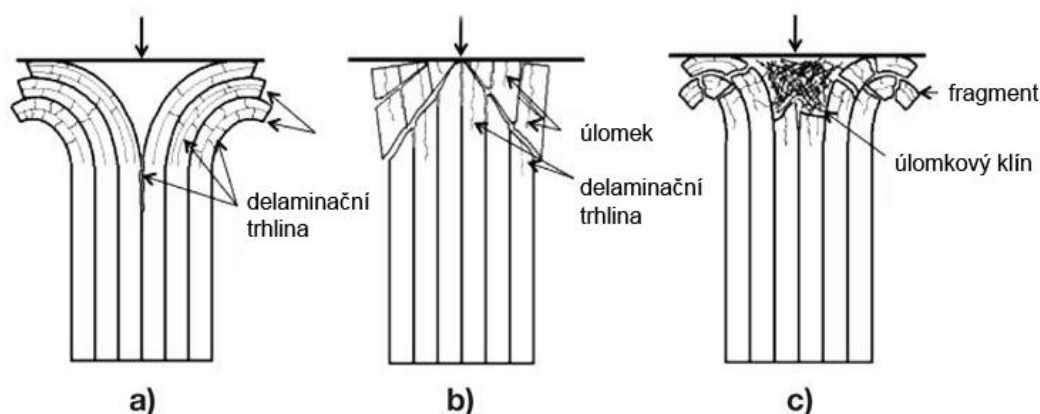
Rov. 8

Kde ν_f je Poissonova konstanta potahu, s je průměr kružnice opisující hexagonální buňku.

4.8 Poruchy pod dynamickým zatížením

Poruchy pod dynamickým zatížením mají jiný charakter než poruchy kvazi-statické. Z hlediska dynamiky posuzujeme dva hlavní typy poruch. **Katastrofické** (angl. catastrophic), které se vyznačují velkým špičkovým zatížením a následně fatální poruchou struktury. Ta již dále nedokáže vyvozovat střední nárazovou sílu a tím neabsorbuje kinetickou energii. Této poruše se při navrhování absorberu snažíme vyhnout.

Druhý mód poruchy je **progresivní** (angl. progressive), tento mód se snažíme při dynamickém zatížení vyvolat a znamená, že si struktura po nižší počáteční špičce zatížení konstantně drží střední nárazovou sílu, která vyvoluje absorpci kinetické energie. Z hlediska progresivního módu porušení rozeznáváme tři typické mechanismy poškozování – ohybem lamin, příčným smykem a křehkým odlamováním Obr. 28. Tyto mechanismy poprvé prozkoumal D. Hull [13] v roce 1991, když jejich chování popsal na zkouškách kompozitních trubek.

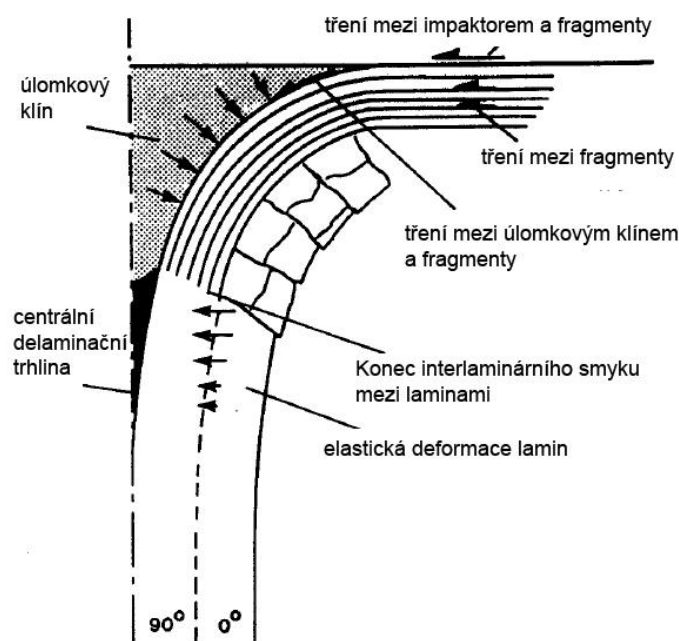


Obr. 28 - Mechanismy porušení kompozitní trubky a) ohybem lamin b) příčným smykem c) křehkým odlamováním

Ohyb lamin (angl. splaying failure) – je typickým pro kompozitní trubky, náraz impaktoru způsobí delaminaci tahového módu I, charakteristického korunou lomu. Tato koruna vzniká rozštěpením lamin na dvě části jedna uvnitř, druhé vně, dle úhlu pod kterým impaktor naráží. D. Hull následně popsal faktory ovlivňující velikost střední nárazové síly Obr. 29:

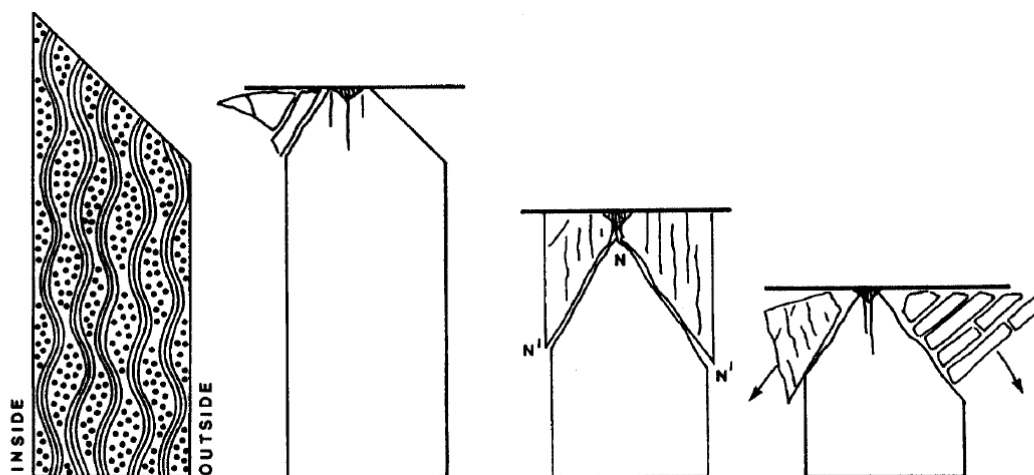
- Tlaková síla fragmentů a úlomkového klínu působící na impaktor
- Velikost tření mezi fragmenty a impaktorem
- Tření mezi úlomkovým klínem a fragmenty
- Tření mezi jednotlivými laminami v proměnném rádiu koruny lomu
- Síla způsobující otevření centrální delaminační trhliny

Na charakteristické koruně je patrné, že impaktor vyvolává i příčné síly v trubce. Tyto tlakové síly způsobují i roztržení lamin v příčném směru.



Obr. 29 - Mechanismy poškození ohybem lamin [13]

Příčný smyk (angl. transverse shear) – vznik je zapříčiněný značným napětím pod impaktorem. Pokud dojde k překročení kritické síly, přídatný moment způsobí smyk v krátkých nosnících, které se následně odlomí. Deformační energie se vybijí díky smykové poruše ve vzpěru jednotlivých nosníků. Charakteristickým znakem je ostrá špička lomu viz Obr. 30.



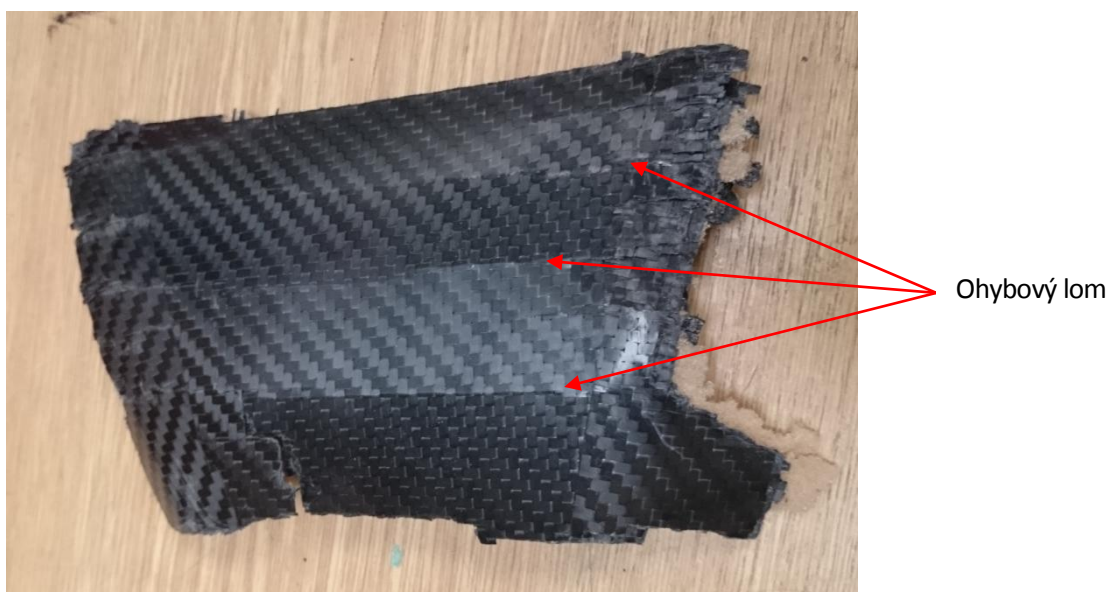
Obr. 30 – Vývoj poruchy příčným smykem

Křehké odlamování (angl. brittle failure) - Tento lom je charakteristický pro velmi tuhé kompozity s relativně malým prodloužením (angl. strain). Například kompozity s termoplastickou matricí se nejčastěji porušují křehkým odlamováním. Dá se tedy říci, že tohoto módu nelze dosáhnout s nízkým modulem pružnosti v matrici. Porušování je způsobeno kombinací ohybu lamin a příčného smyku. Velké množství energie se vybijí v iniciaci krátkých delaminačních trhlin.

Dynamické poruchy sendvičů

V dostupných informačních zdrojích je zcela přesně popsáno dynamické chování kompozitů bez sendviče. Výzkumem dynamických účinků na sendvičové struktury v tlaku se mnoho prací nezabývalo. Dostupné zdroje popisují mechanismy porušení podobné, jako je tomu u statických zkoušek tlakem či ohybem. Nejžádanějším typem porušení je smyková porucha jádra a ohyb lamin. Tento mód funguje podobně jako u kompozitů bez sendviče, viz předchozí kapitola. Energie se pohlcuje přes delaminační trhlinu. U sendvičů však nikdy nenalezneme charakteristickou korunu. Je to způsobené jádrem, na kterém se v průběhu nárazu mění delaminační trhlinu z vnější strany na vnitřní.

Běžnějším typem je křehké odlamování, kde se vlákna chovají jako nosníky a po dosažení meze pevnosti se odlomí. Typickými úlomky jsou dlouhé části laminátu vnějšího i vnitřního povrchu. Velmi záleží na úhlu, pod kterým se sendvič deformuje. Pokud je úhel jiný než nulový k ose nárazu může se stát, že sendvič bude namáhán pouze ohybem. Při dosažení určitého ohybového momentu nastane lokální porušení jádra v tlaku a potah se v tomto místě zlomí. Na fragmentech Obr. 31 je patrné chování lamin jako krátkých nosníků, jelikož lomy bývají ve stejné vzdálenosti. Tento typ poruchy nepohlcuje velké množství energie a často dochází ke katastrofickým poruchám.



Obr. 31 - Porušení sendviče ohybem panelu



Obr. 32 - Porucha jádra

5 Základní návrhové principy

5.1 Analytické metody

Princip, na jehož základě lze posoudit funkčnost absorberu vychází z pohlcení kinetické energie, kterou předává impaktor zkoušenému prvku. Z této hodnoty lze následně získat hodnotu SEA kapitola 4.4, porovnávající účinnosti různých konstrukcí deformačních členů. Energie vstupující do soustavy většinou je hlavním kritériem vyhodnocení zkoušky se vypočte dle Rov. 9. V našem případě je její hodnota 7350 J.

$$\text{Rov. 9} \quad E_k = \frac{1}{2}mv^2$$

Kde m je hmotnost vozu požadovaná pravidly (300kg) a v je nárazová rychlost (7 m/s). Tato energie se musí disipovat v absorberu tak, aby nepřesáhla maximální ani průměrnou hodnotu zpomalení definovanou předpisem. Pokud tedy známe tyto hodnoty zrychlení, můžeme dle druhého Newtonova zákona definovat průměrnou i špičkovou nárazovou sílu Rov. 10.

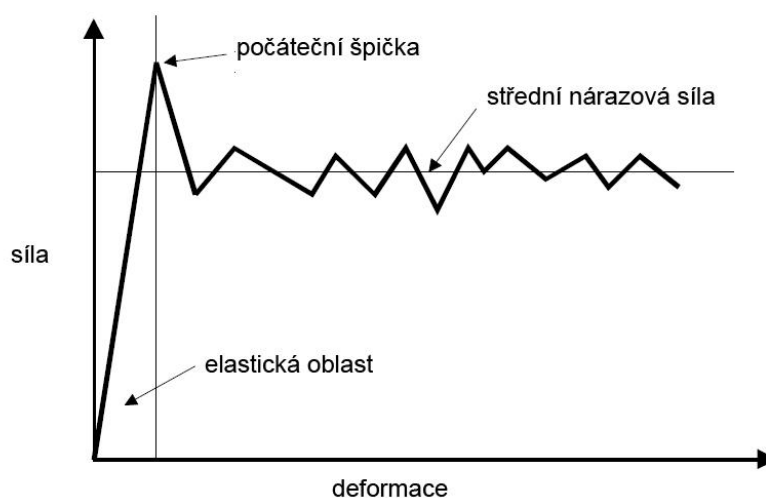
$$\text{Rov. 10} \quad \begin{aligned} F_{avg} &= ma_{avg} \\ F_{max} &= ma_{max} \end{aligned}$$

Pro návrh lze také jednoduše stanovit minimální délku l_{min} z průměrné hodnoty zpomalení.

$$\text{Rov. 11} \quad l_{min} = \frac{E_k}{ma_{avg}}$$

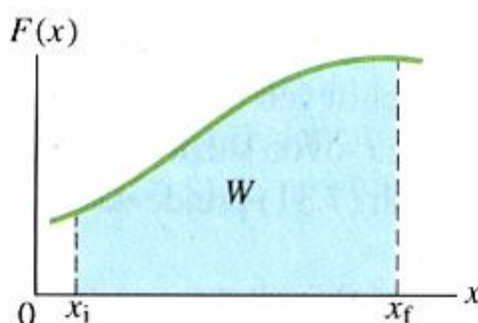
Nejdůležitějším parametrem pro návrh je však střední nárazová síla (angl. plateau crushing force) na Graf. 5 je vidět počáteční špička síly, která je pro posádku vozu nejkritičtější a vhodným návrhem geometrie lze tuto špičku ovlivnit. Hned za touto špičkou je oblast střední nárazové síly absorbující nejvíce kinetické energie. Pokud aproximujeme tuto sílu přímkou, lze vypočítat pohlcenou energii E_{abs} z jednoduché rovnice Rov.12.

$$\text{Rov. 12} \quad E_{abs} = F_{plateau} x$$



Graf. 5 - Typický průběh síly - deformace při nárazu

Z Rov.12 je patrné, že absorbovaná energie je úměrná ploše pod křivkou. Velmi často se stává, že průběh není lineární, proto si výpočet žádá složitější funkce se zavedením integrálního počtu. V takovémto případě tedy zavádíme rovnici Rov.13.



Graf. 6 - Nelineární průběh síly

Rov. 13

$$E_{abs} = \int_{x_i}^{x_f} F(x) dx$$

Z uvedených rovnic v této kapitole, lze jejich úpravami docílit základního analytického návrhu deformačního členu. Tyto rovnice lze uplatnit, pokud máme jednoducho geometrii deformačního prvku a průběh deformace se dá nějakým způsobem linearizovat. Pokud se budeme zabírat návrhem složitějších tvarů, u kterých není znám mód poruchy, musíme využít predikčních metod MKP viz kapitola 5.2.

5.2 Numerické simulace

V moderní době se v průmyslu hojně začaly využívat numerické simulace. Motivace k zavedení virtuálních výpočtů byla redukce činnosti lidské práce. Reálné zkoušky totiž stojí nemalé finanční náklady za lidskou práci, prostory i za zkoušený materiál. Virtuální prostředí většinou poskytuje snížení nákladů za reálné testy. K pevnostním úlohám byla již v 50. letech 20. století vynalezena metoda konečných prvků (MKP, angl. FEM). Ta díky svému principu rozdělení součástí na konečný počet prvků (elementů) umožnila vhodně výpočty algoritmovat a tím zpřístupnit iterační metody pro PC.

S masivním nárůstem použití kompozitů se v posledních letech výrobci těchto MKP softwarů zaměřují i na implementaci materiálových modelů a predikci výpočtů kompozitních struktur. Je to však oblast, která sebou nese mnoho neznámých a proto je výpočet vždy závislý na technologii výroby. Z tohoto důvodu se u kompozitů stále musí provádět mnoho fyzických testů.

Pro simulaci dynamických účinků (crash) používáme explicitní dynamické řešiče, kde je výstupem závislost na čase a je možné v něm řešit nelinearity úloh, charakteristické pro crashový děj. Těmi jsou:

- Geometrická nelinearita (velké deformace a přetvoření)
- Materiálová nelinearita (plastizace, hyperelastická, apod.)
- Nelinearita zatížení

Základem explicitního schémata řešení je výchozí Newtonova pohybová rovnice pro dynamické úlohy Rov. 14.

Rov. 14

$$[M]\{\ddot{u}\} + [K]\{u\} = F$$

Kde $[M]$ je matice hmotnosti, $\{\ddot{u}\}$ je matice zrychlení, $[K]$ je maticí tuhosti, $\{u\}$ je matice posuvů a F jsou vnější zatěžující síly proměnné v čase. K aproximaci zrychlení se použije metoda centrálních diferencí, která vyjadřuje posuvy, rychlosti a zrychlení uzlů v čase t_{n+1} pouze pomocí hodnot v čase t_n . To tedy znamená, že aktuální hodnota posuvů je počítána z předchozího kroku. To je rozdíl oproti implicitnímu schématu, který není tolik závislý na časovém kroku, jelikož vypočítává posuvy v čase t_{n+1} z času t_n i t_{n+1} a v každém časovém kroku konverguje. Toto řešení je tedy nepodmíněně stabilní a to znamená, že jeho stabilita nezávisí na délce časového kroku, tak jako v explicitu. Pro explicit je časový krok velmi důležitou veličinou a lze ho vypočítat na základě velikosti elementu a rychlosti šíření zvuku v daném prostředí. Velikost se tedy určí z rovnice:

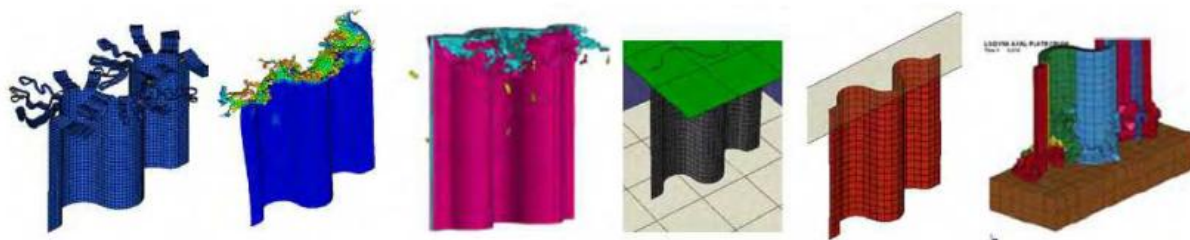
Rov. 15

$$\Delta t = \frac{l}{\sqrt{\frac{E}{\rho}}}$$

Kde Δt je časový krok, l je velikost hrany elementu, E je modul pružnosti materiálu a ρ je jeho hustota. Jmenovatel reprezentuje rychlost šíření zvukové vlny.

5.2.1 Software

Dostupných řešičů je celá řada a každý má své výhody a nevýhody. Podle dostupných prací, lze pro dynamické děje použít čtyři nejběžnější softwary – ABAQUS, RADIOSS, LS-DYNA a PAM-CRASH. Po konzultacích se zkušenými výpočtáři bylo zjištěno, že simulace crashových dějů kompozitů v programu ABAQUS je velmi náročná, jelikož software sám o sobě nedává dobré výsledky a musí se do něj implementovat vlastní charakteristiky poškození kompozitu. V programu RADIOSS nebyly nalezeny, žádné experimentální práce ani mnoho podkladů. Naopak software LS-DYNA využívá mnoho vývojářů a mnoho velkých korporací. Podle výstupních prací vypadá, že výsledky dobře korelují s realitou, ale pro uživatele má LS-DYNA nepříjemný pre-procesor a musí se do ní implementovat mnoho skriptu, jelikož je vedená pod licencí open-source, kterou si každý uživatel může upravovat. Program PAM-CRASH je již na ČVUT zavedený a jsou v něm již zkušenosti z předchozích prací. Tento řešič má uživatelsky nenáročný pre-procesor s dobře organizovanou strukturou a pro základní pochopení principů nárazových simulací je vhodný. Samozřejmě každý řešič využívá trochu jiného přístupu k materiálovému modelu a proto se výsledky mohou značně lišit a stejný input nemusí dávat stejnou odezvu od všech řešičů.



Obr. 33 - Porovnání stejné geometrie v různých softwarech, vyvolány různé druhy poruchy

6 Zkoušky

Dynamické testování je vždy náročným úkolem. Fyzikální děj probíhá v krátkém časovém úseku cca 100ms, což vyžaduje vysoké nároky na měřicí techniku a vysokorychlostní kamery, které nejsou snadno dostupné z důvodu vysokých pořizovacích nákladů. Dalším hlediskem jsou nutná bezpečnostní opatření během testu. Z tohoto důvodu soutěž FS zakazuje dynamické testování provedené v prostorách zázemí týmu bez odborného dohledu. Zkoušky musí být provedené speciálním testovacím zařízením.



Obr. 34 - Nepřípustné testování deformačního prvku asijským týmem

Zkušebních přístupů existuje několik. V automobilové praxi je nejběžnějším **nárazová zkouška do bariéry**. Deformační člen je upevněn na speciálně připraveném podvozku, který se pomocí lan urychlí na požadovanou rychlost a narazí do tenzometrické stěny. Přes tenzometry se snímá nárazová síla a z té lze dopočítat zrychlení, pokud se neměří externě akcelerometrem. Hodnoty deformace se snímají přes potenciometry. Tato zkouška je nejpodobnější i reálnému nárazu monopostu, jelikož vozík nemusí jet přesně pod nulovým úhlem, či může nepatrně odskočit. Dalším typem bariérové zkoušky je **saňová zkouška** (angl. sled test). Rozdíl je v tom, že deformační prvek nejede na podvozku, ale na kolejnicích zaručujících kolmý náraz.



Obr. 35 - Nárazová zkouška provedená testovacím centrem Škoda Auto

Druhým typem jsou **pádové zkoušky** (angl. drop test). Princip je podobný jako u saňové zkoušky, s tím rozdílem, že k urychlení vozíku nepotřebujete zdroj, ale vozík se urychluje gravitací. Výhoda této metody je prostorová nenáročnost. Používají se dva přístupy uchycení deformačního členu. V prvním případě padá deformační prvek společně s vozíkem a naráží do země a v druhém případě je připevněn k zemi a závaží na něj padá. Z hlediska předání energie jsou oba principy stejné. Měří se buď náraz do tenzometrické stěny a poloha se snímá špulkovými potenciometry, nebo se měří zrychlení akcelerometrem a rychlost s polohou se integruje z výsledků. To však nemusí být přesná metoda a může obsahovat odchylky.



Obr. 36 - Pádová zkouška provedená Ústavem letadlové techniky ČVUT

Posledním typem zkoušek jsou **kyvadlové zkoušky**. Deformační prvek je stacionární horizontální poloze a podobně jako u zkoušek vrubové houževnatosti, do prvku naráží kyvadlo opisující poloměr jeho ramena. Tato zkouška je pro deformační člen nejnevhodnější jelikož impaktor se pohybuje po kružnici a například u kompozitních prvků by mohlo mít vybočení hlavní osy nárazu fatální následky.

6.1 Pádová zkouška

Dynamické testy na vzorcích této práce byly provedeny pádovou zkouškou viz Kapitola 0. Tento typ zkoušky vyžaduje znalost několika rovnic, aby průběh i vyhodnocení zkoušky bylo relevantní k požadovaným předpisům. Velikost nárazové energie se určuje dle Rov. 9, podle které se musí určit hmotnost a dopadová rychlost vozíku. Ve chvíli volného pádu se kinetická energie rovná potenciální energii a z této rovnosti lze vyjádřit počáteční výšku pádu h .

$$E_k = E_p$$

Rov. 16

$$\frac{1}{2}mv^2 = mgh$$

Výstupem z této zkoušky byly data z 3 osého akcelerometru závislé na čase. Ze zrychlení se postupnou úpravou v programu MATLAB integrovala rychlost a poloha (deformace) v závislosti na čase podle rovnic Rov. 17 a Rov. 18.

$$\text{Rov. 17} \quad v_{i+1} = v_i - aT$$

Kde:

v ... rychlost [m.s⁻¹]

a ... zpomalení [m.s⁻²]

T ... vzorkovací frekvence [s]

$$\text{Rov. 18} \quad d_{i+1} = d_i + v_i T - \frac{1}{2} a T^2$$

Kde:

d ... deformace [m]

Přírůstek deformační energie v každém časovém kroku byl spočten jako součet kinetické a potenciální energie na začátku a v daném časovém kroku.

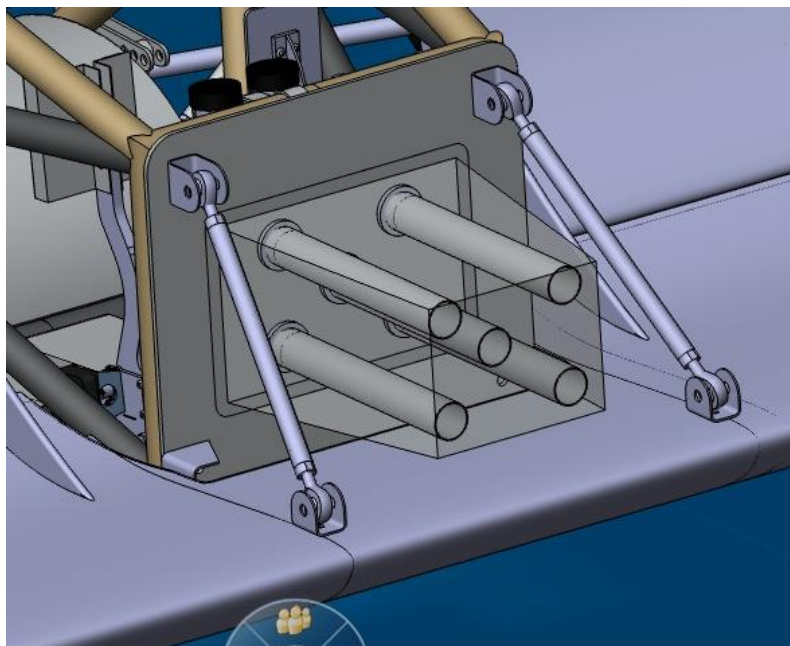
$$\text{Rov. 19} \quad E_{ai} = (E_k + E_p)_0 - (E_k + E_p)_i = \frac{1}{2} m v_0^2 - \left(\frac{1}{2} m v_i^2 - m g d_i \right) = \frac{1}{2} m (v_0^2 - v_i^2) + m g d_i$$

Poslední částí vyhodnocení bylo vyjádření ekvivalentního zrychlení, kde se musí brát ohled na pravidly předepsanou hmotnost 300 kg, tudíž požadované zrychlení se dopočetlo ze vzorce Rov.20.

$$\text{Rov. 20} \quad \begin{aligned} F_{test} &= F_{req} \\ m_{test} \bar{a}_{test} &= m_{req} \bar{a}_{req} \\ \bar{a}_{req} &= \frac{m_{test}}{m_{req}} \bar{a}_{test} \end{aligned}$$

7 Deformační prvek vozu FSE.03

První iniciativa vedoucí ke změně deformačního členu, byla na voze **FSE.03**. Stávající deformační člen z polyuretanové pěny měl hmotnost **550g** a vůz celkem vážil 270kg. Cílem do sezóny bylo rasantní snížení hmotnosti, jelikož bylo rozhodnuto o použití aeropaketu a to znamenalo navýšení hmotnosti. Motivací pro vývoj tohoto deformačního členu byly získané dynamické charakteristiky kompozitních trubek Compotech VZ4. Tyto trubky byly použity v práci V.Kulíška [10] a dle jeho návrhu jsou vhodné pro absorpci energie. Předností tohoto řešení velká úspora hmotnosti.



Obr. 37 - Deformační trubky vozu FSE.03

7.1 Návrh

Jak již bylo předesláno úvodem práce, kompozitní trubky jsou z hlediska návrhu jednodušší, jelikož vykazují jisté lineární chování při deformaci. Na základě této linearity bylo možné definovat střední nárazovou sílu z kvazi-statických zkoušek a porovnat ji s odezvou při dynamických zkouškách. Závěrem výzkumu V.Kulíška [10] bylo konstatování, že rozdíl mezi kvazi-statickým a dynamickým dějem u těchto trubek je pouze ve špičkové síle nárazu. Střední nárazová síla má stejnou odezvu v obou případech. S tímto předpokladem lze navrhnout skladbu trubek pro pohlcení definovaného množství energie podle Rov. 12. Jedinou neznámou, kterou nelze z kvazi-statických testů určit je špičková nárazová síla. Podle práce [10] trubky vykazovaly lineární závislost při zatěžování více trubek. Odezva dvou zatížených trubek vyvolala dvojnásobnou sílu.

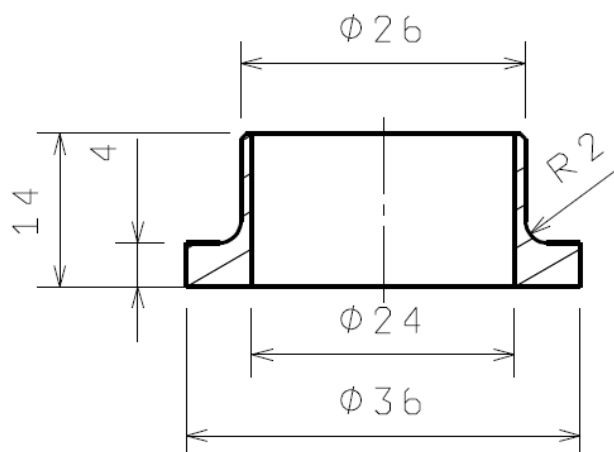
Trubky VZ4 jsou vyrobeny z uhlíkového rovingu s označením 34-700-12K a mají průměr 26mm. Jejich skladba byla přizpůsobena zatížení v tlaku, což znamená, že první vrstva byla navinuta pod nulovým úhlem k ose trubky. Tento speciální druh návínů, nabízí pouze firma Compotech a je vhodný pro absorpci energie. Celou skladbu trubky udává Tab. 2.

Vrstva	Objemový podíl vláken	Materiál	Tloušťka	Úhel návinu
	%		mm	°
1	54	34-700-12k	0,397	0,00
2	54	34-700-12k	0,210	22,82
3	54	34-700-12k	0,208	-23,15
4	54	34-700-12k	0,189	87,15

Tab. 2 – Skladba vzorku VZ4

Podle práce [10] má zásadní vliv na špičkové zatížení v dynamice tzv. iniciátor nárazu Obr. 38. Jde o součást, která trubku zachycuje proti vybočení při inicializaci nárazu. Její druhou funkcí je inicializace poškození trubky. Materiálem iniciátoru byl hliník EN 754-3 obrobený na soustruhu. Dalším způsobem ovlivňujícím nástup počáteční síly je zkosení na vrcholu trubky. První kroky návrhu tedy směřovaly ke kvazi-statickým testům, vedoucím k ověření vlastností trubek v tlaku a zkoumáním vlivu iniciátoru.

Cílem návrhu bylo dosáhnout optimální kombinaci skladby trubek tak, aby pohltily energii **7350 J** na maximální délce **195 mm**. A nepřesáhly průměrnou maximální sílu **37.7 kN** vypočtenou dle Rov. 10.



Obr. 38 – Iniciátor

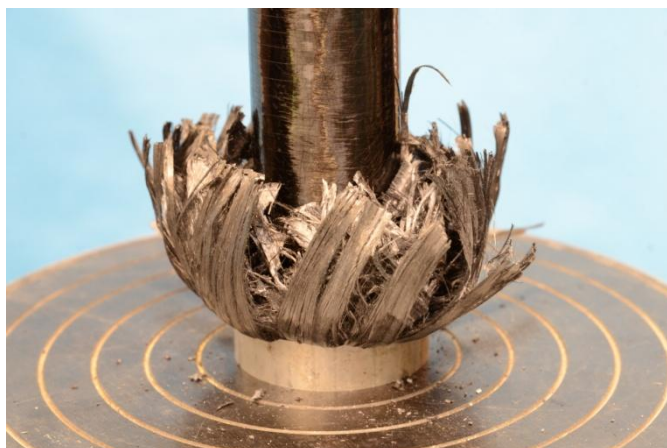
7.1.1 Kvazi-statické zkoušky

Série tlakových zkoušek byla provedena ve spolupráci s Ústavem pružnosti ČVUT. K dispozici byl stroj FPZ/100, který je ovládán přes pohybové šrouby a vyvodí maximální zatížení 100 kN. Tlaková zkouška byla provedena na vzorcích dle Tab. 3. Rozdíl mezi jednotlivými vzorky byl ve zkosení inicializační hrany. K několika variantám zkosení byly odzkoušeny čtyři typy iniciátoru lišící se rádiusem a uložením trubky na funkční části iniciátoru.

Výsledek kvazi-statického testu byla hodnota střední nárazové rychlosti, podle které se navrhovala skladba. V Tab. 3 jsou uvedeny kombinace testovacích vzorků.

Vzorek	Počet trubek	Délka [mm]	Zkosení [°]	Rádus iniciátoru R [mm]	Uložení trubky
VZ4_1	1	70	0	0	s vůlí
VZ4_2	1	70	45	2	s vůlí
VZ4_3	1	70	45	3	s vůlí
VZ4_4	1	70	45	0	s přesahem
VZ4_5	4	2x100; 2x70	0	0	s vůlí
VZ4_6	4	2x100; 2x80	45	2x R2(100mm); 2x R0 (80mm)	s vůlí

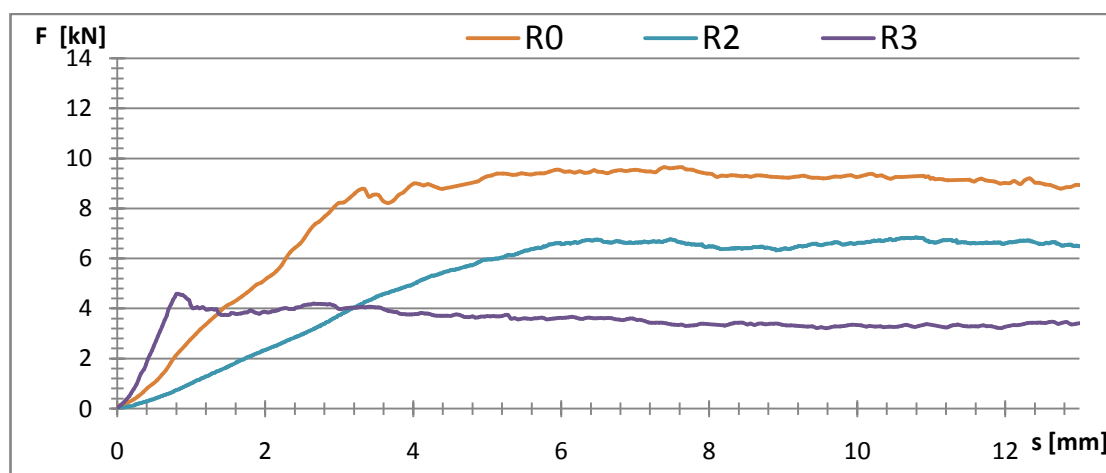
Tab. 3 - Skladba vzorků



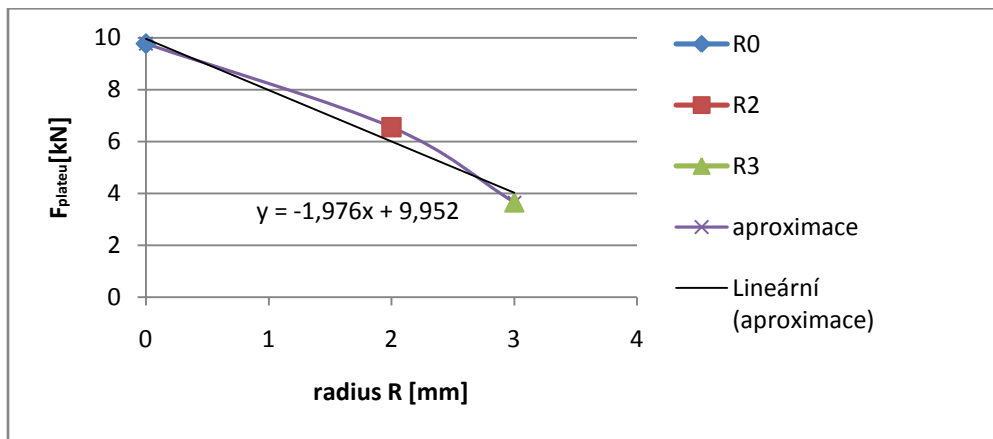
Obr. 39 - Charakteristický průběh tlakové zkoušky vzorku VZ4_1

Vliv iniciátoru

První sada vzorků VZ4_1 – VZ4_4, byl test pouze jedné trubky, na které byl zkoumán vliv iniciátoru. Na základě těchto dat byly vyhotoveny skladby maximálně čtyř trubek pro zjištění vlastností celku. Trubky dle testů vykazují typickou poruchu ohybem lamin, kde dochází k vytvoření charakteristické koruny viz Obr. 39. Vliv rádiusu iniciátoru ukázal značný vliv na střední nárazovou sílu a tato závislost patrna na Graf. 7. Z měření lze odvodit, že pro rádiusy do 3 mm existuje lineární závislost, mezi rádiusem a střední nárazovou silou. Tuto závislost popisuje lineární aproximace na Graf. 8. Rádus také ovlivňuje směrnici náběhu síly. Lineární závislost však neplatí pro větší rádiusy. Podle trendu křivky by trubka o rádiusu 5 mm nepřenesla žádnou sílu, což ukazuje na nepřímou úměrnost při větších rádiusech, než 3 mm.



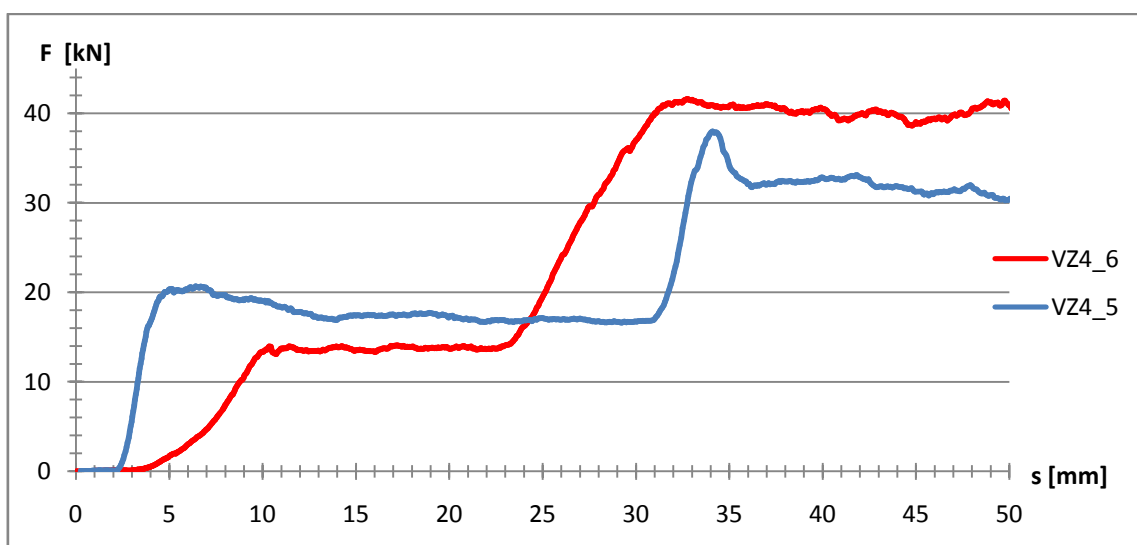
Graf. 7 - Vliv iniciátoru na střední nárazovou sílu



Graf. 8 - Lineární závislost střední nárazové síly a rádiu iniciátoru

Měření na jedné trubce ukazuje kromě závislosti na geometrii i závislost na uložení trubky a iniciátoru. Při uložení s přesahem vykazovala trubka o 22% vyšší hodnotu střední nárazové síly. Kompozitní trubky VZ4 mají toleranční pole ±0.1 a proto nelze přesně určit daný rozměrový obvod a vytvoření podobné závislosti i na uložení. Tím, že reálný test prokázal navýšení střední nárazové síly potvrdil teorii D. Hulla viz Kapitola 4.8, který řekl, že střední nárazová síla závisí na síle k iniciaci delaminační trhliny a tření mezi impaktorem a úlomky.

Následně byly ověřeny vlastnosti skladby několika trubek, především předpoklad, že hodnoty F_{plateu} lze pro návrh deformační energie trubky násobit dle počtu trubek. Na testovaných vzorcích VZ4_5 a VZ4_6, byly v úseku 0-30 mm (u VZ4_6 0-20 mm) deformovány dvě trubky a poté byly deformovány trubky čtyři. U vzorku VZ4_5s rádiusem R0 platí lineární násobek střední nárazové síly. U vzorku VZ4_6 to již neplatí díky tomu, že dvě delší trubky měly rádius na iniciátoru R2. Vzorek VZ4_5 vykazoval špičky síly při náběhu deformace, tyto špičky se při dynamickém ději několikanásobně zvětší a mohou přesáhnout maximální dovolenou deceleraci 40g. Vzorek VZ4_6 byl navržen tak aby byly špičky odstraněny. Bylo přidáno zkosení 45° na hraně trubky, které vyhladilo průběh křivky. Tvar křivky vzorku VZ4_6 je žádoucí pro dobrou odezvu v dynamice. Výsledky zkoušek tlakem jsou shrnuty v Tab. 4.



Graf. 9 - Tlaková zkouška skladby čtyř trubek

7.1.2 Návrhové výpočty

Po kvazi-statických testech na jednotlivých trubkách, již známe parametry pro jednotlivé geometrie impaktoru a trubky jako takové. Tyto hodnoty jsou vyneseny v Tab. 4 a lze na jejich základě dimenzovat množství trubek potřebné pro pohlcení 7350J energie. Zároveň byly adekvátně dopočteny hodnoty decelerace vůči referenční hmotnosti vozíku dle pravidel $m=300\text{kg}$ Rov. 10.

Vzorek	F_{plateu} [kN]	a_{avg} [g]
VZ4_1	9.77	3.3
VZ4_2	6.55	2.2
VZ4_3	3.65	1.3
VZ4_4	12.4	4.2
VZ4_5	15.2 (2 trubky)	5
	31.1 (4 trubky)	10.4
VZ4_6	14.6(2 trubky)	4.9
	39.8 (4trubky)	13.5



Tab. 4 - Výsledky kvazi-statických testů

Obr. 40 - Skladby P-03 (v popředí) P-02 (v pozadí)

Na základě těchto zkoušek byly navrženy dvě skladby trubek. Cílem bylo vyvarování se počáteční špičky síly, což znamenalo odstupňování délek trubek. Výpočet energie byl dle rovnice Rov. 12, kde je střední nárazová síla F_{plateu} vynásobená deformovanou vzdáleností. V Tab. 5 je uvedena délka skladby, deformace tj. délka deformace skladby. Dále je kontrolováno průměrné zpomalení [g] a rezerva od hraniční vzdálenosti impaktní přepážky. V této rezervě je kalkulována i výška iniciátoru 14mm, před kterou by se měl impaktor zastavit. Verze P-02 je optimističtější a předpokládá vyšší počáteční špičku síly, základem je 5 trubek VZ4. Naopak druhá verze předpokládá odchylky od naměřených hodnot kvazi-statických zkoušek a vychází z koncepce 6ti trubek.

P-02				
Skladba	Délka [mm]	Deformace [mm]	F_{plateu} [kN]	Energie [J]
2xVZ4_R2	195	5	14.6	73
2xVZ4_R0;2xVZ4_R2	190	5	31.1	229
3xVZ4_R0;2xVZ4_R2	185	185	40.9	7790
průměrné zpomalení [g]				9.8
deformace [mm]				184
rezerva od impaktní přepážky [mm]				26
P-03				
Skladba	Délka [mm]	Deformace [mm]	F_{plateu} [kN]	Energie [J]
2xVZ4_R0	195	10	15.2	152
4xVZ4_R0	185	25	31.1	930
4xVZ4_R0;2xVZ4_R2	160	160	45.7	8243
průměrné zpomalení [g]				10.4
deformace [mm]				179
rezerva od impaktní přepážky [mm]				31

Tab. 5 - Návrh skladby deformačního členu

7.2 Dynamická zkouška

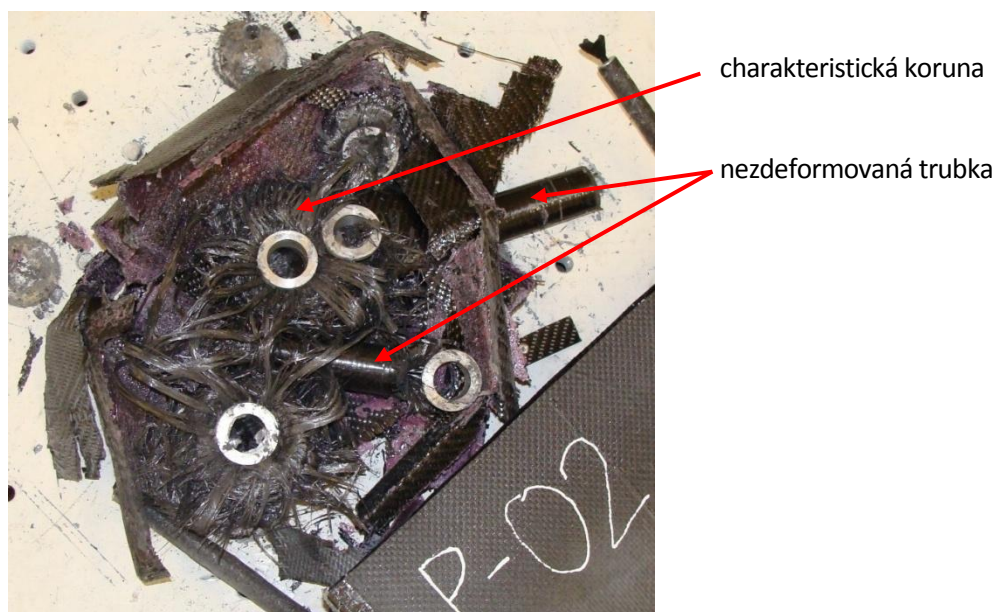
Dynamická zkouška byla provedena na půdě německé univerzity v Drážďanech. Metoda zkoušení byla pádovou zkouškou s hmotností závaží 300kg a pádové výšce 2.5 m. Při této konfiguraci byla rychlost v okamžiku dopadu 3.6 m/s a energie při nárazu 7363 J. Na testovacím přípravku bylo uchyceno i přítlačné křídlo, kvůli prokázání, že špička zrychlení nepřekročí 40g.

Neznámým faktorem před dynamickým testem, který nelze získat z kvazi-statických zkoušek byla stabilita ve vzpěru. Na délce 200 mm hrozí, že nastane katastrofická porucha struktury a deformační člen nepohlí žádnou energii. Druhým problémem byla kolmost nárazu. Díky malému průměru trubky, 26 mm, hrozí vybočení z osy nárazu a to by mohlo zapříčinit dysfunkci absorbéru.

P-02

Vzorek byl složený z pěti trubek různých délek viz Tab. 5. U této skladby se počítalo s větší špičkovou silou a deformací těsně k impaktní přepážce. Průběh deformace je patrný na Graf. 10. Na první pohled je zřejmé, že deformační prvek zcela nepohltil nárazovou energii a impaktor zasáhl impaktní přepážku. To způsobilo silovou špičku na konci deformace a díky této špičce se deformační člen dostal přes dovolené maximální zrychlení 40g. Výsledky dynamické zkoušky jsou shrnuty v Tab. 6. Zjištění co se dělo v průběhu deformace uvnitř prvku přinesl vysokorychlostní videozáznam spolu se zbylými úlomky. Z úlomků bylo zjištěno, že ve většině trubek byl vyvolán správný mód poruchy - ohybem lamin a delaminací vrstev. Tato porucha vyvolala charakteristickou korunu, která se na třech trubkách linula po celé její délce.

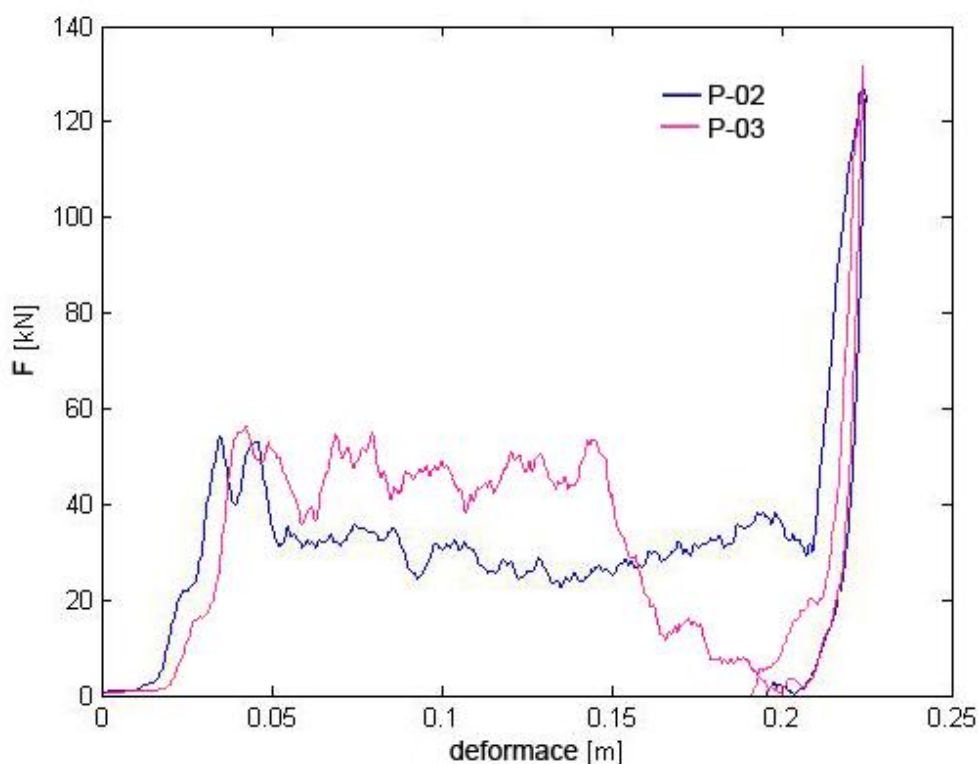
Zbylé dvě trubky byly deformovány do 1/3 délky a následně vybočily z osy nárazu. Nepřenášely tedy žádnou sílu a deformační prvek neměl dostatečně velkou hodnotu střední nárazové síly na to, aby pohltil energii 7350J. Příčina vyosení mohla být způsobena průhybem impaktní desky. Na video sekvenci je patrné, že hliníková impaktní deska o tl. 4mm se na krajích elasticky zdeformovala cca o 5 mm, ale její deformaci ve středu nebylo možné změřit. Síla byla do desky zanesena prostřednictvím iniciátorů a zatížení tak bylo distribuováno velmi lokálně.



Obr. 41 - Deformace deformačního prvku P-02

P-03

Vzorek P-03 měl podobný průběh jako P-02. Jelikož při první zkoušce se reprezentativní část rámu monopostu zdeformovala a impaktní přepážka vzorku P-03 neměla podporu po celé rovině. Při počátečním nárazu se skladba P-03 chovala mnohem lépe než P-02 a na průběhu v Graf. 10 není patrna žádná počáteční špička síly. Do deformace 125 mm skladba vykazovala mnohem vyšších hodnot střední nárazové síly, která by byla dostačující k pohlcení energie. Následně však došlo k nerovnoměrnému prohnutí impaktní přepážky a z progresivního módu poruchy se stal katastrofální. Trubky byly vyoseny a deformační prvek ztratil veškerou schopnost absorpce energie, dokud impaktor nenarazil do impaktní přepážky. Tím opět překročil dovolený limit pro maximální zpomalení 40g.



Graf. 10 - Průběh pádové zkoušky

7.3 Závěr

Výsledky zkoušky shrnuje Tab. 6. Zkouška nebyla úspěšná z důvodu přesáhnutí stanoveného limitu maximálního zpomalení o 1%. Problémy, které evidentně zapříčinily dysfunkci obou vzorků, byly zhodnoceny v předchozí kapitole. Ze závěrů lze konstatovat, že hodnoty F_{plateu} pro statický a dynamický děj se shodují, tak jak uvedla práce V. Kulíška [10]. U vzorku P-02 byla neshoda zapříčiněná tím, že se síla nepřenášela přes všechny trubky, tak jako v návrhovém výpočtu. Hodnota SEA byla vypočtena z pohlcené energie pouze uhlíkovými trubkami do okamžiku nárazu impaktoru. Jako hmotnost byla brána hmotnost pouze uhlíkových trubek.

Toto řešení deformačního členu je velmi výhodné z hlediska hmotnosti. Deformační člen vážil pouhých **300g** (pěna 550g) a z hlediska návrhu bylo ověřeno, že lze trubky navrhovat dle kvazi-statických zkoušek. Hodnota SAE vyšla na 50% udávané hodnoty u uhlíkového kompozitu s termosetickou maticí.

Výsledky testů neumožnily použití deformačního prvku na monopostu FSE.03 jen o několik g. Další vývoj prvku již nebyl možný z důvodu hraničního termínu pro odevzdání dokumentů na závody a náročné přípravy fyzické zkoušky. Použita tedy byla osvědčená polyuretanová pěna. Trubky jsou však dobrým řešením deformačních prvků a ukázaly, že dovedou absorbovat mnoho energie při správné konfiguraci. Pokud by měl nastat další vývoj trubek, je nutné zajistit lepší stabilitu proti vyosení, buď jejich svázáním, či zvětšením průměru.

Vzorek	a_{avg} [g]	a_{max} [g]	$E_{uhlík}$ [J]	F_{plateu} [kN] dyn	F_{plateu} [kN] stat	Hmotnost [g]	SEA [kJ/kg]
P-02	10.4	43.3	6235	32.3	40.9	290	52.8
P-03	9.21	44.7	5623	43.5	45.7	309	43.6

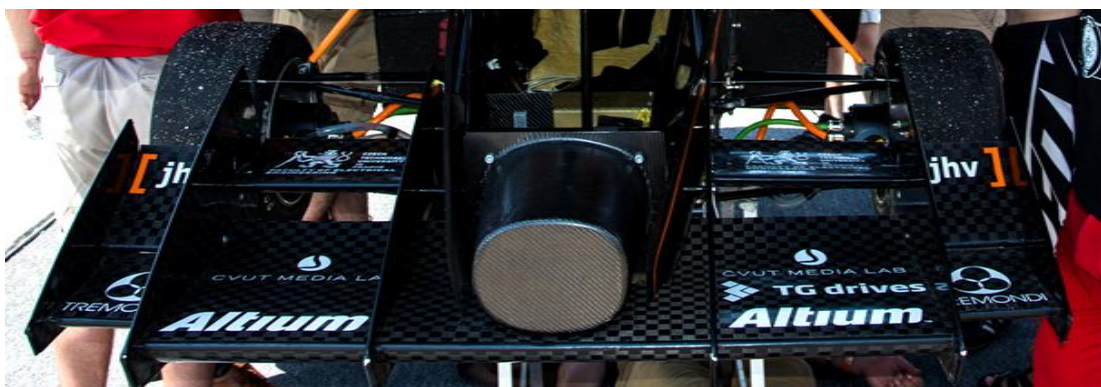
Tab. 6 - Výsledky dynamických testů

8 Deformační prvek FSE.04x

Po neúspěšném pokusu s kompozitními trubkami byla na řadě změna koncepce. Největším problémem u trubek bylo zajištění stabilní deformace. Jejich průměr byl relativně malý, a proto deformační prvek nefungoval zcela spolehlivě. Bylo tedy nutné zvětšit jeho rozměry.

Nejideálnějším případem poruchy absorbující energii je křehké odlamování, typické pro termoplastické matrice. Tento mód poruchy se projevuje pouze u dostatečně tuhých konstrukcí, které nevykazují velké elastické deformace. Problémem s kompozitními strukturami je, že velmi často selžou při ztrátě stability ve vzpěru. Vzpěrová tuhost je úměrná pevnosti v ohybu a to byl impuls pro využití sendvičové koncepce. Zároveň jde samozřejmě a nižší hmotnost dílu.

Pro tento účel bylo vhodné, aby byl deformační člen vyrobitelný za použití strojů v halových laboratořích ČVUT. Byla tedy zvolena metoda kontaktní laminace s pěnovým jádrem, které lze dobře tvarovat. Použití voštiny bylo zavrhnuto z důvodů pracnosti výroby a malých zkušeností se zaručením dobrého rozhraní mezi jádrem a potahem. U pěn je již technologie odladěna a lze zaručit dobré spojení jádra. Materiál jádra je tedy **Divinycell H60**, jako potah bylo zvoleno uhlíkové vlákno **Hexcel 43200 Twill 2x2 3K 200g/m²**. Tato tkanina je v keprové vazbě 2/2 se třemi tisíci vlákny v jednom pramenu o gramáži 200g/m². Technologie kontaktní laminace byla vybrána z důvodů velkých zkušeností s výrobou a také vyšší pevnosti ve stříhu (smyku) než u křehkých prepregů.



Obr. 42 - Deformační prvek na formuli FSE.04x

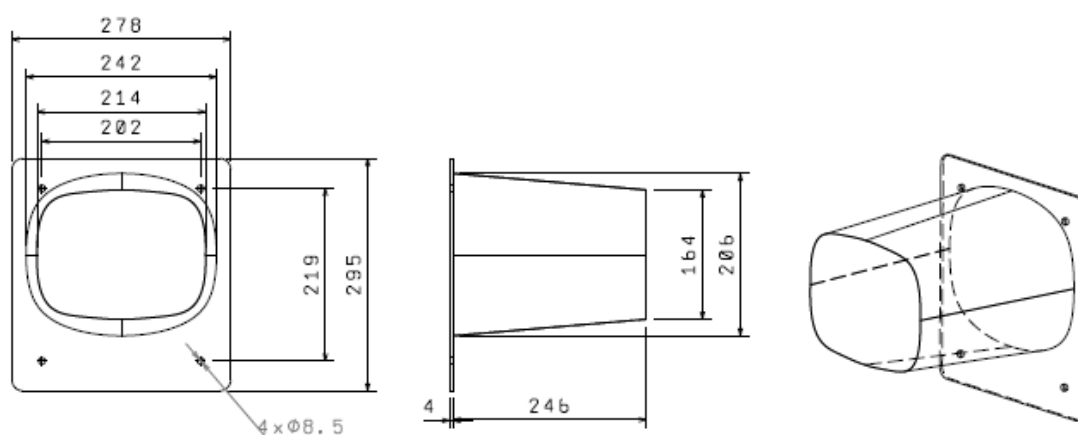
8.1 Návrh

Cílem návrhu bylo získat tvar deformačního prvku, který nebude mít koncentrátoři smykových poruch, aby nedošlo k roztržení deformačního členu po obvodu. Tvar tedy nebude mít hrany s malým rádiusem ($<5\text{mm}$). Geometrií vhodných pro absorpci energie je několik typů. Od otevřených profilů k rovinným deskám, až po uzavřené profily. U každého tvaru lze vyvolat trochu odlišný mechanismus poruchy a ne vždy lze říct, že jde o progresivní mód poruchy. Pokud by deformační člen vypadal jako kvádr minimálních rozměrů stanovených pravidly ($200\times 100\times 200\text{ mm}$) porucha by se začala šířit po hranách, kde by docházelo ke smykovým poruchám, a odlamovala by se celá stěna. U této konstrukce by bylo velmi pravděpodobné, že se stěny díky nízké vzpěrové tuhosti propadnou dovnitř a nastane katastrofální porucha. Nejstabilnější šíření zajišťují kruhové průřezy. Porucha se šíří v podobě koruny, tak jako tomu bylo u testovaných trubek. Proto bylo rozhodnuto o výchozím tvaru geometrie uzavřeného profilu s oválným průřezem opisujícím vrcholy obdélníku ($200\times 100\text{ mm}$).

Navýšení stability ve vzpěru lze dosáhnout i geometrií a to konkrétně kuželovitostí. Předěšlé výzkumy [4] uvádějí, že kuželovitost má velký vliv na střední nárazovou sílu. Ta se liší o 12% pro kuželovitosti 5° a 15° . Čím je úhel ostřejší tím víc síly dokáže geometrie přenést. Při větších úhlech dochází k většímu podílu lamin prolomených dovnitř geometrie a to vyvolává nižší třecí plochu mezi impaktorem a fragmenty. Střední nárazová síla tedy klesá. Pro podporu stability tedy byla zvolena kuželovitost 5° . Výsledný geometrický tvar je kužel s oválným průřezem.

Konstrukčním omezením při návrhu bylo rozvržení ostatních částí vozu. Konkrétně umístění kapoty a předního přítláčného křídla. Tento prostor vymezil maximální délku a maximální poloosy oválu. Zejména díky přítláčnému křídlu nemohl být deformační člen umístěn uprostřed impaktní přepážky, ale musel být vyosen v kladném směru osy Z (standardizovaný systém souřadnic pro automobily) na kontakt s kapotou.

Maximální i minimální rozměry deformačního prvku byly dány zástavbovými rozměry. Z těchto rozměrů vyšla i délka absorbéru 246 mm . Pokud by měl ovál minimální délku 200 mm , nebylo by možné dodržet kuželovitost 5° z důvodů minimálního rozměru kvádrů daném pravidly.



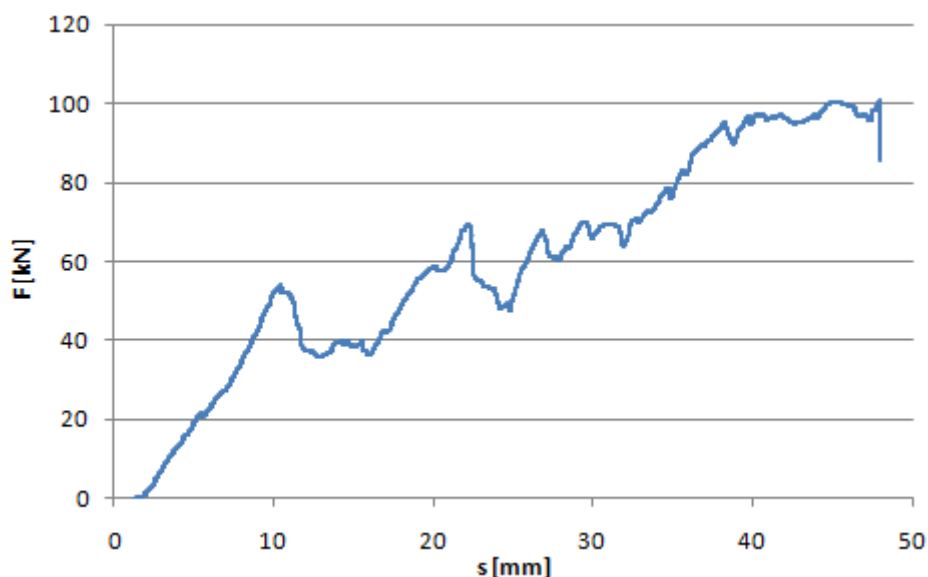
Obr. 43 – Rozvržení deformačního členu FSE.04x

8.1.1 Kvazi-statická zkouška

Návrh skladby laminátu nebylo možné provést bez znalosti chování deformačního prvku jako celku. Geometrický tvar je natolik specifický, že lze obtížně predikovat jeho chování. Pro identifikaci těchto vlastností byla provedena kvazi-statická zkouška na stroji FPZ/100.

Podle získaných zkušeností a rešerše, byla určena experimentální skladba testovacího vzorku. Ta měla po celé délce Divinycellové jádro o tloušťce 4 mm a v jednotlivých segmentech různou skladbu symetricky složeného laminátu. V I. segmentu o délce 35 mm od čela absorbéru byly položeny symetricky čtyři vrstvy pod nulovým úhlem vzhledem k ose nárazu, tj. 0/0/jádro/0/0. Další skladba v segmentu II o délce rovněž 35 mm měla vrstvu navíc a celkem tedy 6 vrstev, tj. 0/0/0/jádro/0/0/0. V posledním segmentu III o délce 176 mm bylo symetricky osm vrstev 0/0/0/0/jádro/0/0/0/0.

Postupem návrhu bylo zjištění napětí v tlaku pro jednotlivé segmenty. Pro zjednodušení se sendvič bude uvažovat jako homogenní materiál. Při tomto předpokladu se dopouštíme nepřesnosti, ale pro návrh tato hodnota postačí. Jde o to získat závislost tlakové síly vztažené na tloušťku skladby. Tento způsob dimenzování platí pouze pro vzorky s tloušťkou jádra 4 mm. Závislost je totiž přímo úměrná tloušťce, ale pokud změníme rozměr jádra, silová odezva se nebude chovat přímo úměrně.



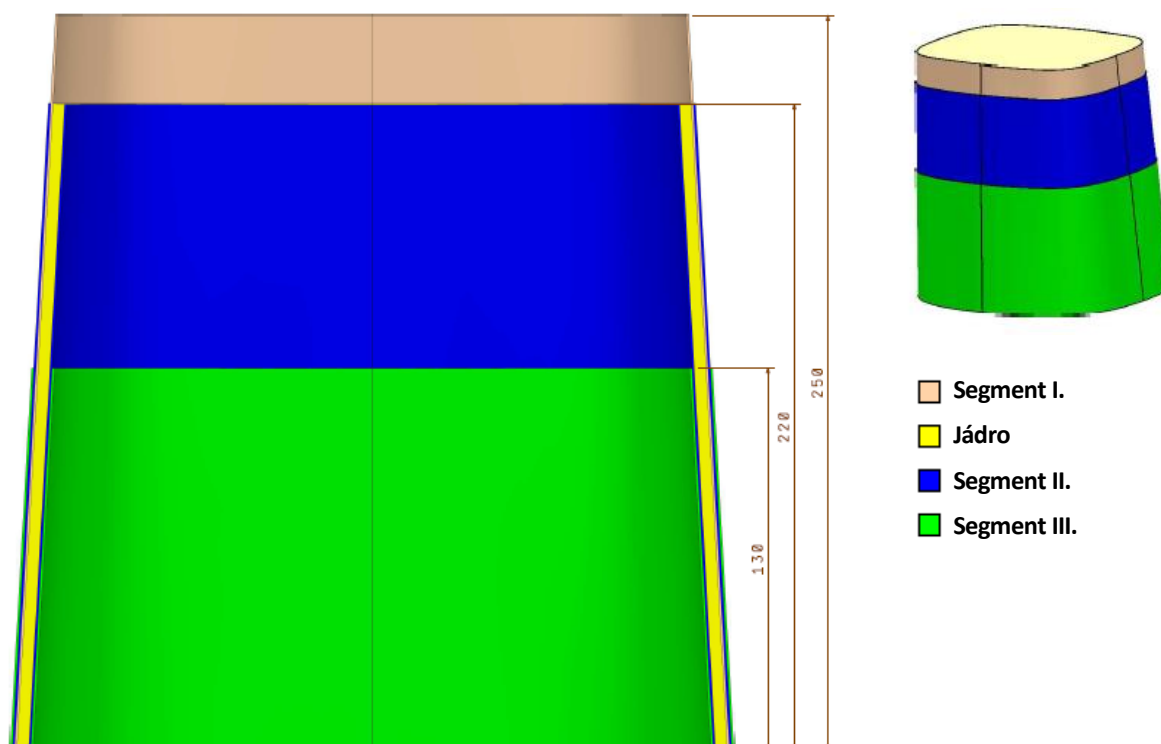
Graf. 11 - Výsledek kvazi-statické zkoušky

Při zatěžování sendvičové konstrukce došlo k progresivní poruše. Z úlomků je patrné, že byl vyvolán mód poruchy delaminací s následným křehkým odlamováním. Tento mód se progresivně šířil, až do deformace 47 mm, kde vzrostla síla na 100 kN, což je limit zkušebního stroje. V této chvíli byla zkouška přerušena. Deformace zborčila první dva segmenty se 4 a 6 vrstvami. Ze zkoušky se následně vyhodnotila střední nárazová síla pro každou z oblastí a vypočetlo se napětí. Výsledkem zkoušky bylo také konstatování, že deformační člen nejevil žádné známky nestability ve vzpěru. To je způsobeno tím, že síla pro ztrátu stability je daleko vyšší než síla, která vyvolá příslušný mód porušení. Na vzorku bylo po zkoušce patrné nerovnoměrné zatížení po obvodu vzorku. Impaktor tlačil na vzorek pod úhlem a jedna strana průřezu byla

stlačená více. Lze to přisuzovat, chybě při pokládání lamin, kde na místě překladu tkaniny vznikne větší počet vrstev a místo je tak lokálně vyztuženo. Druhou příčinou mohl být odlišný úhel vláken, jelikož při výrobě se pokládala do negativní formy tkanina s obdélníkovým nástřihem. Vlivem kuželovitosti se při kladení vláken stane, že se vlákna jedné straně natočí pod jiným úhlem. Přesný rozvin této plochy je obdélník s rádiusem. Laminy byly položeny symetricky na obě strany, aby se tato nepřesnost výroby reprodukovala na obou stranách. Třetí a nejpravděpodobnější příčinou vzniku nerovnoměrné deformace mohlo být vyosení impaktoru, který neroznesl zatížení rovnoměrně.

8.1.2 Skladba

Výsledkem kvazi-statické zkoušky bylo napětí při šíření poruchy na daném vzorku. Toto napětí však není stejné i při dynamickém typu zatížení. Podobně jako poměrné prodloužení lze u materiálu určit hodnotu poměrného prodloužení v závislosti na čase angl. strain-rate. Tento parametr má tedy jinou hodnotu při dynamickém módu poruchy. Proto nelze podobně jako u trubek vzít střední nárazovou sílu (napětí) a podle něj dimenzovat. Z obdobných prací lze vyčíst údaje, že hodnoty napětí se v dynamice a kvazi-staticce liší o 20-50%. Přesně však tuto hodnotu nelze vyčíslit, jelikož se často objevuje jiný mód poruchy. Metodou zpětného inženýrství lze návrh potvrdit, či vyvrátit. Kvazi-statická zkouška tedy pro návrh určila, v jakém rozsahu hodnot se deformace pohybuje. Z tlakové zkoušky bylo odečteno napětí při poruše přenásobené dynamickým koeficientem s velkou bezpečností. Tento koeficient byl stanoven na hodnotu 0,5, který předpokládá nejhorší možný případ.



Obr. 44 - Řez deformačním prvkem rozděleným na segmenty skladby VZ2

Následně bylo dimenzováno odstupňování vrstev do jednotlivých segmentů, tak aby se nepřesáhlo průměrné zpomalení. Segmenty mají za cíl odstranit špičkovou sílu při nárazu. Zároveň by také měly zajistit vyšší stabilitu ve vzpěru, pokud by nastal průběh deformace, že by se odlamovaly jednotlivé segmenty. Orientace vrstev má vliv na chování prvku a z nabytých zkušeností se osvědčilo vlákna pokládat pod nulovým úhlem vůči ose zatížení. Takto je také položena většina skladby, kromě vnější vrstvy, která má orientaci 45° z důvodu lepší stability při odlamování fragmentů. Skladba byla také překontrolována z hlediska pohlcení nárazové energie.

Pro dynamickou zkoušku byly dimenzovány dvě verze skladby, verze VZ2 s předpokladem větší deformace. Verze VZ3 je konzervativnější a předpokládá tvrdší náraz s malou deformací. Skladba byla určena dle Tab. 7.

Délka deformačního členu má velké rezervy, bohužel ze zástavbových rozměrů a daných parametrů nelze deformační člen zkrátit. Pravděpodobně bude velká část členu nevyužita. Podle výpočtů by pro pohlcení energie stačily pouze dvě symetrické vrstvy (čtyři celkem) pokud by byly po celé délce deformačního členu. Problémem tohoto řešení je stabilita ve vzpěru. Velmi orientačně lze vypočítat dle Rov. 4 kritickou sílu pro ztrátu stability ve vzpěru rovinné desky. Tato síla je úměrná 59 kN a podle výsledků tlakové zkoušky by se mohl deformační člen dostat přes tuto hodnotu a ztratit stabilitu ve vzpěru. Proto byly navrženy skladby odstuňovány do jednotlivých segmentů. Při celkem 8 symetrických vrstvách je kritická síla pro ztrátu stability již 71kN. Samozřejmě jde o výpočet pro rovinnou desku a pro oválný průřez bude tato síla o něco větší.

Skladba VZ2							Hmotnost 515g		
napětí v tlaku - statika		26 MPa							
dynamický koeficient		0.5							
segment	vrstvy	jádro [mm]	délka [mm]	S [mm ²]	Energie [J]	F _{plateu} [kN]	a _{prum} [g]		
I.	4	0	30	495	193	6	2.2		
II.	6	4	90	3266	3821	42	14.4		
III.	8	4	130	3772	6375	49	16.7		
deformace [mm]		188							
a_{prum} [g]		15.5							

Skladba VZ3							Hmotnost 568g	
segment	vrstvy	jádro [mm]	délka [mm]	S [mm ²]	Energie [J]	F _{plateu} [kN]	a _{prum} [g]	
I.	4	0	20	495	129	6	2.2	
II.	6	4	50	3266	2123	42	14.4	
III.	8	4	100	3772	4904	49	16.7	
IV.	10	4	80	4042	4203	53	17.9	
deformace [mm]		174						
a_{prum} [g]		16.3						

Tab. 7 - Skladba laminátu

8.2 Pádová zkouška

Pádovou zkoušku realizoval Ústav letadlové techniky ČVUT, který vlastní padostroj pro testování podvozků letadel. Pádová zkouška je omezena výškou padostroje a proto nemohlo být přesně docíleno podmínek vyžadujících pravidla o 300kg závaží a dopadové rychlosti 7 m/s. Padostroj dosáhne maximální výšky 1.75 m a dle Rov. 16 byla přepočítána hmotnost, aby bylo docíleno požadované energie. Hmotnost závaží byla 433.5kg i s deformačním členem a dopadová rychlost 5.85 m/s. Bohužel se pro tuto zkoušku nepodařilo zajistit video sekvenci, což omezuje studii průběhu deformace.

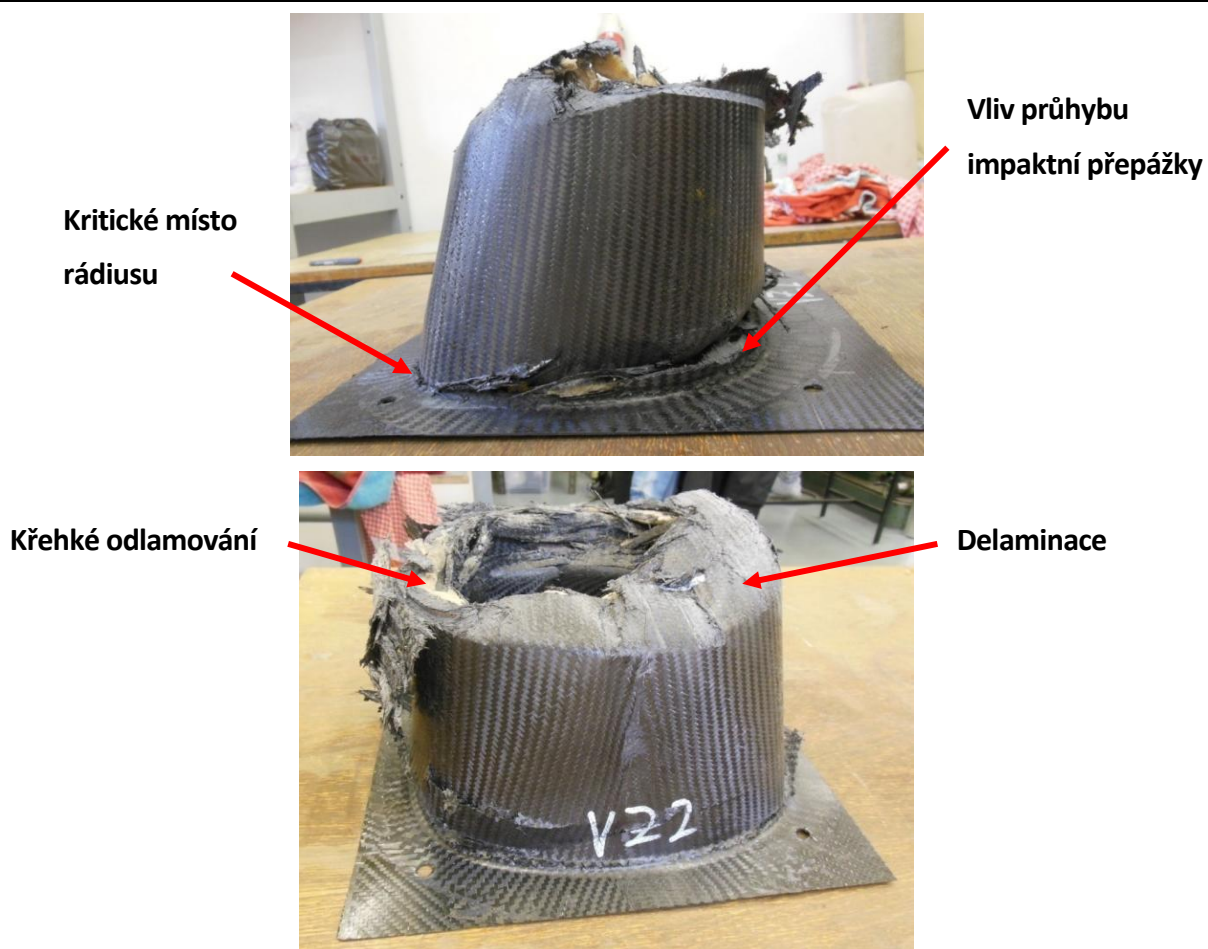
Zkouška se vyhodnocovala pomocí 3-osého akcelerometru PCB electronics s rychlostí snímání 25 kHz. Tento signál byl dekomponován A/D převodníkem National Instruments CompactDAQ a měřicí kartou 9234. Výstupem bylo zrychlení ve třech osách X,Y,Z závislé na čase snímání vzorku. Tento signál musel být následně importován do programu MATLAB a zde byly podle Kapitoly 5.1 dopočteny rychlosti, síly a posuvy deformačního členu.

8.2.1 Vzorek VZ2

Neprodleně po zkoušce bylo patrné, že v deformačním prvku byl vyvolán správný mód poruchy. Nenastala katastrofická porucha, jelikož výrazná část deformačního členu zůstala neporušena. Po prohlédnutí úlomků lze konstatovat, že nastaly dva typy poruchy.

Deformační prvek měl při výrobě dvě slabá místa. Tím jedním byl spoj pěnového jádra po délce prvku, kde vzniklo malinké zvrásnění uhlíku a tím pádem i větší smykové namáhání. Tato vada se však při deformaci neprojevila a druhým kritickým místem byl kontakt mezi impaktní přepážkou a deformačním členem Obr. 45. V tomto místě byl na negativní formě rádius a pěnové jádro nelze do laminátu vložit tak aby se opíralo o impaktní přepážku. Když tedy deformační člen byl zatížen tlakem, toto místo bude působit jako iniciátor poruchy. Jakmile se tento rádius zdeformuje na impaktní přepážku dosednou vrstvy s jádrem a deformace bude pokračovat se shora na vrstvách bez jádra, tak jak bylo predikováno.

Z testovaných vzorků je patrné, že se deformační prvek porušoval pod úhlem viz Obr. 45. Na obou testovaných vzorcích se shodně projevil jev, který pravděpodobně způsobilo prohnutí impaktní přepážky. Její deformaci v laboratorních podmínkách nešlo změřit, ale vzhledem k tomu, že ve chvíli největšího zatížení se do ní opírala síla 90kN, lze počítat s elastickou deformací do desítky milimetrů. Maximálně povolených je 25 mm. Deformační člen na impaktní desce není umístěn symetricky dle Obr. 43. V horní části je impaktní přepážka podepřena trubkou rámu a uprostřed nemá podporu. Její průhyb zapříčinil to, že se deformační člen vychýlil a na každé polovině má odlišný mód poruchy. Na tužší horní polovině je patrná delaminační koruna s potahy vyhnutými směrem dovnitř díky kuželovitosti a na druhé straně lze pozorovat lokální ztráty stability a křehké odlamování potahu. Deformační člen má patrné poruchy na horní i spodní straně, což nebylo cílem. Cílem byla iniciace porušení na horní straně, kde deformační člen nemá jádro. Vzhledem k jeho vychýlení neměl daleko ke ztrátě stability a katastrofální poruše. Vyhodnocení dat zrychlení ukazuje Graf. 12, který po profiltrování dovoleným filtrem CFC60 potvrzuje úspěšnost zkoušky. Viz Kapitola 8.3.



Obr. 45 - Nesymetrická deformace vzorku VZ2

8.2.2 Vzorek VZ3

Skladba vzorku VZ3 byla navržena pro horší případ pevnosti materiálu. Jak se při testu ukázalo, průběh deformace byl velmi podobný jako u vzorku VZ2. Tím, že vzorek měl větší počet vrstev, neprojevilo se tak markantně kritické místo u kontaktu s impaktní přepážkou a vychýlení z osy bylo pod menším úhlem. Tím, že vychýlení nebylo patrné, objevil se progresivní mód poruchy po celém průřezu. Tento mód byla delaminace s křehkým odlamováním. Z naměřených dat bylo odečteno, že deformační člen přesáhl maximální dovolené průměrné zpomalení a tím nesplnil požadavky pravidel.



Obr. 46 - Progresivní porucha delaminací s křehkým odlamováním vzorku VZ3

8.2.3 Vzorek VZ4

Vzorek VZ4 byl testovacím vzorkem skladby bez sendviče. Na tomto vzorku byly jasně demonstrovány přednosti sendvičových struktur. Skladba vzorku čítala 8 vrstev, podobně jako u vzorku VZ2. Vrstvy byly odstupňovány po 20 mm od vrcholu, v pořadí 5-6-7-8 vrstev. Při testu došlo ke katastrofické poruše ve vzpěru. Zhruba do poloviny své délky deformační prvek fungoval velmi dobře a porucha se šířila křehkým odlamováním. V polovině délky však absorbér přestal pohlcovat energii, jelikož se roztrhl po obvodu a na fragmentech jsou vidět velké části potahu viz Obr. 47. Z měření není zaznamenán celý průběh zkoušky, jelikož nárazem impaktoru do impaktní přepážky se vibracemi akcelerometr zarušil a podařilo se zrekonstruovat pouze částečný průběh.



Obr. 47 - Katastrofická porucha vzorku VZ4

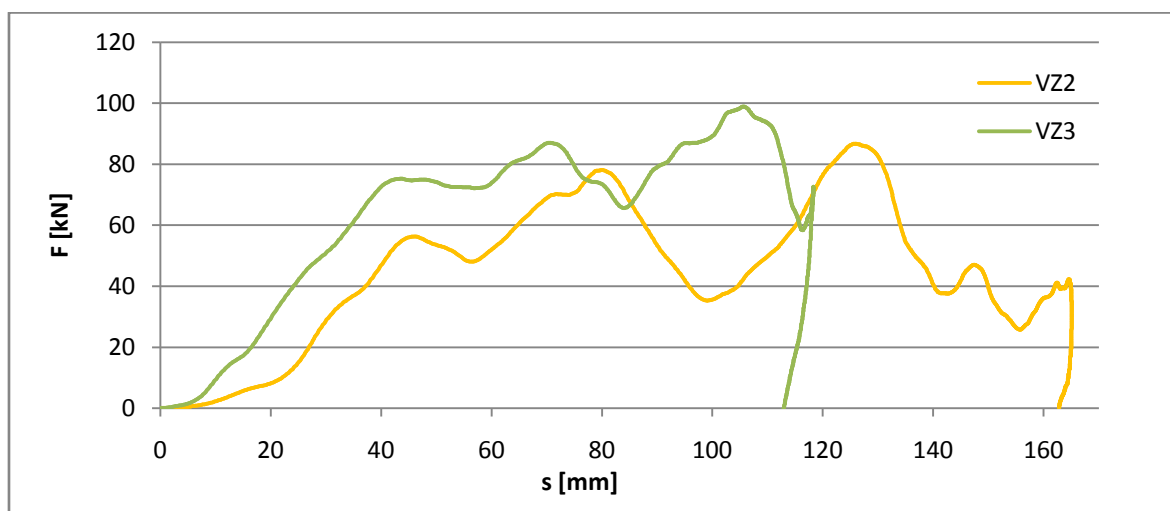
8.3 Vyhodnocení

Zkoumané deformační prvky vykazovaly podobné průběhy síly a deformace. Žádný z deformačních prvků nevykazoval typický průběh pro progresivní mód poruchy. Průběh vzorků VZ2 a VZ3 je charakteristický náběhem síly do deformace 43 mm, kde se objevila první lokální ztráta stability. Následoval mírný pokles síly a při deformaci 55 mm (lokálním minimu síly) opět začal deformační člen narůstat na síle. Podobné průběhy v první třetině deformace jsou přisouzeny podobné skladbě laminátu. Následně se vzorky VZ2 a VZ3 začaly odlišovat. Na vzorek VZ2 začala působit deformace na rozhraní impaktní přepážky a deformačního členu. Oba průběhy vykazují následnou ztrátu stability a masivní odlomení úlomku. Tento jev byl doprovázen globálním minimem síly. Po odlomení II. segmentu (6 vrstev na obou vzorkách) se impaktor začal zpomalovat nárazem na III. segment (8 vrstev). Tj. u vzorku VZ2 začala nabývat síla po 97 mm deformace, přičemž její segment III. začínal na 120 mm. Odchylka 23 mm byla způsobena vychýlením deformačního členu z osy. U vzorku VZ3 začala síla narůstat po 68 mm deformace, přičemž segment II. s 8 vrstvami začínal na 70 mm deformace. Odchylka je opět dána nepatrnou deformací na rozhraní impaktní přepážky a deformačního členu. Vzorky pak nabyly maxima síly, kde již byla deformační energie skoro zcela pohlcena.

Zajímavé jsou návrhové hodnoty kritické síly pro mez pevnosti ve vzpěru. V první části, kde nastala lokální ztráta stability (první vrchol) byla síla u vzorku VZ2 predikována dle Rov. 8 na 65kN a v realu došlo ke zborcení při 75kN. Což při jednoduchém analytickém výpočtu a tolika neznámých uspokojivý výsledek.

U vzorku VZ3 byla predikována síla 71kN a v realitě vzrostla na 85kN. Při statické zkoušce se tento jev neprojevil. Ze zkoušky bohužel nebylo možné pořídít videozáznam a proto se těžko odhaduje přesnou příčinu propadu síly. Dle úlomků je však nejpravděpodobnější tato varianta.

Potvrzení teorie podle D.Hulla, že na velikosti střední nárazové síly závisí tření mezi impaktorem a laminami potvrzuje Obr. 48, kde je vidět otlačení dopadové desky, která změnila drsnost povrchu nárazem. Výsledky shrnuje Tab. 8, kde jsou uvedeny hlavní parametry pro vyhodnocení dle požadavků pravidel FS. Podle těchto výsledků vyhověl vzorek VZ2 ve všech ohledech a vzorek VZ3 přesáhl maximální průměrné zpomalení o 2,5g.



Graf. 12 - Průběh dynamické zkoušky



Obr. 48 - Změna drsnosti povrchu na impaktoru



Obr. 49 - Porovnání deformací vzorků

8.3.1 Kvazi-statika vs. dynamika

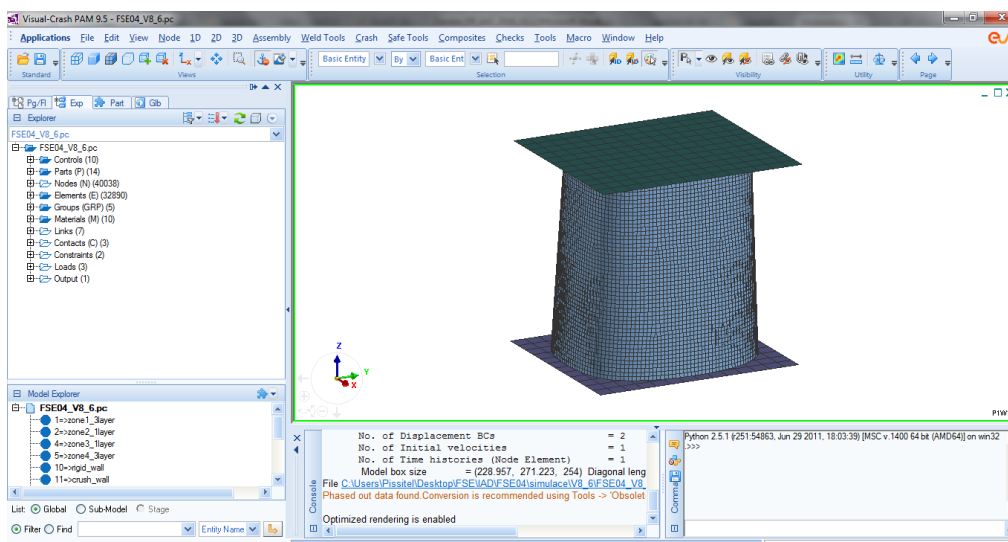
V Tab. 8 jsou uvedeny návrhové hodnoty, ke kterým se měl deformační člen přiblížit. Tyto hodnoty byly vypočteny na základě dynamického koeficientu, určeného empiricky na hodnotu 0.5. Při reálné zkoušce byl koeficient vyšší v průměru 0,7, což odpovídá 30% kvazi-statického napětí. Kvazi-statická zkouška je určena pouze pro získání informace, v jakém rozsahu hodnot se deformace pohybuje. V dynamice se objevila kombinace několika módů porušení, která z kvazi-statiky nebyla patrna. Návrh deformačních členů z kompozitního vlákna tedy vyžaduje složitější formu výpočtu, než je jednoduchá analytická metoda. Proto se práce vydala cestou reverzního inženýrství a vytvořením numerického modelu, kalibrovaného na reálnou zkoušku členu VZ2 viz Kapitola 8.4.

Vzorek	VZ2	VZ3
deformace [mm]	165	117
návrhová deformace [mm]	215	205
energie [J]	8144	7945
a_{prum} [g]	14.7	22.5
a_{max} [g]	30.5	34.4
σ_{dyn} [MPa]	15	22.5
SEA (kJ/celková hmotnost)	16	14

Tab. 8 - Výsledky dynamických zkoušek

8.4 Numerický model

Bylo zjištěno, že návrh pomocí jednoduché analytické metody příliš neodpovídá realitě. Pro lepší přesnost by se do výpočtu musely zahrnout ortotropické vlastnosti uhlíku a výpočet provést s využitím znalostí ABD matic klasické laminační teorie. Metoda návrhu dle MKP je metodou, kterou lze popsat chování módů porušení a predikovat nejslabší místa konstrukce. Již v úvodu byly zmíněny komerční softwary pro simulace dynamických dějů. Z rešerše byl vybrán program PAM-CRASH od společnosti ESI, který má implementovaný modul pro výpočty kompozitu.



Obr. 50 - Prostředí PAM-CRASH

8.4.1 Přístup modelování

Kompozitní struktury lze v MKP softwarech modelovat několika způsoby. PAM-CRASH nabízí manažera v kartě Composites (Layer Design Manager) spravujícího vlastnosti laminátu. Tento manager slouží pro přiřazování jednotlivých skladeb laminátů partům sestavených z shellových elementů. To znamená, že jeden z přístupů modelování kompozitu lze provést jako **2D SHELL** element, kterému se přiřazují vlastnosti lamin, jejich orientace a tloušťka. Jako jednu z vrstev lze definovat i pěnové jádro a výsledná skladba bude sendvičová konstrukce modelovaná pouze tenkostěnnými 2D SHELL elementy. Tento numerický model však nepostihuje mód poruchy delaminací. Následně lze u tohoto přístupu zvolit kritéria pro eliminaci elementů podle toho, zda-li selže jedna vrstva, všechny, vnější a vnitřní, či vrstva podél neutrální osy (pro sendviče). Výsledek ale nebude příliš odpovídat realitě, jelikož nedojde ke tvorbě úlomků vzniklých delaminací.

Druhým přístupem je modelování každé vrstvy jako prvek typu **3D SOLID** s vlastnostmi přidělenými z karty strukturálního materiálu. Jednotlivé vrstvy pak lze spojit prvky **TIED**, které simulují vlastnosti matrice. Jádro lze též řešit prvky typu 3D SOLID přiřazením vlastností pěny. Toto řešení je velmi komplikované z hlediska výpočetního času a nezaručuje dobrou stabilitu díky objemovým prvkům.

Třetí variantou modelování kompozitu se sendvičovou strukturou je kombinace dvou předchozích. Tedy jednotlivé laminy modelovány elementy typu SHELL s tím, že jeden shell reprezentuje jednu laminu. Laminy mohou být spojeny opět prvky typu TIED reprezentující matrici a pěnové jádro lze modelovat objemově typem SOLID. Objemový způsob je pro model pěny výhodnější, jelikož materiálové modely pro objemy mají více dostupných parametrů.

Pro simulaci deformačního členu VZ2, byla zvolena kombinace uvedených způsobů. Jednotlivé vrstvy lamin byly modelovány jako prvky SHELL spojené vazbou TIED. Vnější a vnitřní potah, který dle návrhu čítá dvě vrstvy, byl modelován přístupem přiřazujícím jednomu partu typu SHELL dvě vrstvy laminátu. Pěnové jádro bylo vymodelováno přes objemové prvky SOLID. Toto řešení lze považovat za nejlépe odpovídající realitě, kde je možné predikovat mód porušení lamin a celkové chování. Simulace však reprezentuje dokonalý výrobní postup deformačního členu a díky složitosti modelu nelze simulačně postihnout veškeré ovlivňující faktory. Proto již ze začátku bylo počítáno pouze s orientačním výpočtem, který bude velmi složité kalibrovat.

8.4.2 Materiálové modely

Pokud je rozmyšlen přístup tvorby modelu je nutné určit základní materiálové modely. Z těchto materiálových modelů je potřebné zjistit, jakými parametry se materiál definuje. Pro popis materiálových modelů uhlíkového vlákna v programu PAM-CRASH slouží dvě karty. Karta charakterizující strukturální materiál shellových elementů, tedy karta 131 – MULTILAYERED_ORTHOTROPIC_BI_PHASE. V ní je obsažena skladba vrstev (lamin). Ta se určuje pomocí ID jednotlivých vrstev a rovnou se v kartě nastavuje jejich tloušťka a orientace. Zároveň se v kartě zadává hustota materiálu, metoda integrace shell elementů (pro práci Belitscho-Tsai), metoda ochrany proti efektu přesýpacích hodin (hourglass - stiffness method

using elastic modulus), počet cyklů po kterých je element separován a kritérium eliminace prvku dle Tsai-Wu (eliminace prvku po tom, co všechny laminy selžou, či po tom, co selže pouze jedna).

Popis materiálových vlastností dané tkaniny nalezneme v kartě PLY. Zde je možné vybrat z 8 druhů typů tkanin. Roving, tkaninu, isotropní či anizotropní popis materiálu. Pro tuto úlohu je volen typ 7 Fabric Composite global ply model –popisující vlastnosti keprové tkaniny.

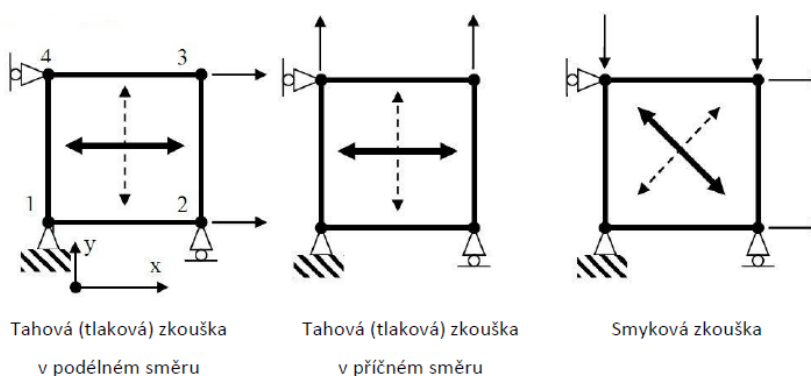
Materiálových modelů typu SOLID je pro pěnu několik. Nejpodobnější polyuretanové pěně Divinycell je model Crushable foam. Tento model je v programu implementován ve dvou verzích. Jako typ 2 Crushable foam a jako typ 21 Inelastic crushable foam. Oba materiály definují elasto-plastické vlastnosti. Typ 2 počítá s tenzorem napětí, což je stav napjatosti v každém bodě kontinua. Tenzor je rozložený na dvě složky objemovou deformaci a tvarovou deformaci (neboli deviátor deformace, popisující tvarovou změnu materiálu při konstantním objemu). V principu jde v modelu o určení plastického chování druhé invarianty tenzoru J_2 , určeného dle teorie Von Misses. Von Misses přepočítává jednotlivé napjatosti ve směrech ploch elementu do hlavního napětí. Plocha plasticity má v materiálovém popisu charakter válce dle Von Misses, který je zakončený hodnotou P_{fr} (pressure cutoff for tensile fracture), to znamená, že pokud je prvek namáhán tahem (tlakem) ztratí tuhost po dosažení této hodnoty.

Typ 20 bere v úvahu vzduch uvnitř buněk pěnového materiálu. Je založen na předpokladu, že materiál i vzduch přenášejí jistou sílu. Pěna se řídí plochou plasticity podle teorie Von Misses. Její odezva je symetrická jak při tahu i tlaku, tudíž nepotřebuje hodnotu P_{fr} . Tlak vzduchu se mění v závislosti na objemovém přetvoření elementu. Tento materiálový typ má méně konstant k jejich určení.

Pro spojení jednotlivých lamin se použije prvek typu TIED a k němu odpovídající materiálový model, splující vlastnosti matrice. Pro tento model byl zvolen materiál 303-SLINK_ELINK_TIED_2, kde byly vyneseny hodnoty tahového a smykového napětí pro šíření delaminace, energie šíření delaminace a napětí pro počátek delaminace. Tyto hodnoty byly převzaty z obdobných prací.

8.4.3 Kalibrace materiálových modelů

Materiálový model nemůže fungovat pouze na základě vypočtených konstant. Je potřeba ověřit chování těchto charakteristik zda-li odpovídají reálným průběhům zkoušky. Tyto vlastnosti se zkouší na jednoduchém výpočtu přes jeden elementární element o stejné velikosti hrany, jaká bude použita na modelu. S jinou velikostí elementu se mohou průběhy nepatrně lišit. Na Obr. 51 je znázorněno uložení elementů tak, aby reprezentovaly reálné zkoušky. Vliv tření je při validaci zanedbán.



Obr. 51 - Okrajové podmínky pro test jednoosého namáhání [4]

8.4.3.1 Pěna Divinycell H60

Kvazi-statika

Materiálový model typu 20 byl převzat z obdobné práce a kalibroval se pro použití v této práci. Model typu 2 byl vytvořen zcela od základu. Pro určení materiálového modelu pěny typu CRUSHABLE FOAM je potřeba několik parametrů, tyto parametry jsou udány v Obr. 52 a popsány níže. Jejich získání vyžaduje obsáhlý datasheet, či ještě lépe reálnou zkoušku.

MATER /	IDMAT	MATYP	RHO	ISINT	ISHG	ISTRAT	IFROZ		
BLANK	202	2	6E-8	3	2	0	1		
	AUXID1	AUXID2	AUXID3	AUXID4	AUXID5	AUXID6	QVM	IDMPD	AND
	0	0	0	0	0	0	1.	0	0
NAME	TITLE								
	divinycell H60								
G	K0	a0	a1	a2	Pfr	STRAT1	STRAT2		
0.02	0.0072	1.1E-6	0.	0.	-0.0009	0.	0.		
EPSlv1	P1	EPSlv2	P2	Q1	Q2	Q3			
0	0	0	0	0.	0.	0.			
EPSlv3	P3	EPSlv4	P4						
0	0	0	0						
EPSlv5	P5	EPSlv6	P6						
0	0	0	0						
EPSlv7	P7	EPSlv8	P8	BLANK	KSI	Fo			
0	0	0	0		0.5	0.			
EPSlv9	P9	EPSlv10	P10	STRAT3	STRAT4	STRAT5	STRAT6		
0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.		

Obr. 52 - Karta materiálového modelu CRUSHABLE FOAM

Důležitý parametr je na prvním řádku **RHO** – hustota materiálu a parametr **ISTRAT**, reprezentující tři možnosti výpočtů napětí pro určení strain-rate parametru, tedy vlivu rychlosti na deformaci. Pro začátek kalibrace se tento parametr ponechá nenastaven.

Třetí řádek je název materiálu a ve čtvrtém řádku hodnot jsou materiálové charakteristiky. **G** – modul pružnosti ve smyku, který lze vyjádřit podle rovnice rozšířeného Hookova zákona Rov.21, kde E je modul pružnosti, ν je Poissonova konstanta.

Rov. 21
$$G = \frac{E}{2(1-\nu)}$$

Ko – tedy modul objemové pružnosti. Jeho výpočet lze provést podle Rov. 22.

Rov. 22
$$K_o = \frac{E}{3(1-2\nu)}$$

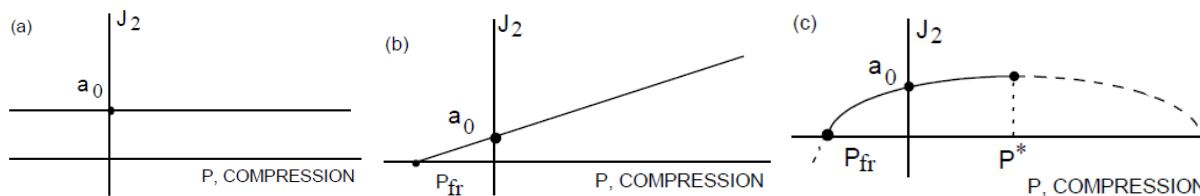
Dále se jedná o parametry **a0**, **a1**, **a2** tyto parametry jsou specifikované uživatelem podle reálné zkoušky. Parametry jsou konstantami druhé invarianty tenzoru napětí J_2 a řídí se Rov. 23. Tato rovnice udává plochu plasticity podle teorie Von Misses, která je zakončená dalším z parametrů **Pfr** – tedy limitním tlakem.

Rov. 23
$$J_2 - (a_0 + a_1 P + a_2 P^2) = 0$$

V Rov. 23 parametr P reprezentuje hydrostatický tlak. Tento tlak lze vypočítat jako 1/3 tenzoru napětí. V teorii plasticity přijmeme určitá zjednodušení a materiálový model říká, že hydrostatický tlak neovlivňuje mez kluzu. Parametry a0, a1 a a2 se liší podle reálné plasticity modelu. Tedy podle toho, co se při zkoušce

tlakem děje za mezí kluzu. Druhý invariant tenzoru napětí J_2 lze vypočítat, jako 1/3 druhé mocniny hlavního napětí v tlaku σ_y podle Rov. 24.

Rov. 24
$$J_2 = \frac{6y^2}{3}$$



Graf. 13 - povrch plasticity

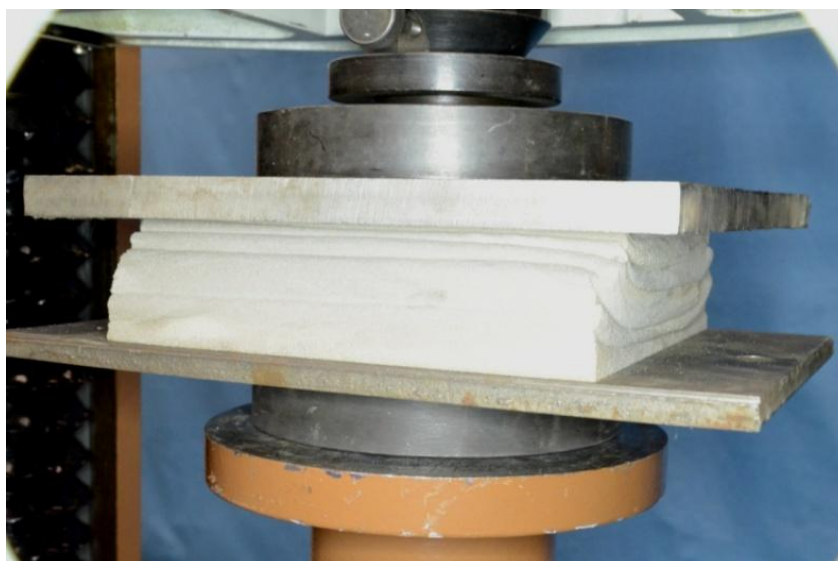
Graf. 13 zobrazuje chování plastické části materiálu. V případě a) se parametry a_1 a a_2 rovnají nule. V této konfiguraci lze a_0 vypočítat podle Rov.25. U případu b) je parametr a_2 roven nule a rovnice plasticity je přímka se směrnici dle parametru P_{fr} , hodnota a_1 se dále vypočte z Rov. 26. Případ c) kopíruje parabolu diagramu a žádný z parametrů není nulový. Jedná se o polynom třetího stupně odečtený přímo z grafu.

Rov. 25
$$\sigma_y = \sqrt{3 \cdot a_0}$$

Rov. 26
$$a_1 = \frac{a_0}{P_{fr}}$$

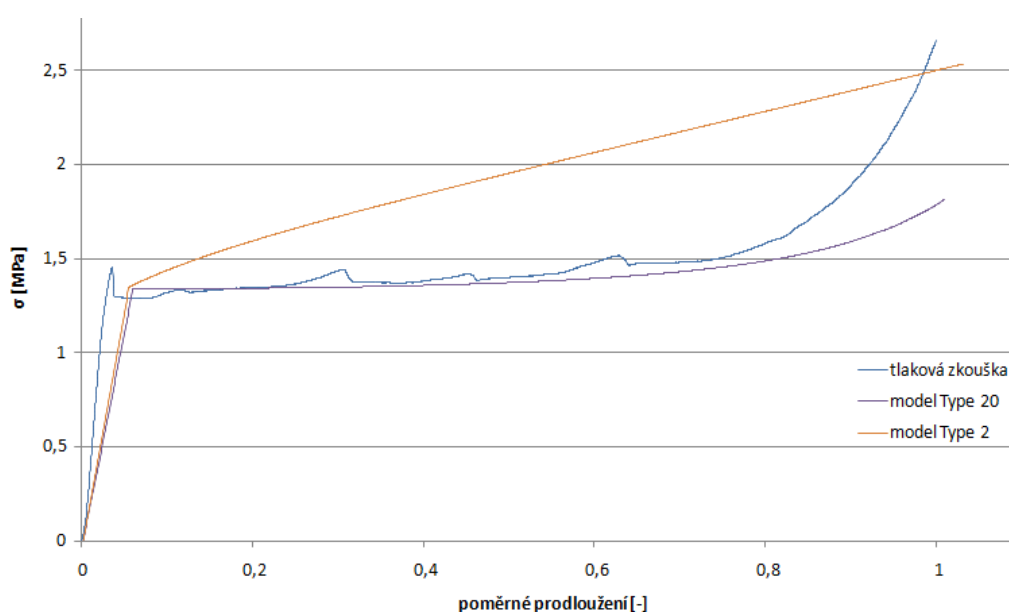
Dalším parametrem jsou EPSI parametry, do kterých lze zanést hodnoty z tlakové zkoušky, přesněji hodnoty tlaku a deformace (pressure-strain). Touto možností se prozatím model nebude zabývat. Posledním parametrem je vyplnění KSI, kde se zadává rozsah tlumení materiálu (pro pěnu 0.5).

Pokud jsou známi konstanty potřebné pro výpočet, je nutné provést kvazi-statickou zkoušku tlakem. Lze při ní ověřit materiálový popis udávaný výrobcem a následně se na tuto zkoušku kalibruje numerický model. Tlaková zkouška byla provedena Ústavem pružnosti na stroji FPZ/100. Jako zkušební vzorek byl deformační člen navržený na monopost FSE.03 z materiálu Divinycell H60. Sestava zkušební aparatury je patrná na Obr. 53.



Obr. 53 - Tlaková zkouška pěny Divinycell H60

Zkouška byla převedena do software PAM-CRASH v podobě 3D SOLID elementu o velikosti hrany 5 mm a tloušťce 2 mm. Zatížení elementu bylo pomocí posuvů v nodech. Uložení elementu ukazuje Obr. 51. Na Graf. 14 je patrné, že model typu 2 nedosahuje v oblasti daného prodloužení zhutnění buněk a následnému růstu síly jako je tomu u reálné zkoušky. Materiál po přechodu z elastické oblasti sleduje koeficienty plastické deformace a to z případu b) v Graf. 13. Tato formulace materiálového modelu se v plastické oblasti materiálu řídí přímkou danou podle parametrů a_0 a Pfr. Pokud bychom chtěli přesnější popis, je potřeba udělat několik složitých mechanických zkoušek kde dostaneme kompletní popis materiálu jak pro hydrostatický tlak i druhý invariant tenzoru napětí, které jsou potřebné pro určení plochy plasticity dle Von Misses. Model typu 20 sleduje naměřenou křivku s odchylkou do 20%. Tento model předpokládá zhutnění materiálu již při stejné deformaci jako při reálné zkoušce.

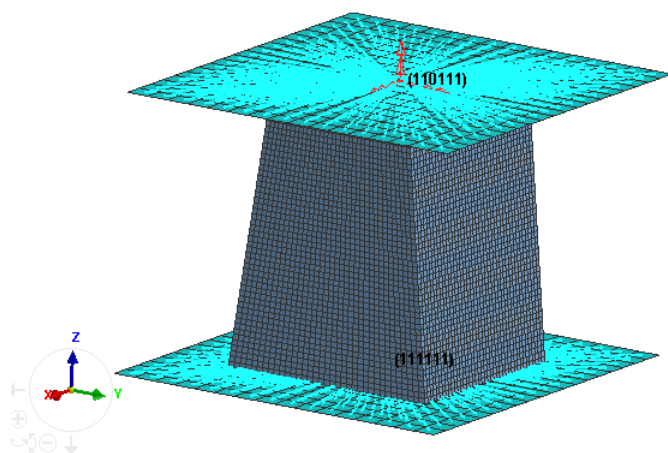


Graf. 14 - Porovnání kvazi-statické zkoušky a predikce v MKP

Dynamika

Kalibrace modelu podle statické zkoušky není pro dynamické děje zcela přesná z důvodů účinků parametru strain-rate. Model bylo tedy potřeba korelovat s dynamickou zkouškou. Dynamická zkouška byla provedena na pěnovém deformačním členu pro vůz FSE.03. V softwaru PAM-CRASH byla modelována replika zkoušky s přijmutím určitých zjednodušení. Model obsahoval tři části - impaktor, deformační člen a impaktní desku. Deformační pěnový člen byl síťován objemovými prvky typu HEXAHEDRON o délce hrany 5 mm, aby odpovídal velikosti používaných prvků v hlavním modelu. Impaktní desky byly prvky typu SHELL s velikostí hrany 20 mm. Tyto desky byly zamknuty podmínkou RIDGIT_BODY, což znamená, že obě desky se považují za absolutně tuhé. Okrajové podmínky byly zadány dle Obr. 54. Impaktor měl povoleny translace v ose Z a impaktní deska měla fixovány veškeré směry pohybu. Deformační prvek byl k impaktní desce připevněn prvky typu TIED, které simulovaly reálný lepený spoj. Na impaktor byla přidána hmotnost pomocí karty NSMAS (non-structural mass) o velikosti 433.5kg. Impaktor byl z počátku urychlen pomocí počáteční rychlosti INVEL (initial velocity) s počáteční rychlostí 5.87 m/s². Tření mezi impaktorem

a deformačním členem (pěna-ocel) bylo stanoveno na hodnotu 0.2. Diskutován byl vliv gravitačního zrychlení. Jelikož se jedná o pádovou zkoušku a výsledek bez přidání gravitační konstanty by obsahoval nepřesnosti, bylo rozhodnuto o přidání parametru ACFLD (acceleration field), který se zadává pomocí funkce gravitačního zrychlení. Odlišností reálné zkoušky od simulační je přijetí předpokladu, že impaktní deska je absolutně tuhá, jejíž průhyb je při zkoušce minimální, a proto toto není zásadní chyba. Druhou odlišností je způsob provedení nárazu. Při pádové zkoušce je deformační člen součástí pohyblivého vozíku a narazí do impaktoru. V simulačním modelu je deformační člen nepohyblivý a padá na něj impaktor. Pokud však dodržíme správné hodnoty hmotností, je přenos energie díky zákonu akce a reakce a zákonu o zachování kinetické energie stejný u obou případů nárazu.



Obr. 54 - Dynamická simulace - okrajové podmínky



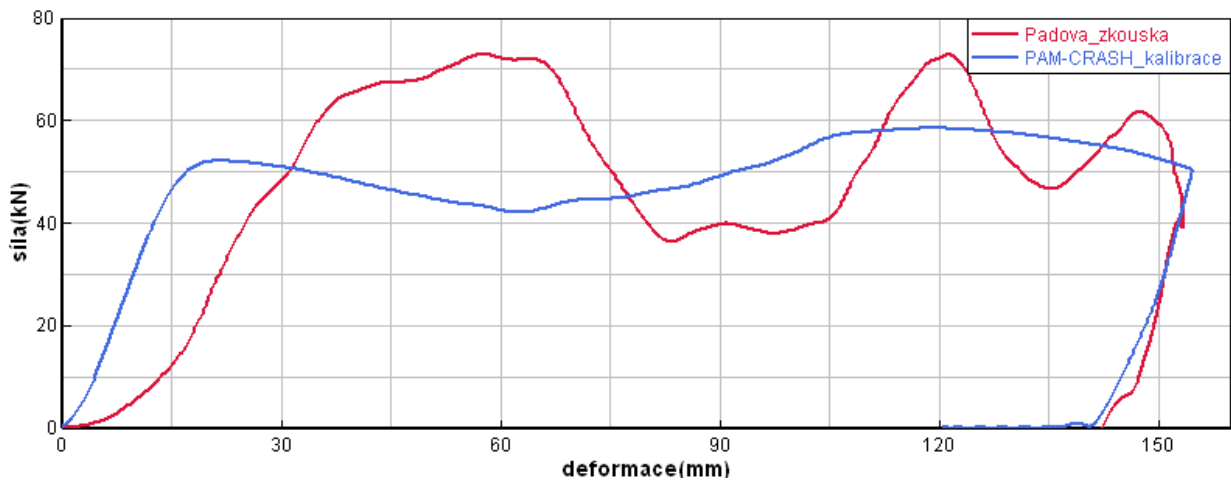
Obr. 55 - Reálná pádová zkouška

Po kalibraci z kvazi-statických zkoušek výsledky dynamické zkoušky zcela neodpovídaly. Materiálový model typu 20 měl problém s tuhostí elementů. Simulace byla ukončena chybou s negativním objemem prvků. Následně byla přidána kontaktní stabilizace pro elementy typu SOLID (Internal solid anti-collapse contact). Tato stabilizace pomáhá elementům typu SOLID numericky stabilizovat výpočet při velkém zatížení v tlaku. Její princip je na základě algoritmu vyhledávajícího nepropojené nody elementů a při překročení délky hrany (EDGLN) aktivuje kontakt mezi nimi. Po přidání algoritmu byl výpočet stabilizován.

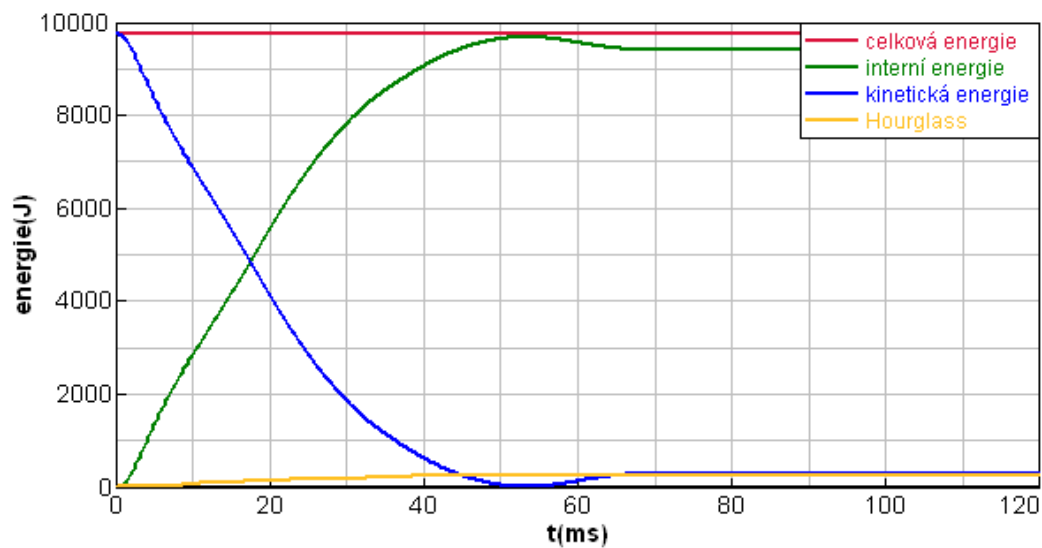
Materiálový typ 2 se záporným objemem neměl problémy a výpočet běžel stabilně. Simulace však zpočátku nekorelovala s pádovou zkouškou. Především velikost deformace byla mnohem větší. Po úpravě parametru Pfr i a0 se materiálový model dostal do tolerančního pole odchylky modelu. Bylo dosaženo shody průměrných hodnot, jak uvádí Tab. 9. Průběh zkoušky přesně neodpovídá realitě z důvodů odlišného chování ztuhnutí buněk a ne zcela přesným údajům o deformaci a síle odečtených z akcelerometru při reálné zkoušce.

	a_{avg} [g]	a_{max} [g]	Deformace [mm]	Energie [J]
Pádová zkouška	16	26	153	8095
Simulace PAM-CRASH	13	15	154	9860

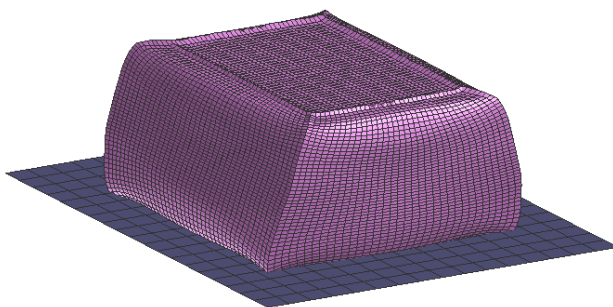
Tab. 9 - Výsledky kalibrace



Graf. 15 - Srovnání průběhů pádové a virtuální zkoušky



Graf. 16 - Energie modelu pěny



Obr. 56 - Porovnání simulační a reálné deformace

8.4.3.2 Uhlíková tkanina Hexcel 43200 Twill 2x2 3K

Výpočet materiálových konstant

Jak již bylo uvedeno, popis vlastností uhlíkové tkaniny zajišťují dvě materiálové karty. Nadřazená strukturální materiálová karta 131 s popisem skladby a podřazená karta PLY. V katě PLY je obsažen popis elastických a plastických vlastností materiálu společně s kritérii eliminace prvku. S použitím návodu pro program PAM-CRASH [14] budou vysvětleny jednotlivé konstanty spolu s fyzickými testy k jejich určení.

PLY /	2	7	1.5E-6	1	=		
TITLE	PLY_HEXCELL_Twill_2x2_200g_wet_layup						
NAME	PLY_HEXCELL_Twill_2x2_200g_wet_layup						
E01	E02						
32.98	32.98						
G012	G023	G013	NU012	KAPPA23	KAPPA13		
7.5	7.5	7.5	0.33	0.	0.		
Y12c	Y120	Y12R	D12max	Y11C	Y110	Y11R	D11max
3.8	0.005	0.052	0.8	0.01	0.101	0.05	0.5
ALPHA1	ALPHA2						
E0c1	E0c2	NU0c12	Y11cC	Y11c0	Y11cR	D11cmax	
32.98	32.98	0.33	0.025	0.101	0.05	0.3	
R0	BETA	m					
0.038	1.1	0.82					
ERATER11	D11	n11	LAWTYP11	ERATERc11	D11c	n11c	LAWTYP11c
0.	0.	0.	==				==
ERATER12	D12	n12	LAWTYP12				
0.	0.	0.	==				
ERATER0	DR0	nR0	LAWTYPRO				
0.	0.	0.	==				
FAILDAM	FAILTYP	NUSRALO	BLANK				
1	6						
EPSitu11	EPSitu22	EPSitu33	EPSipu12	EPSipu23	EPSipu13		
0.6	0.45	0.6	0.8	0.8	0.8		
EPSicu11	EPSicu22	EPSicu33	EPSinu12	EPSinu23	EPSinu13		
0.6	0.6	0.6	0.8	0.8	0.8		

Obr. 57 - Materiálová karta PLY

První a druhý řádek konstant byl popsán v Kapitole 8.4.2 a netřeba ho dále představovat. Třetí řádek popisuje modul pružnosti v tahu pro směry hlavního osového a na něj kolmého namáhání (E01, E02). Hodnoty pro tkaninu jsou v obou směrech stejné, jelikož tkanina Hexcel 43200 má v osnově i útku stejný typ vlákna. Rozdílné vlastnosti bude mít například jednosměrný kompozit, či hybridní tkanina. Hodnotu modulu pružnosti v tahu získáme z tahového diagramu, který u uhlíkového vlákna vypadá lineárně se směrnicí modulu pružnosti až do porušení při nízkých hodnotách prodloužení. Modul pružnosti v tahu lze z tahové zkoušky získat podle Rov. 27.

Rov. 27
$$E_{11}^0 = \frac{\sigma_{11}}{\varepsilon_{11}}$$

Kde σ_{11} je napětí při porušení a ε_{11} je poměrná deformace při porušení vzorku. Pro druhý směr namáhání pouze prohodíme indexy. Na čtvrtém řádku popisu materiálu nalezneme hodnoty modulu pružnosti ve smyku (G012, G023, G013). Tyto moduly budou považovány za konstantní ve všech směrech namáhání. Jejich hodnota se zjistí podle tahové zkoušky s tím rozdílem, že vlákna budou orientována pod úhlem 45° od osy namáhání. Tím se vyvolá v materiálu smykové namáhání a dle směrnice elastické oblasti grafu tahové zkoušky je možné odečíst tuto hodnotu podle Rov. 28 odvozené z rozšířeného Hookeova zákona. Tahový diagram se vyznačuje značnou plastickou oblastí při velké hodnotě prodloužení.

Rov. 28

$$G_{12}^0 = \frac{\sigma_{12}}{2\varepsilon_{12}}$$

Následující položka na řádku je Poissonova konstanta ν_{12} v rovině 12. Tato konstanta je dána poměrem příčné a podélné deformace. Její snímání není zcela jednoduché a hodnoty se mezi uhlíkovými materiály mnoho neliší (hodnota byla stanovena na 0.33). Parametr κ_{13}, κ_{23} představuje korekční faktory pro modul pružnosti ve smyku.

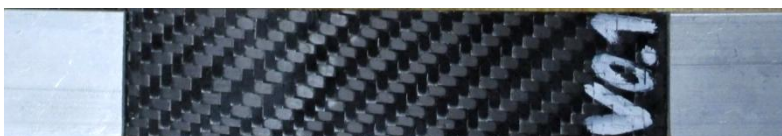
Pátý řádek popisuje konstanty šíření poškození ve smyku a v tahu. Těmto konstantám bude věnována další kapitola. Šestý řádek popisuje koeficienty tepelné roztažnosti. Sedmý řádek kombinuje elastické vlastnosti v tlaku ($E_{0c1}, E_{0c2}, \nu_{0c12}$) a konstanty šíření poškození ($Y_{11c}, Y_{11c0}, Y_{11cR}, D_{11cmax}$). Konstanty v tlaku jsou obtížně měřitelné, proto budou převzaty z obdobné práce.

Osmý řádek popisuje plastické vlastnosti materiálu, jako jsou R_0 – mez kluzu, $BETA$ – součinitel plastického zpevnění a m exponent plastického zpevnění. Řádky 9-11 se zabývají parametry ohledně závislosti materiálu na rychlosti zatěžování (strain-rate), které zatím nebudou využity. Na řádku 12 jsou parametry charakterizující kritéria eliminace prvku. Parametr $FAILDAM$ uvádí možnosti zda kritérium porušení bude pouze pro výstup z programu, nebo zda-li ho program uloží. $FAILTYP$ uvádí nejdůležitější kritérium porušení. Existuje celkem 10 možností výběru kritéria porušení. Závisí pouze na preferencích uživatele a dostupných řešeních spojených s módy porušení. Tyto kritéria jsou vždy vyjádřena velmi komplexní rovnicí, kterou každý z řešitelů vždy pojal z jiného úhlu. Existují kritéria např. podle Tsai-Wu, Hilla, Hoffmana, Pucka a mnoho dalších kombinací mezi nimi. Každé kritérium má své specifické parametry a liší se složitostí popisu konstant. Další řádky jsou parametry zvoleného kritéria.

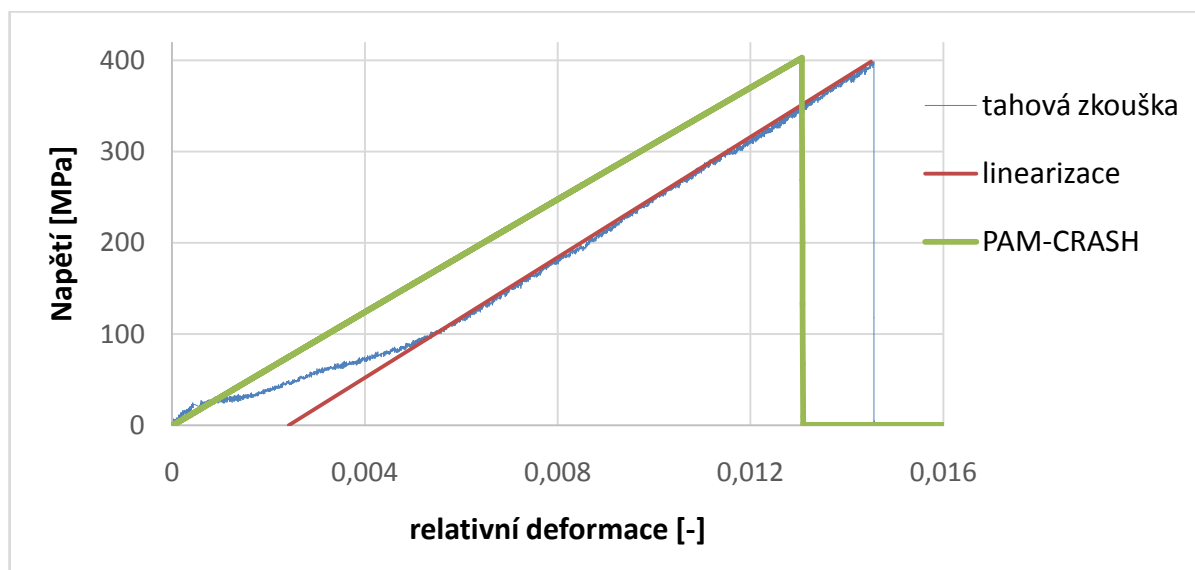
Elastické vlastnosti

Pro popis elastických vlastností modulů pružnosti v tahu a smyku stačí tahová zkouška. Tato zkouška byla provedena Ústavem pružnosti na stroji FPZ/100 s 10kN snímačem. Pro tento typ zkoušky jsou kompozitní vzorky ve formě kupónů dle Obr. 58. Tento vzorek má hliníkové příložky tloušťky 3 mm nalepeny lepidlem Loctite EA9483. Dobrý lepený spoj je důležitý pro správný průběh zkoušky. Pokud tento spoj selže, vzorky nelze použít. Výsledky tahové zkoušky popisuje Graf. 17. Z počátku deformace dochází k vymezování vlákní stroje a napínání zvlněných vláken vzorku. Následně jde graf po přímce se směrnici elastického modulu pružnosti $E_{011}(E_{012})$. Podle Rov. 27 byla odečtena konstanta E_{011} .

Jako validace materiálového modelu v PAM-CRASH byl použit element typu SHELL o hraně 5 mm, s jednou vrstvou laminátu pod úhlem 0° vůči ose namáhání. Uložení elementu je dle Obr. 51. Kalibrace v tahovém namáhání při první zkoušce zkopírovala modul pružnosti. Pro kompletní definici však bylo nutné určit, při jaké hodnotě deformace se má element porušit a již nepřenašet další zatížení. Toho bylo dosaženo pomocí konstant porušení v tahu, o kterých pojednává další stať. Na Graf. 17 je patrná reálná zkouška tahem a simulační ověření v softwaru PAM-CRASH.

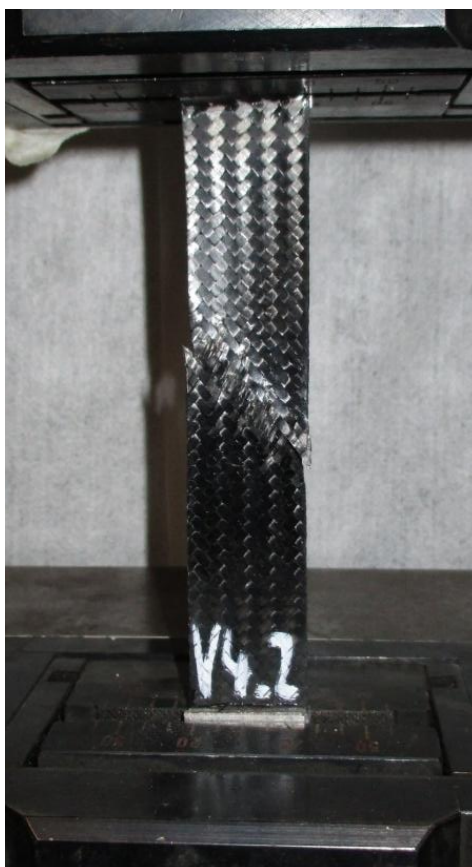


Obr. 58 - Zkušební vzorek pro zkoušku tahem



Graf. 17 - Tahová zkouška vs. PAM-CRASH

Určení modulu pružnosti ve smyku je mnohem složitější úlohou. Tahová zkouška vykazuje plastické chování a modul pružnosti lze odečíst při velmi malé deformaci. Vzorek při zatížení podléhá smykovému namáhání, které jej deformuje a výsledný lom pod úhlem $\pm 45^\circ$ lze vidět na Obr. 59. Na povrchu deformovaného vzorku je patrná porucha matrice, vykazující zmatnění povrchu a je pozorovatelné natažení vláken. Před tím, než bude smykový diagram validován, je nutné vypočíst plastické vlastnosti materiálu spolu s konstantami porušení.



Obr. 59 - Porušení smykovým namáháním

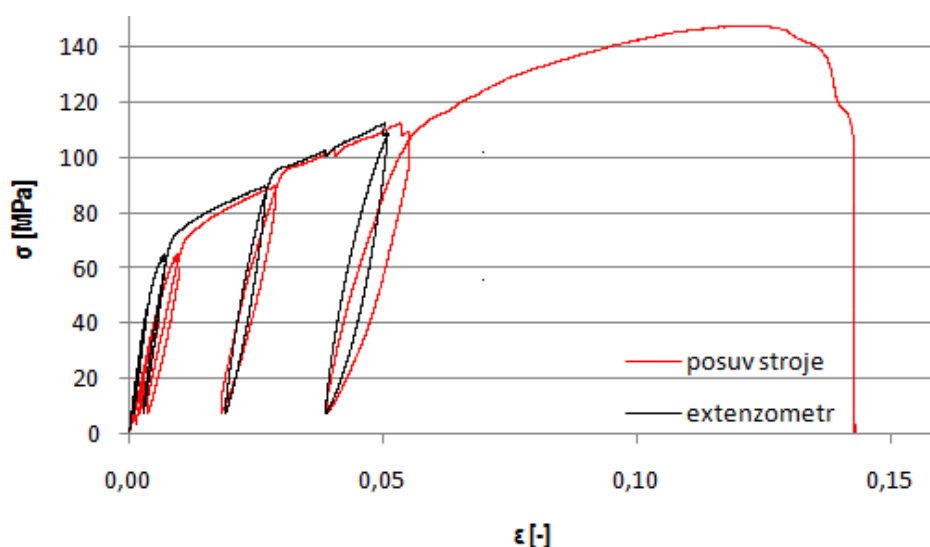
Cyklické zkoušky

Konstanty pro zatížení ve smyku jsou pro kompozity klíčovou vlastností. Tento druh namáhání je pro vlákna i matrici nejhorším typem zatížení, proto je správná kalibrace pro ekvivalentní chování klíčová. Manuál PAM-CRASH [14] pro kalibraci těchto vlastností doporučuje cyklickou zkoušku s hysterezí. Z té lze uvedeným způsobem vyhodnotit jak plastické, tak i vlastnosti porušení kompozitu. Cyklická zkouška se skládá z minimálně pěti zátěžných cyklů, kdy se vzorek zatíží a následně odlehčí. Tato zkouška byla provedena na stroji FPZ/100 s 10kN snímačem a přidaným extenzometrem z důvodu filtrace vůlí v čelistech apod. Zkušební sestava je na Obr. 60.



Obr. 60 - Připojený extenzometr na vzorku V4_2

Graf. 18 ukazuje rozdíl mezi odečtením posuvu ze stroje FPZ/100 a z extenzometru MFA 2. Na průběhu je patrné, že nejdůležitější oblast pro určení modulu pružnosti ve smyku má jinou směrnici právě z důvodů vůlí ve stroji i čelistech. Reálná hodnota modulu pružnosti lze tedy odečíst pouze s použitím extenzometru. Extenzometr byl z měření odebrán po pátém měřícím cyklu z důvodu rozsahu měřidla a možného poškození při přetržení.

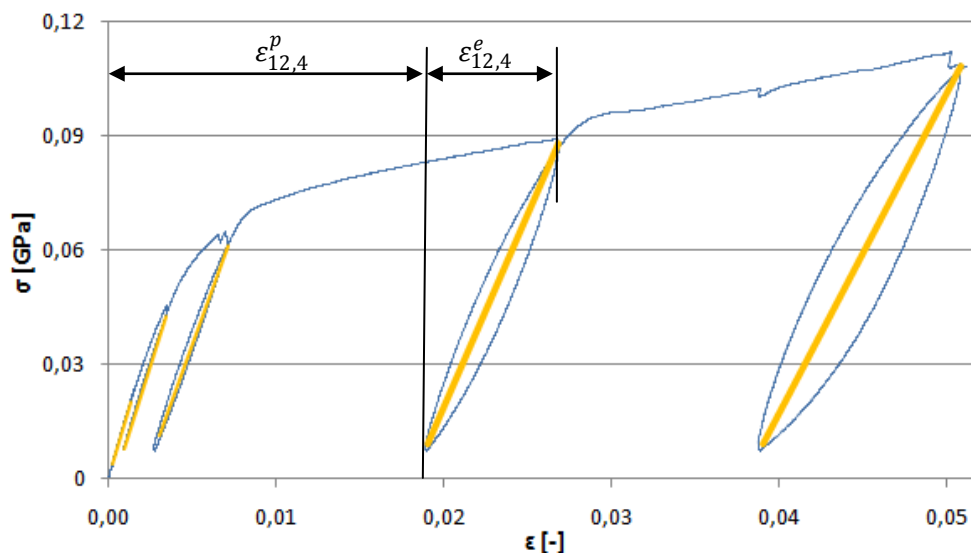


Graf. 18 - Cyklická zkouška s extenzometrem

Konstanty šíření poškození

Dle návodu programu je prvním stupněm pro získání materiálových charakteristik, odečtení konstanty šíření poškození d_{12} . Při cyklické zkoušce se v každém z cyklů mění modul pružnosti z důvodů iniciování poruchy struktury matrice a některých vláken. Parametr, který zohledňuje tento vývoj poškození je právě d_{12} a lze ho vypočítat dle Rov. 29 pro každý i -tý cyklus. Hodnoty modulů pružnosti odečteme z Graf. 19, kde proložíme jednotlivými hysterezními smyčkami úsečku a následně odečteme jejich směrnici, z ní vypočteme smykový modul viz Rov. 21.

Rov. 29
$$d_{12}^i = 1 - \frac{G_{12}^i}{G_{12}}$$



Graf. 19 - Vývoj modulu pružnosti

Další neznámé pro popis materiálu jsou parametry Y , popisující limitní stavy pro poškození. Charakterizuje je Rov. 30, který vyjadřuje míru naakumulované energie poškození v závislosti na míře poškození. Jejich jednotkou je odmocnina z napětí.

Rov. 30
$$Y_{12}(d_i) = Y_{12c} * d_{12}^i + Y_{120}$$

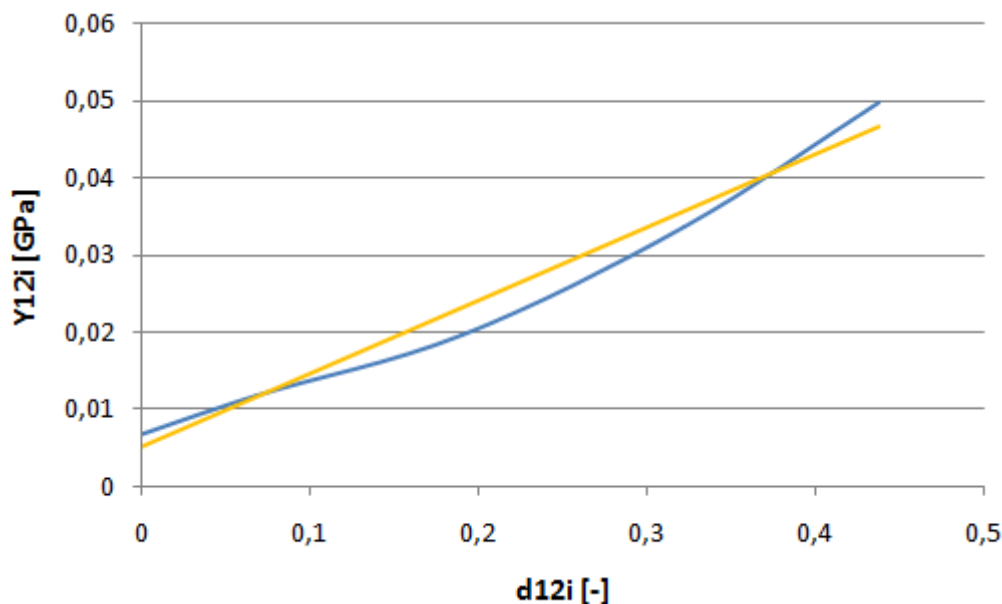
Konstanta Y_{12c} vyjadřuje kritické poškození ve smyku, Y_{120} je počáteční poškození ve smyku. V popisu je i konstanta Y_{12R} , ta udává limit, kdy nastane fatální trhlinka v materiálu. Z rovnice je patrné, že koeficienty Y_{12c} a Y_{120} lze odečíst z lineární závislosti hodnot Y_{12} na d_i . Hodnotu Y_{12} lze spočítat z Rov. 31.

Rov. 31
$$Y_{12}(d_i) \approx \sqrt{\frac{1}{2} G_{12} (2\varepsilon_{12,i}^e)^2}$$

Všechny parametry rovnice již byly popsány, kromě parametru $\varepsilon_{12,i}^e$ jedná se o elastické prodloužení jednotlivého cyklu i . Pro znázornění slouží Graf. 19. V něm jsou vyneseny dvě hodnoty prodloužení. Plastické prodloužení $\varepsilon_{12,i}^p$ a elastické prodloužení $\varepsilon_{12,i}^e$.

Po vypočtení hodnot Y_{12} v každém z cyklů, se hodnoty vynesou do Graf. 20 závislosti akumulované energie na parametru vývoje poškození. Z grafu se lineární regresí odečtou konstanty Y_{12c} a Y_{120} .

Poslední neznámou v kartě PLY pro skupinu konstant smykových zatížení je parametr D_{12max} , který nelze určit z kvazi-statické zkoušky. Udává hodnotu maximálního poškození elementu. Její hodnotu nelze vypočíst, závisí spíše na experimentálních testech a následné validaci výsledků. Tímto byl vyplněn řádek pět materiálové karty PLY týkající se porušení ve smyku.



Graf. 20 - Závislost deformační energie na poškození

Plastické vlastnosti

Popis plastických vlastností materiálu je v tomto případě nevyhnutelný. Ukázku jak vypadá model bez vyplněných materiálových konstant plasticity je na Graf. 22. Jedná se o skupinu parametrů v řádku osm, parametr **R0** udávající mez kluzu materiálu, **BETA** součinitel plastického zpevnění a **m** exponent plastického zpevnění. Tyto dva parametry jsou popsány mocninnou rovnicí plastického chování Rov.32.

Rov. 32

$$R_i = \beta(p_i)^m$$

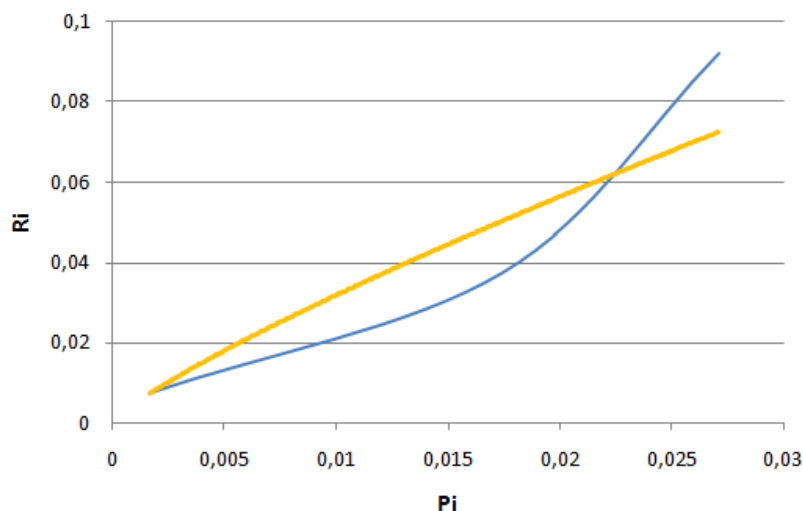
Dle práce M. Řady [4] je p_i plastický parametr, který dostaneme vyjádřením určitého integrálu při daném šíření poškození v cyklu i . Tento integrál je popsán Rov. 33. Pro kompletní popis je potřeba vynést do grafu závislost parametrů p_i a R_i a koeficienty mocninné aproximace následně odpovídají koeficientům plastických vlastností.

Rov. 33

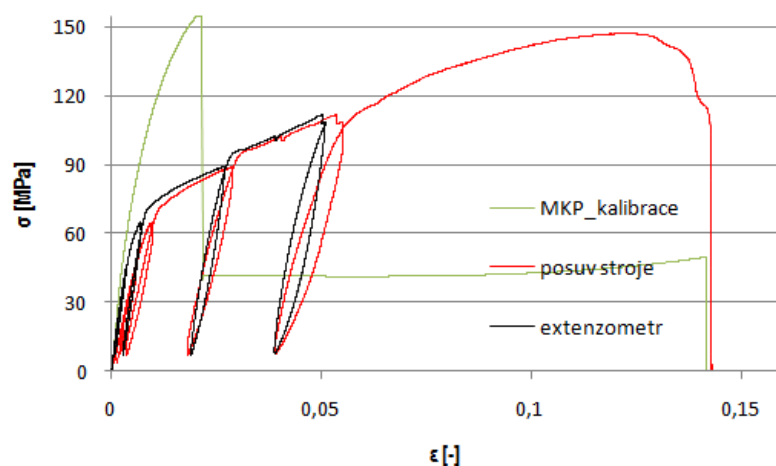
$$p_i = \int_{\varepsilon_{12}^{(1-i)p}}^{\varepsilon_{12}^{ip}} 2(1 - d_{12}^i) d\varepsilon_{12}^p$$

Rov. 34

$$R_i = \frac{\sigma_{12}^i}{1 - d_{12}^i} - R_0$$



Graf. 21 - Popis plastických vlastností materiálu



Graf. 22 - Materiál bez plastických parametrů

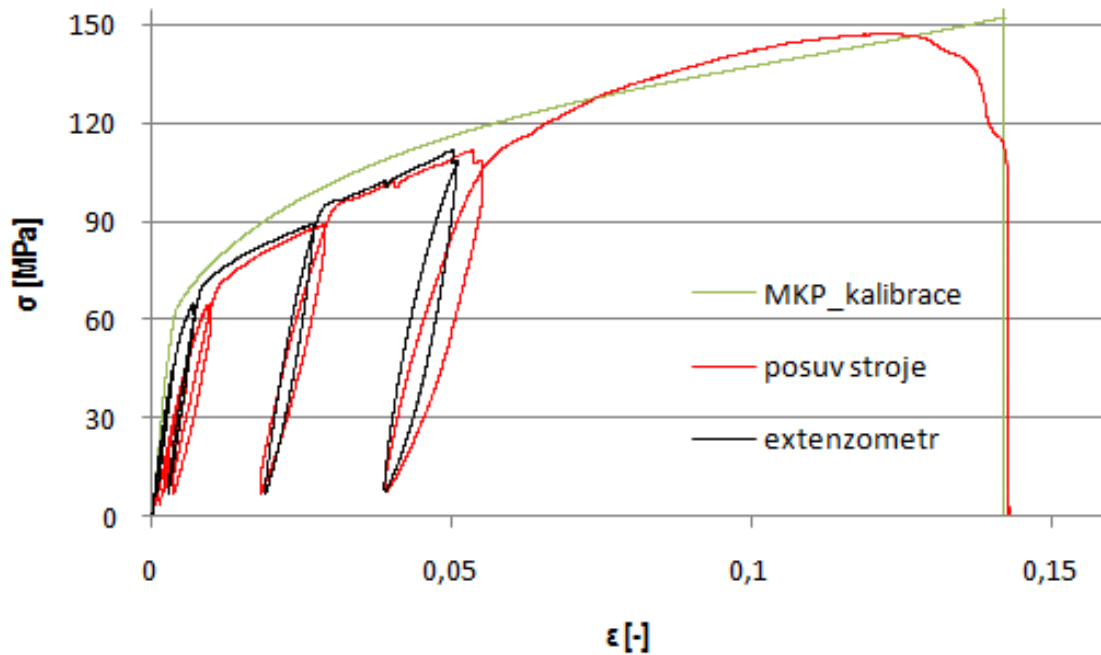
Validace tahové zkoušky $\pm 45^\circ$

Pokud jsou známi přibližné hodnoty elastických i plastických vlastností, je možné začít kalibrací tahové zkoušky v řešiči PAM-CRASH. Pro tuto zkoušku smykem byla zvolena konfigurace z Obr. 51, kde je orientace vláken pod úhlem 45° , jde tedy především o smykové namáhání. Pro simulaci byl zvolen element o hraně 5 mm, jako při čistě tahové zkoušce.

První pokusy validace modelu nedopadly úspěšně. Model neodpovídal reálné mezi pevnosti a poměrné prodloužení bylo při poruše mnohem nižší. Největším vlivem na mez pevnosti měl parametr Y12c udávající míru poškození. Z výpočtu měl tento parametr hodnotu řádově setin a v konečném modelu se jeho velikost zvýšila jednotky. Korigovat se musely i ostatní výsledky, kromě modulu pružnosti. Ten sledoval první elastickou část odečtenou z extenzometru shodně. Po několika neúspěšných iteracích byly přepočítány plastické parametry a křivka se začala přibližovat reálné zkoušce. Nakonec se podařilo zkoušku s drobnou odchylkou napodobit i v programu PAM-CRASH. Drobná odchylka v průběhu mohla být

způsobena špatným odečtením z grafů, či možných poruchách v materiálu, které virtuální model neuvažuje. Důležité je, že Graf. 23 kopíruje křivku reálného průběhu v části maximálního porušení materiálu.

Při výpočtech bylo ověřeno chování jednotlivých parametrů ovlivňujících průběh deformace. Parametr R_0 ovlivňuje délku úsečky elastických vlastností (směrnice podle G12) a s tím zároveň ovlivní ostrost přechodu do plastické části. Parametry Beta a m ovlivňují konkávní tvar úsečky za elastickou přímkou. Parametr Y_{12R} ovlivňuje maximální dosaženou hodnotu poměrné deformace. Tato simulace bude brána jako ukončení validací z kvazi-statických zkoušek.



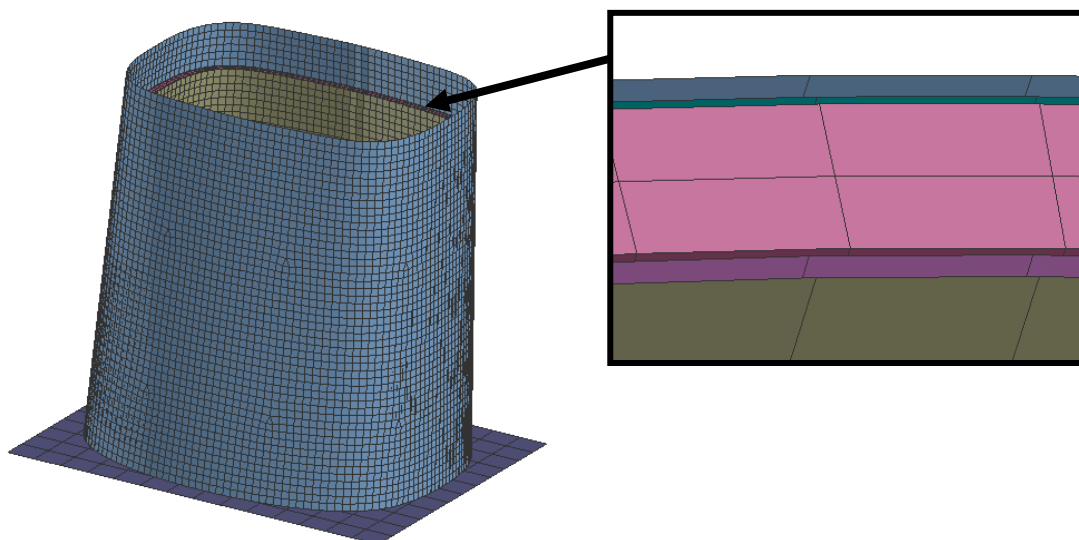
Graf. 23 - Kalibrace materiálového modelu

8.4.4 Tvorba dynamické simulace

Simulace dynamické zkoušky měla reprezentovat skladbu VZ2, která prošla fyzickými testy a byla použita na závodním monopostu. Pro tvorbu modelu bylo základem vytvoření vnějšího povrchu v programu CATIA V5. Již model plochy v CATIA bylo potřeba připravit pro simulaci. Vnější obal byl rozdělen na jednotlivé segmenty pro lepší práci s povrchem při napojování sítí prvky TIED. Tato „neživá“ geometrie ve formátu .stp byla přenesena do programu PAM-CRASH. Hlavním postupem při modelování byl offset jednotlivých vrstev již hotové sítě. Pokud by byla do programu PAM-CRASH importována geometrie již po jednotlivých vrstvách, muselo by se 6x více síťovat. Po importování geometrie deformačního členu je potřeba importovat jednotlivé desky, impaktor a impaktní přepážku. Program PAM-CRASH není zcela určen pro modelování součástí a je mnohem výhodnější geometrii importovat v modelářském softwaru. Úkony spojené se síťováním a importováním se vytváří v modulu MESH.

MESH

Následující krok bylo vytvoření sítě. Zpočátku se zadává parametr, zda-li uživatel chce určit uzly sítě podle jejich počtu na hraně geometrie, či podle jejich vzdálenosti. Je zvolena vzdálenost 5mm aby odpovídala kalibrační zkoušce. Síť ploch se skládá ze 2D elementů převážně typu QUAD. Elementů typu TRIA je v modelu obsaženo 0.25%. Cílem vytvoření sítě bylo zredukovat elementy typu TRIA z důvodů jejich větší tuhosti. Po vytvoření sítě na vnějším povrchu deformačního členu byla síť offsetována do vzdálenosti 0.2 mm, což reprezentuje tloušťku jedné vrstvy. Počáteční síť jádra se definovala jako mesh typu SHELL, která byla pomocí příkazu LAYER MESH offsetována a proměněna v síť 3D SOLID elementů. Offset byl o vzdálenost 4 mm (tloušťka jádra) a následně byl zadán počet vrstev vložených mezi vzdáleností 4mm. Tyto shellové vrstvy elementů byly programem uzavřeny do prvků typu SOLID a vytvořila se objemová síť reprezentující jádro. Tím, že byly offsetovány prvky typu QUAD vznikla síť prvků typu HEXAHEDRON. Řez strukturou a uspořádání vrstev je na Obr. 61. Síť obsahující 20 554 2D elementů a 12 336 3D elementů byla zkontrolována dle kvalitativních kritérií prvků. Některé prvky byly označeny za nevyhovující a byly automaticky programem PAM-CRASH opraveny.



Obr. 61 - Síť modelu a řez skladbou (prvky typu SHELL a SOLID)

Pro další tvorbu modelu bude použit modulu CRASH, kde se nastavují veškeré parametry ohledně materiálu, vazeb, okrajových podmínek a zatížení. Jako první položka ve stromě jsou tzv. kontrol karty. Zde uživatel specifikuje obecné požadavky na simulaci jako například simulační čas (RUNEND), zda-li jde o výpočet explicitní, či implicitní metodou, systém jednotek se kterými program pracuje a mnoho dalších parametrů o nichž bude pojednáno následně.

Po vyplnění kontrol karet je další položkou materiálová karta. Zde je potřeba importovat kalibrované materiálové modely, viz Kapitola 8.4.3. Zde definujeme požadovanou skladbu laminátu – tedy přiřadíme každému partu vlastnosti laminy. Pro model bylo přijato zjednodušení skladby vrstev. Segment II. skládající se ze šesti symetrických vrstev obsahoval dva party typu SHELL a mezi nimi 3D jádro. Segment III. kde je 8 vrstev, byl modelován čtyřmi party typu SHELL. To znamená, že vnějšímu a vnitřnímu povrchu byly přiřazeny tři vrstvy laminátu pomocí definice ve strukturální kartě materiálu. Toto zjednodušení rapidně zkracuje výpočetní čas, ale hůře zachycuje příslušný mód poruchy.

Další položkou ve stromě modelu je záložka LINKS, ta odkazuje na prvky typu TIED. Většinou tyto vazby simulují dokonale tuhé spoje, jako například zjednodušení svarových spojů. V tomto modelu jsou prvky typu TIED využity jako náhražka matrice. Jejich materiálová charakteristika je převzata ze zkoušky delaminací, viz Kapitola 8.4.2. Prvky typu TIED se využijí také pro zachycení deformačního členu k impaktní přepážce.

Kontakty

Po spojení vrstev laminátu následuje definice kontaktů. Kontaktní vazby jsou velmi složitou problematikou, a proto budou popsány jen základní principy. Zatím nejlepším algoritmem pro kontakt je penaltový přístup. To znamená, že každý prvek má přiřazenou svoji kontaktní tloušťku a řešič hledá průniky do této tloušťky. Jakmile dojde k průniku, vypočte se penaltová síla úměrná velikosti penetrace. Proto je nutné mít ve výchozím stavu modelu (t=0) veškeré party bez počátečních penetrací. Kdyby v modelu penetrace nastaly, vnášela by se do modelu nereálná síla a nastala by odchylka výpočtu. Prvním kontaktním typem je kontakt typu 33 SYMETRIC_NODE-TO-SEGMENT_WITH_EDGE_TREATMENT, použitý na impaktoru. Tento algoritmus již dokáže stabilizovat i nevhodně zvolený master a slave node, ovšem pro korektnost je dobré zachovat master elementy jako tužší (hrubší síť) a slave elementy s jemnější sítí. Nastavení tohoto kontaktu je pro simulaci stěžejní, a proto byly použity stabilizace, tak aby kontakt fungoval v každém okamžiku simulace. Kvůli 3D SOLID prvkům byl v kontaktu aktivován mód IEROD, což je speciální formule pro prvky tohoto typu aby nedošlo k penetraci eliminovaných nodů. 3D prvky pěnového jádra byly stabilizovány kontaktem 10 INTERNAL_SOLID_ANTI-COLLAPS, jako prevence proti negativnímu objemu elementu, o kterém již bylo pojednáno dříve. Důležitým kritériem kontaktu je parametr DTHKPLK omezující nechtěné síly v kontaktu s vazbou TIED (LINK) a zamezuje brzkému porušení při ohybu shell elementů.

Dalším kontaktem je typ 36 SELF_IMPACTING_NODE_TO_SEGMENT_WITH_EDGE_TREATMENT. Tento kontaktní typ je algoritmem pro kontakt všech elementů mezi sebou aby nedocházelo k penetracím v průběhu borcení laminátu. Posledním kontaktem je opět typ 33 mezi impaktní přepážkou a deformačním členem. Tím jsou všechny kontakty definovány tak aby model odpovídal realitě.

CNTAC /	IDCTC	NTYPE				
	3	33				
NAME	Crash_wall					
T1SL	T2SL	ISENS	Hcont	ITPRT	IEDGE	
0.	0.	0	1.	---	0	
IPCP	SLFACM	FSVNL	IKFOR	PENKIN	TLSTIF	
---	0.1	0.	0	0.		
FRICT	IDFRIC	XDMP1	ICOUFR			
0.1	0	0.1	---			
IRMV	IEROD	ILEAK	IAC32	IFRED	DTHKPLK	ADJTOL
2	1	0	0	1	-0.01	
BLANK	SEPSTR	SEPTHK				
BLANK	IPRES	---				

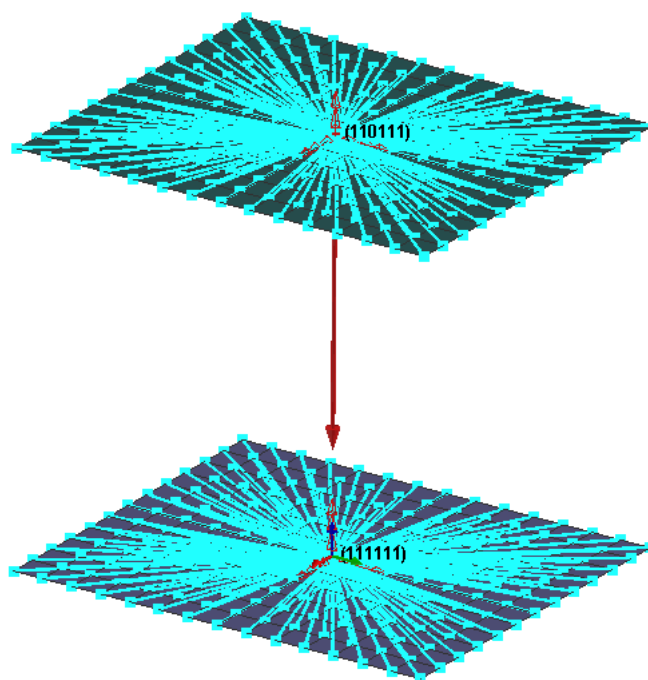
Obr. 62 - Nastavení kontaktu 33 pro impaktor

Okrajové podmínky

Na modelu lze přijmou určitá zjednodušení neovlivňující výsledek. Jedním z nich je vytvoření impaktoru a impaktní přepážky ve vazbě RIDGIT BODY, tj. prohlášení za dokonale tuhé tělesa bez deformace. Tato vazba vytvoří mezi všemi nody pevné spojení a v těžišti vybraných nodů vytvoří dependentní node. Na tento node byly aplikovány okrajové podmínky, pro impaktor (110111) zákaz všech rotací, povolen pouze pohyb v ose Z. Impaktní přepážka měla dependentní node zamknuta proti veškerým pohybům i rotacím (111111).

Impaktoru je potřeba nastavit počáteční podmínky tedy dát mu kinetickou energii 7350 J. Hodnoty byly převzaty z reálné pádové zkoušky – tj. dopadová rychlost 5.86 m/s a hmotnost impaktoru 433.5 kg. Definice počáteční rychlosti je přes kartu INVEL a zadává se na dependentní node rigid body impaktoru. Přidání hmotnosti je možné několika způsoby. Prvním je definice RIDGIT BODY typu 3 s přidanou hmotností a momentem setrvačnosti, nebo druhou, kde se na nody impaktoru přidá hmotnost pomocí ADDED MASS karty. Z hlediska výpočtu není způsob přidání hmotnosti důležitý.

Poslední okrajovou podmínkou je přidání gravitačního pole. Při pádové zkoušce by tento parametr měl být zohledněn. Gravitace se přidává na všechny uzly v simulaci pomocí karty ACCELERATION_FIELD. Při výběru se nesmí zapomenout na dependentní nody rigid body, jinak program vyhlásí chybu. Gravitace se zadává výhradně křivkou (auxiliaries).



Obr. 63 - Okrajové podmínky impaktoru a impaktní přepážky

Časový krok, výstup, řešič

Vyhodnocení této zkoušky by mělo obsahovat informace o energiích vstupujících a vystupujících z modelu, údaje o silách na impaktních deskách, posuv impaktoru a zrychlení. Toto je nutné zohlednit, jelikož standardní výpočet nevrací hodnoty zrychlení. Proto je nutné zavést na impaktor tzv. TH node (time history node), který vyhodnocuje zrychlení a posuvy impaktoru. Síla je vyhodnocena pomocí kontaktu mezi impaktorem a deformačním členem. Veškeré ostatní parametry jsou již obsaženy ve standardních kartách pro výstup z programu.

O výpočtu hrany elementu a časovém kroku bylo pojednáno v Kapitole 5.2. Velikost časového kroku je dle Rov. 15 úměrná hustotě materiálu, modulu pružnosti a délce hrany elementu. Časový krok lze v dynamických simulacích ovlivňovat přidáním hmotností modelu – tj. zvětšením hustoty materiálu. Pro ovlivnění časového kroku existuje několik karet. Nejdůležitější je položka ve standardních kontrolních kartách TCTRL (time control card) INITIAL_MASS_SCALE. Tato hodnota znamená požadovaný časový krok, na jenž se model dovažuje. Ideálním časovým krokem je $1E-3$ pro stabilitu i rychlost výpočtu. Pokud tuto kartu vyplníme musíme při kontrole výpočetním solverem před simulací ověřit hmotnost celého modelu. Díky malým, či zdeformovaným elementům se může stát, že časový krok na tomto elementu bude velmi malý a element se dovaží. Pokud je takových elementů víc je potřeba zkontrolovat celkovou hmotnost modelu a pokud se model s realitou liší o více jak 20% je potřeba časový krok snížit. Pokud bychom nechali mass scaling narůst například o 1000% součástka vážící 10 kg by výpočetně vážila 1 tunu a v tomto případě již je v soustavě jiná energie a výpočetně se simuluje jiná součást.

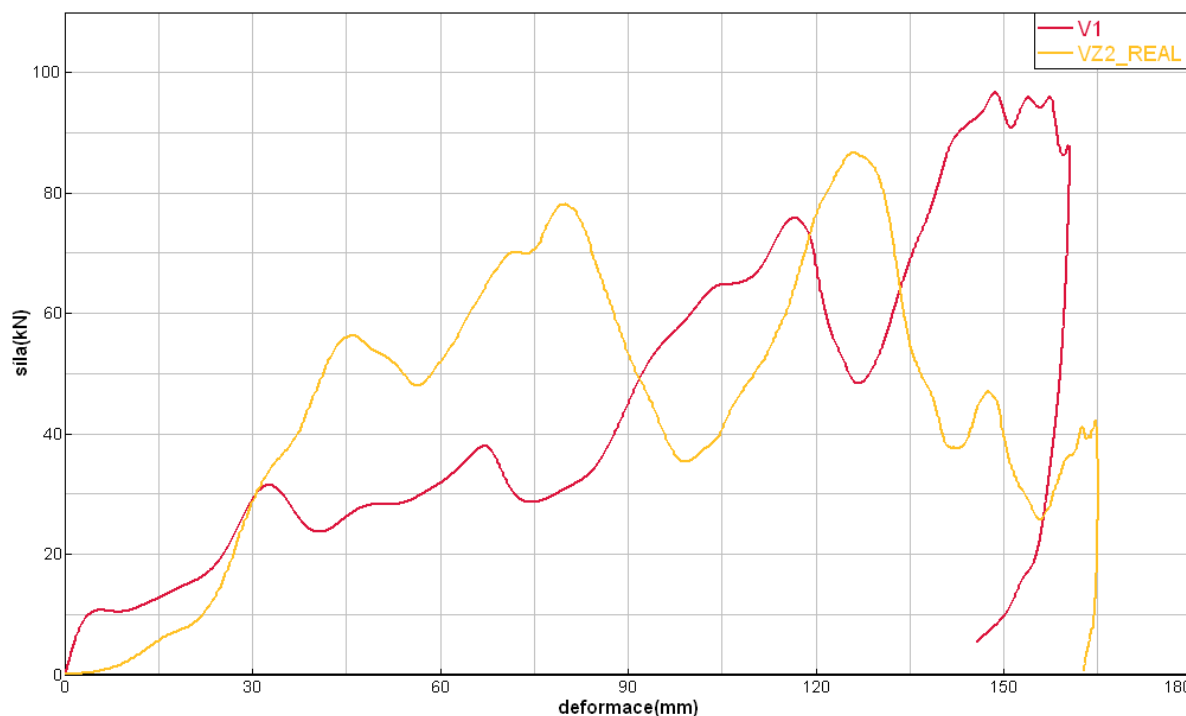
Pro řešení úlohy byl využit explicitní řešič PAM-CRASH Solver 2016. V této úloze byla použita varianta DMP Single precision, kterou lze vzhledem ke kumulaci chyby použít k výpočtům kolem 1 000 000 iterací. Samotný výpočet vzorku VZ2 se pohyboval kolem 6ti hodin výpočetního času při použití 12 jader procesoru. Výpočet měl 1 700 000 iterací při času simulace 70ms. Z tohoto vyplývá, že průměrný časový krok byl $4E-5$.

8.4.5 Výsledky dynamické simulace

Kalibrace materiálového modelu dynamickou zkouškou MKP byla provedena pouze na materiálu pěny typu 2 viz Kapitola 8.4.3.1. Pro simulaci celého deformačního členu se vycházelo z předpokladu, že vlastnosti pěny jsou již validovány a v simulaci se bude kalibrovat především uhlíkové vlákno HEXCEL. Z kvazi-statických zkoušek byly kalibrovány pouze elasticko-plastické vlastnosti materiálu a pro naladění modelu zbývalo určit parametry maximálních dovolených poškození v tahu, tlaku a smyku v kartě PLY. Výchozí hodnoty byly převzaty z práce [4]. Následující neznámé parametry byly obsaženy v kartě strukturálního materiálu, kde se nastavoval minimální počet cyklů do maximálního poškození prvku.

Vliv na naladění dynamické simulace má mnoho neznámých. Od materiálových konstant až po vliv tření mezi impaktorem a deformačním prvkem.

Výsledky první simulace po kalibraci z kvazi-statických zkoušek jsou na Graf. 24. Z něho je zřejmé, že reálný průběh zcela nekoreluje se simulačním. Průměrné hodnoty však nejsou vzdáleny od reálné zkoušky. Jsou patrné lokální špičky síly, které jsou v simulaci o 11% vyšší než reálný průběh profiltrovaný filtrem CFC60. Maximální hodnota deformace je v simulaci o 4% nižší a průměrné zpomalení se liší pouze o 0.07%. Tyto hodnoty jsou pro návrh dostačující, nicméně byly provedeny další iterace pro lepší shodu průběhu.



Graf. 24 - Výsledek reálného testu a numerické simulace vzorku VZ2

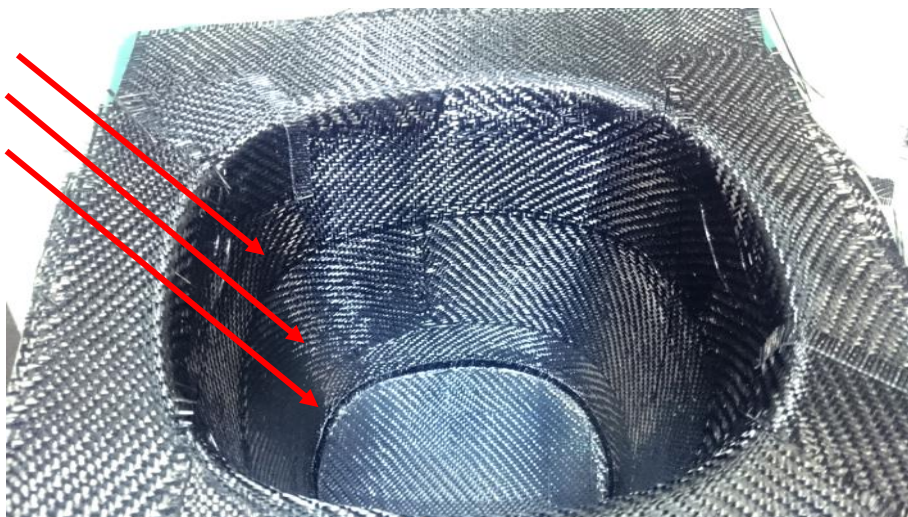
Po několika iteracích a změnách v materiálových modelech bylo zjištěno, že nejzásadnější vliv na průběh deformace má koeficient tření viz Kapitola 8.4.5.3. Průběh se následně podařilo o něco zpřesnit a objevily se similarity s reálným testem.

Druhý segment skladby vzorku VZ2 vykazuje v simulaci mnohem nižší silovou odezvu. Příčinou tohoto jevu je nejpravděpodobněji odlišnost způsobu modelování a reality. V modelu jsou pro tento segment pouze dva SHELLy a jádro. V reálu se vzorek skládá ze šesti lamin a jádra. Další odlišností, kterou nelze simulačně napodobit je kladení vrstev laminátu do negativní formy. Při výrobě se nejprve položila vnější vrstva a následně další segmenty viz Obr. 64. Jádro se díky vakuaci dílu spojilo s potahy tenkou vrstvou matrice, řádově do 0.1 mm. Zatímco v modelu je matrice nahrazena prvky TIED o tloušťce 0.6 mm, viz řez na Obr. 65. Toto zjednodušení modelu zcela přesně neodpovídalo průběhu reálné zkoušky.

Segment III. měl na reálném vzorku 8 vrstev. V simulaci byl nahrazen čtyřmi party SHELL elementů. Tento přístup k modelování již dokázal napodobit průběh zkoušky a na grafu se objevil velmi podobný nárůst síly a špičková síla byla o 0.08% větší¹.

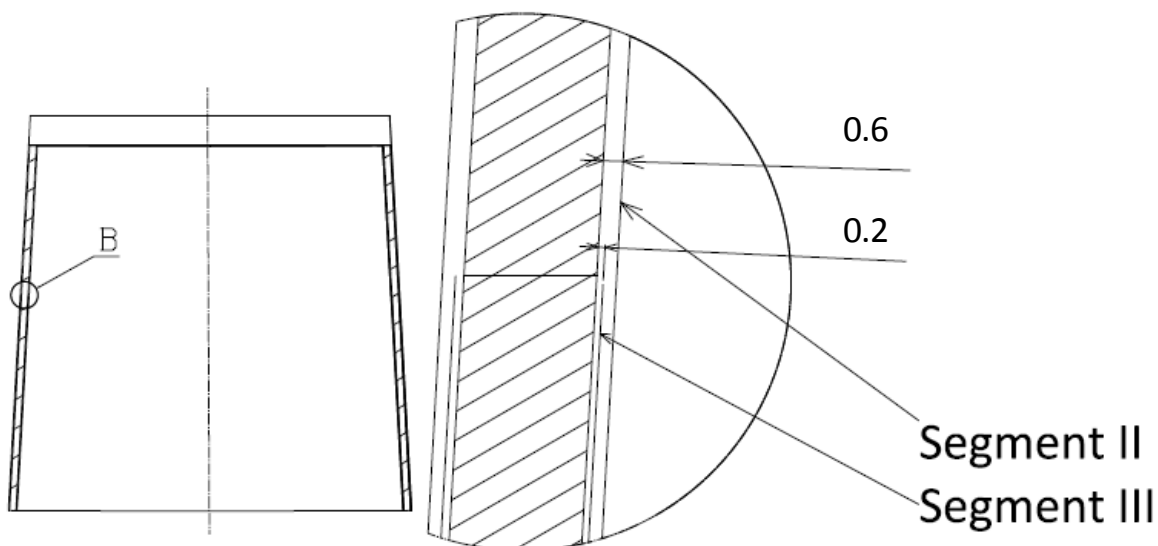
¹ Reálná data ze zkoušky byla filtrována filtrem CFC60, simulace MKP používá filtr CFC 180.

Segment III.
Segment II.
Segment I.

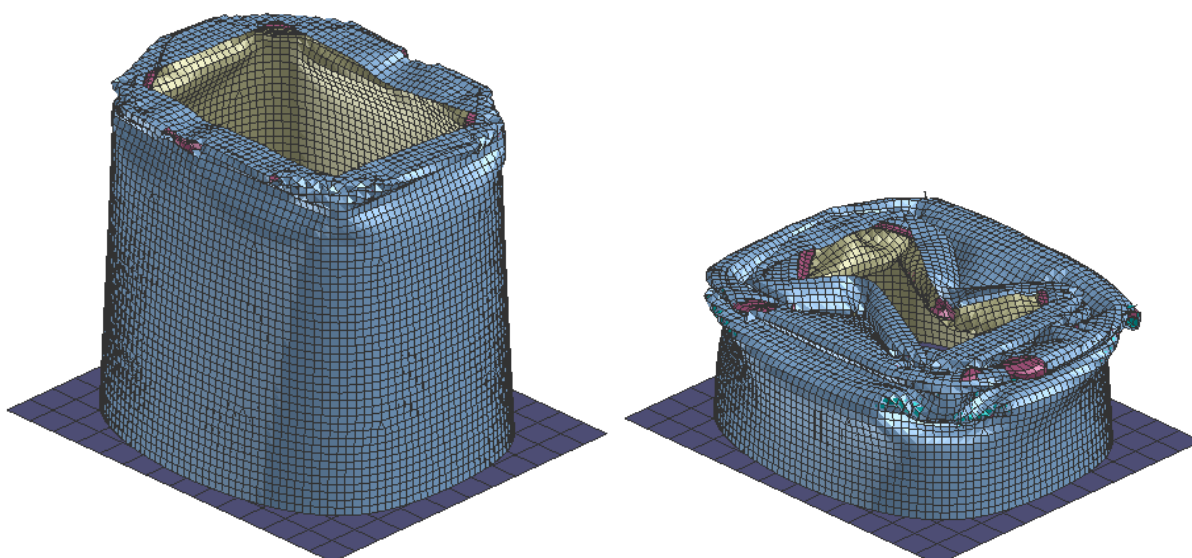


Obr. 64 - Výroba deformačního prvku před vložením jádra

Detail B 20: 1

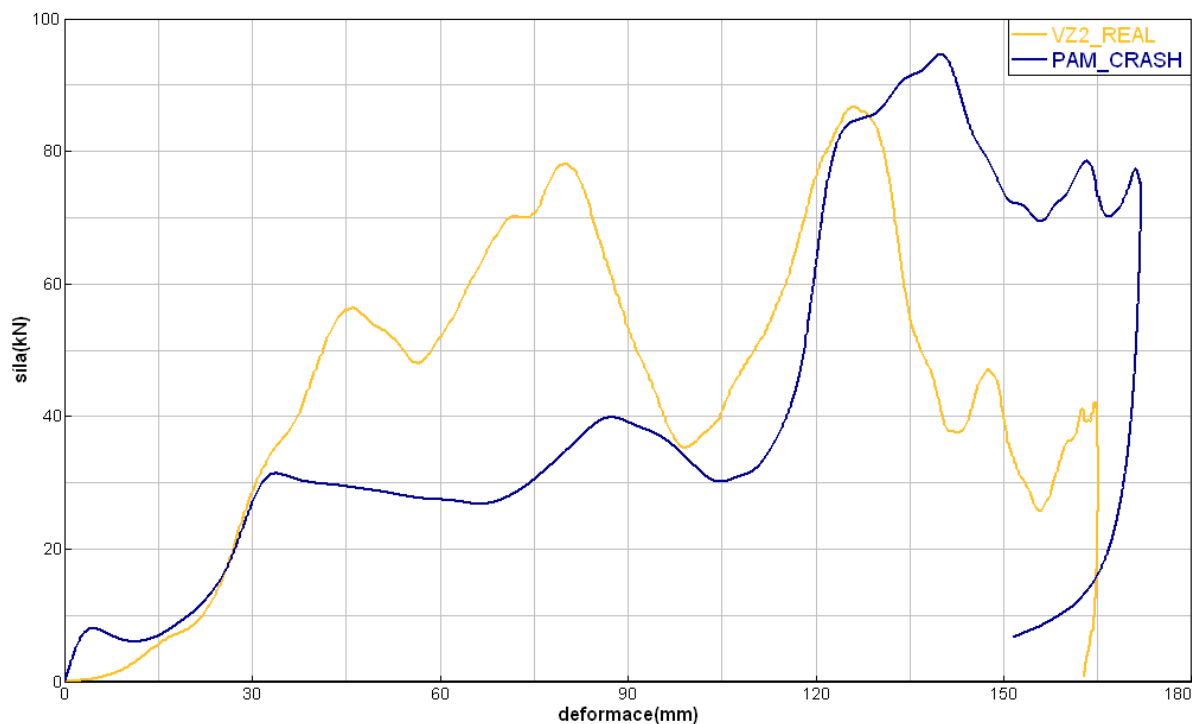


Obr. 65 - Řez deformačním prvkem a vzdálenost vazby TIED



Obr. 66 - Vizualizace deformace PAM-CRASH

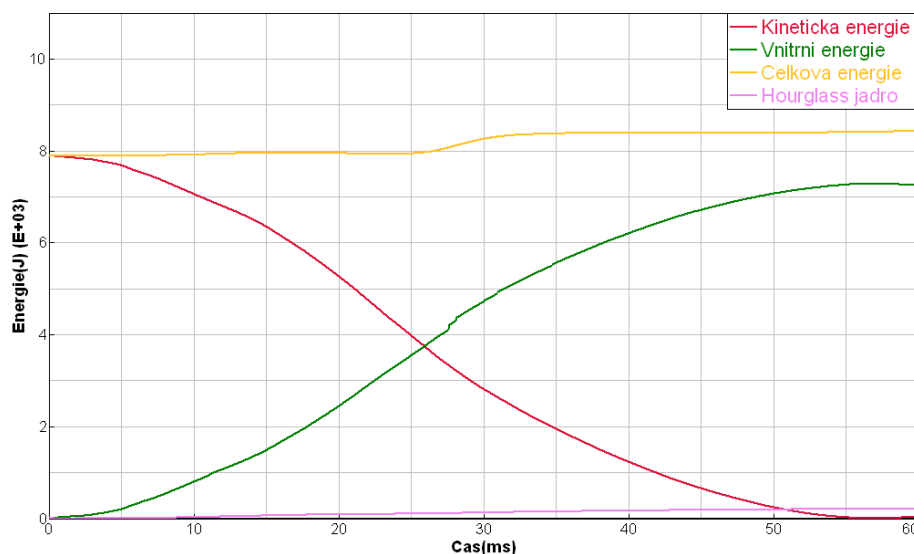
Kdybychom Graf. 25 použili pro vyhodnocení reálného deformačního členu zjistili bychom, že vzorek by testem prošel. Průměrná hodnota zpomalení je v simulaci o 19% nižší a maximální deformace je delší o 0.04%. Výsledky simulace potřebné pro vyhodnocení z hlediska pravidel FS popisuje Tab. 10.



Graf. 25 - Porovnání výsledného modelu s reálnou zkouškou

	VZ2	PAM-CRASH
Energie [J]	7449	7410
Maximální zpomalení [g]	30.5	21.8
Průměrné zpomalení [g]	14.7	11.9
Maximální deformace [mm]	164	171

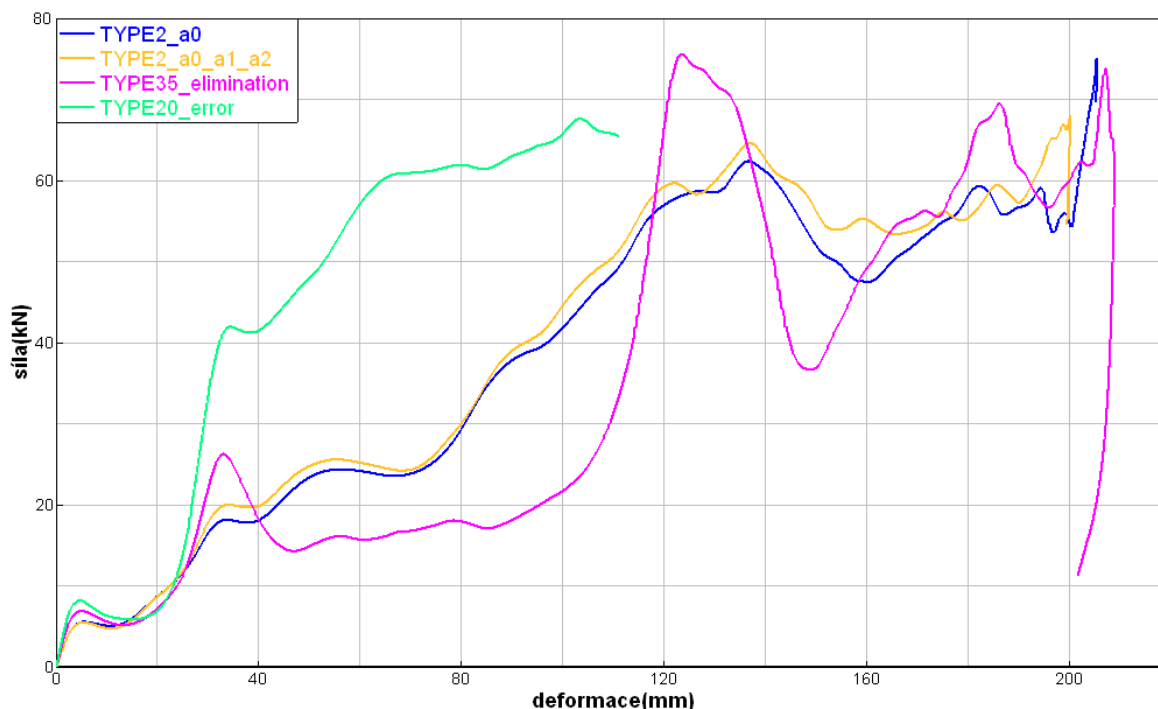
Tab. 10 - Shrnutí výsledků reálného testu a simulace



Graf. 26 - Energetická bilance modelu

8.4.5.1 Vliv modelu pěny

V simulaci bylo vyzkoušeno několik materiálových modelů popsaných v Kapitole 8.4.2. Model typu 20 měl problémy se stabilitou výpočtu. I přes podpoření stability přes kontakt typu 10 (INTERNA_SOLID_ANTI-COLLAPS) se nepodařilo výsledek zkonvergovat. Výpočet byl zakončen chybou týkající se velkého posuvu uzlu. Podle Graf. 27, byl průběh tohoto modelu příliš tuhý a v době vyhlášení erroru měl model již nízkou kinetickou energii, což naznačuje, že by maximální deformace byla velmi malá. Od tohoto modelu bylo nakonec opuštěno. Model typu 2 měl daleko stabilnější průběh a nakonec se tento model použil jako výchozí. Na grafu jsou vidět dvě odlišné varianty parametrů pro tento model. Odlišností těchto modelů bylo nastavení parametrů průběhu a_0 , a_1 , a_2 viz Graf. 13. Při dynamickém ladění modelu pěny tyto dvě varianty vykazovaly diametrálně odlišné silové odezvy, ale na chování simulace celého deformačního členu měly tyto parametry jen malý vliv. Uvedené modely typu 2 a 20 nemají možnost volby kritéria pro eliminaci prvků.



Graf. 27 - Porovnání vlivu použité pěny na simulační model

Proto byl zkoumán nový typ modelu pěny typ 35_IMPR_FLICK_EP_CRUSH_FOAM (Improved Fleck's elasto-plastic Crushable foam for solid elements). Tento materiálový model je určený pro kovové pěny, ale dobře funguje i pro polyuretanové. Je to model vycházející z prvních dvou invariant tenzoru napětí pro určení plastického chování. Tento model dovoluje nastavit parametry pro eliminaci prvku jako je maximální smykové napětí (TAU_{max}), plastický limit poměrného prodloužení (EPS_{plim}), energii poškození prvku (G_f) a maximální hodnotu poškození pro eliminaci prvku (d_{max}). Hodnoty, které nejsou jednoduše zjistitelné lze ponechat nevyplněny a i přesto je model stabilní. Mimo to lze plastickou část grafu zadat přímo křivkou reálné zkoušky. Tím se také model řídil. Další postup byla kalibrace na kvazi-statický a dynamický model. Kritéria pro eliminaci prvku mají zásadní vliv na dynamickou zkoušku a k jejich ladění se přistoupilo až na simulaci celého deformačního prvku.

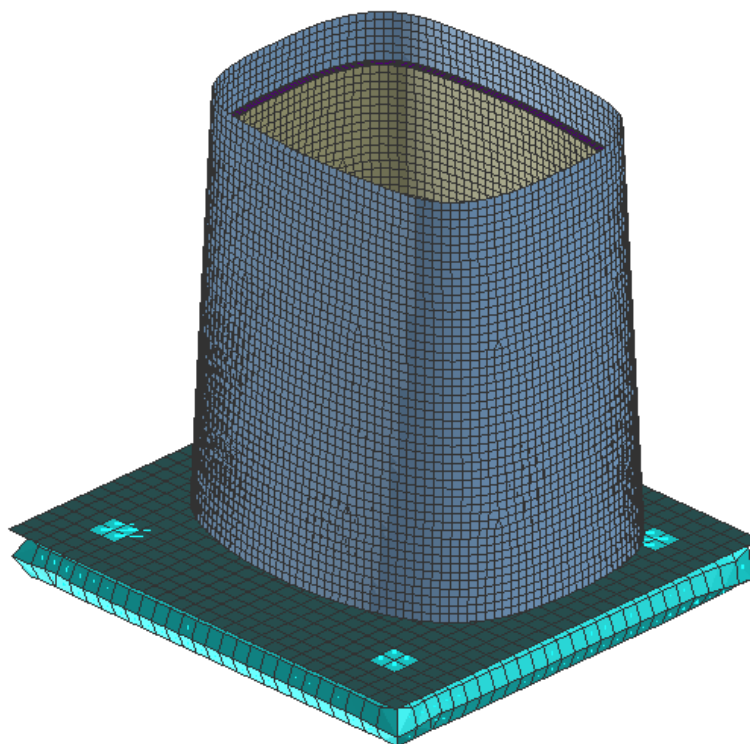
MATER /	IDMAT	MATYP	RHO	ISINT	ISHG	ISTRAT	IFROZ			
BLANK	204	35	6E-8	3	2	=				
	AUXID1	AUXID2	AUXID3	AUXID4	AUXID5	AUXID6	QVM	IDMPD	AND	
	0	0	0	0	0	0	1.	0	0	
	TITLE									
NAME	H60_elimination									
G	sigmOPTN	Et	BLANK	BLANK	BLANK	STRAT1	STRAT2			
0.02	CURVE	0.				0.	0.			
K										
0.055										
LC1	LC2	LC3	LC4	LC5	LC6	LC7	LC8			
1	0	0	0	0	0	0	0			
ERATE1	ERATE2	ERATE3	ERATE4	ERATE5	ERATE6	ERATE7	ERATE8			
0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.			
NUplas	ALPHAy	TAUmax	EPSIplim	Gf	dmax	KSI	Fo			
0.01		0.06	1.	0.007	0.8	0.6	0.			
STRAT3	STRAT4	STRAT5	STRAT6	Q1	Q2	Q3				
0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.				

Obr. 67 - Strukturální karta materiálového modelu typu 35

Z průběhu zkoušky je patrné, že model typu 35 funguje úplně jinak, než předchozí varianty bez eliminace. V několika desítkách iterací se ladila kritéria eliminace prvku, ale k reálnějšímu průběhu než s modelem typu 2 se nepodařilo docílit. Díky eliminaci prvků se stalo, že v modelu skokově vzrostla celková energie do stovek kJ, což se nedá považovat za funkční model.

8.4.5.2 Vliv elastické impaktní přepážky

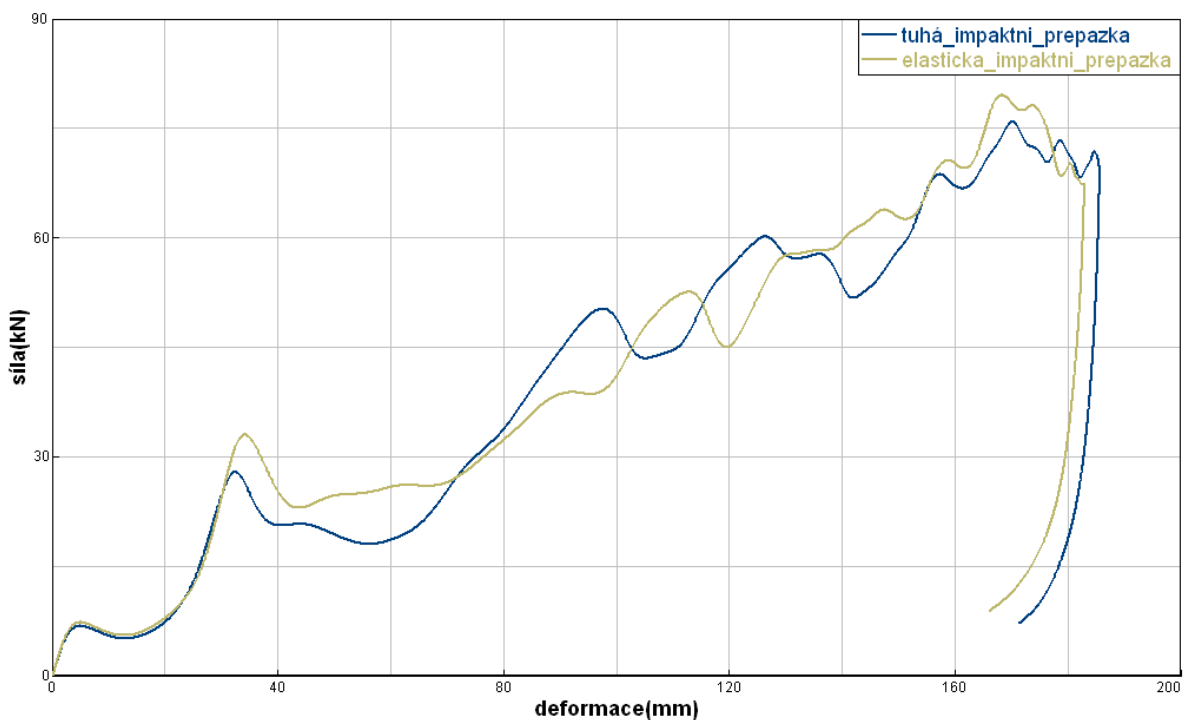
Při vyhodnocení reálné zkoušky byl diskutován vliv impaktní přepážky na celkový průběh zkoušky. Tento vliv v počáteční simulaci nebyl zahrnutý přestože má evidentní vliv na průběh reálné deformace. Z počátku bylo nutné model přiblížit realitě v co největším zjednodušení a následně, když byl výpočet stabilní se mohlo přejít k dalším faktorům ovlivňujícím přesnost simulace.



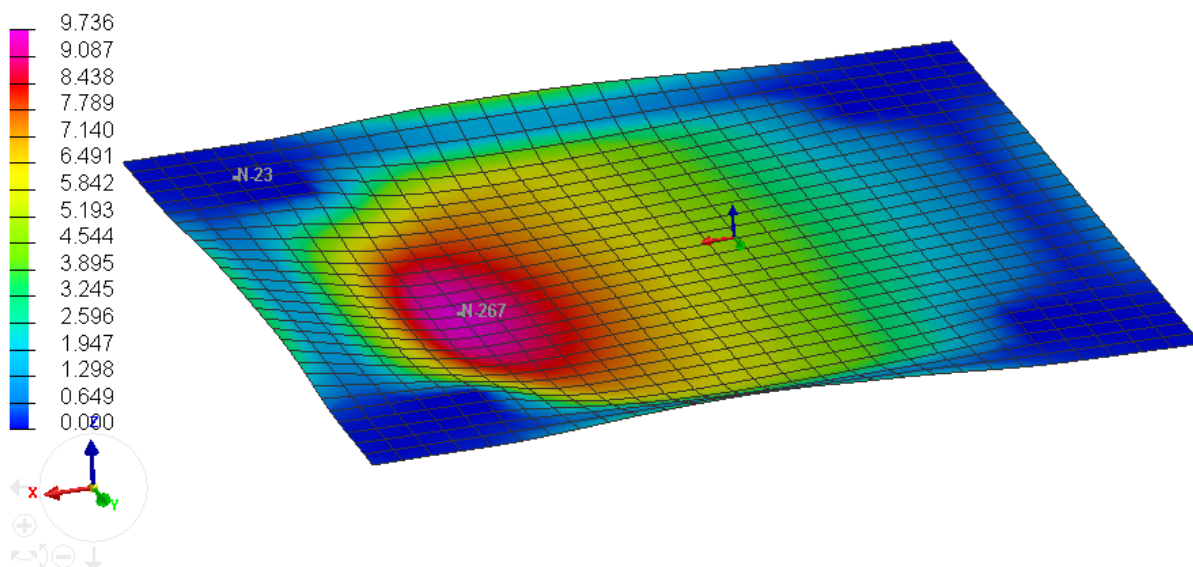
Obr. 68 - Model elastické impaktní přepážky

Impaktní přepážka byla doposud brána jako absolutně tuhá ve vazbě RIDGIT BODY. Tato vazba byla pro následující simulaci odebrána a přepážka dostala stejné materiálové vlastnosti jako reálný hliníkový vzorek. Té byla přiřazena tloušťka 4 mm a materiál EN AW7075. Tato přepážka je při reálném testu připevněna čtyřmi šrouby M8 k reprezentativní části rámu monopostu, tzv. bulkheadu. Bulkhead byl přenesen z modelu monopostu v programu CATIA V6 a implementován do programu PAM-CRASH, stejným způsobem popsaným v Kapitole 8.4.4. Bulkhead byl modelován jako typ SHELL s přiřazenou tloušťkou. Veškeré elementy byly propojeny vazbou RIDGIT BODY což znamená, že bulkhead byl považován za nedeformovatelnou strukturu. Impaktní přepážka byla přes několik elementů reprezentujících šroubový spoj přidána do stejné vazby RIDGIT BODY. Mezi přepážkou a bulkheadem zbývalo definovat kontaktní vazbu typu 33. Model byl následně připraven na simulaci viz Obr. 68, kde světle modrá barva reprezentuje absolutně tuhous část modelu.

Graf. 28 zobrazuje výsledky této simulace z něhož lze posoudit, že vliv elastické a tuhé impaktní přepážky je zanedbatelný. Důležitějším údajem bylo zjištění maximálního průhybu impaktní přepážky, který se v realu velmi obtížně měří. Její průhyb vyšel na 9.7 mm při napětí 165 MPa (materiál 7075, $R_e=145$ MPa, $R_m=275$ MPa).

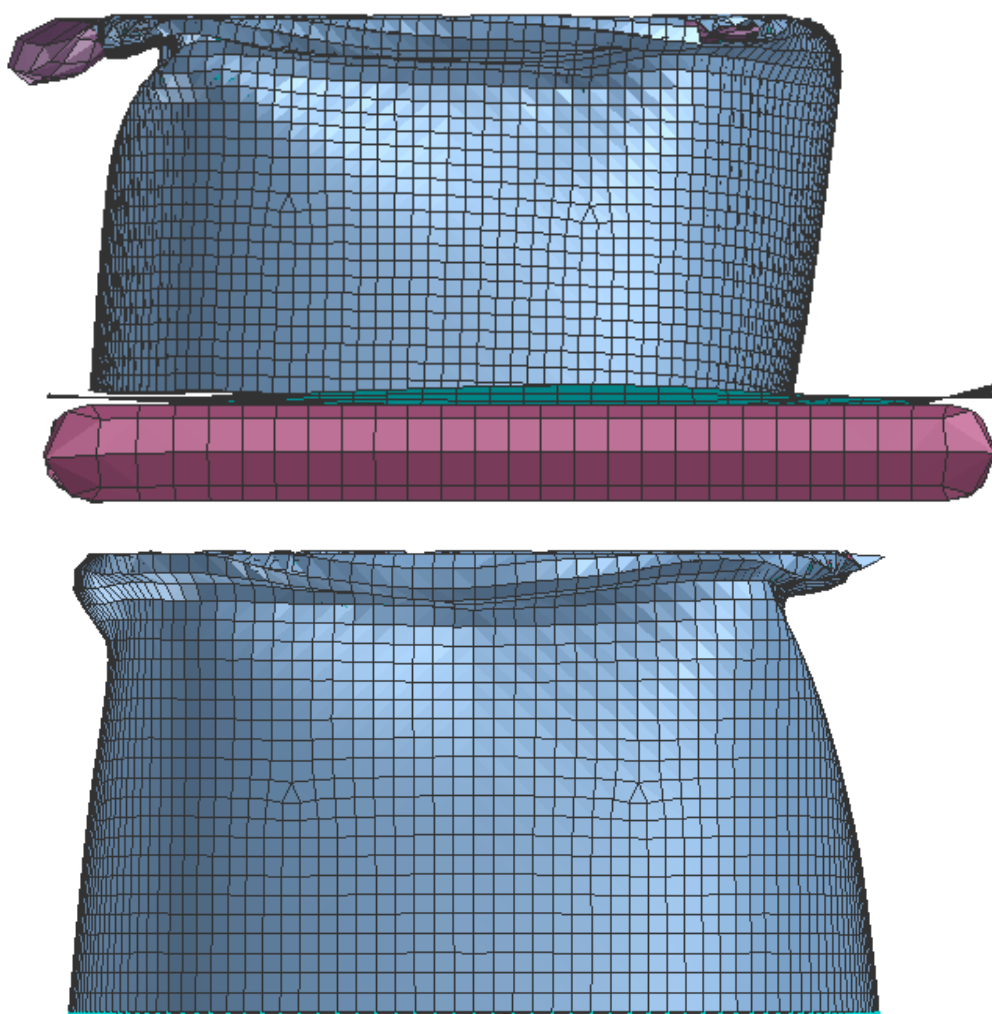


Graf. 28 - Porovnání elastické a tuhé impaktní přepážky



Obr. 69 - Deformace impaktní přepážky (mm)

Na vizualizaci deformace nebyla patrna žádná změna oproti tuhé impaktní přepážce. Deformační člen se lehce vychýlil z roviny kolmé na impaktor, ale tato změna nevyvolala žádný vliv na mód poruchy tak jako při reálné zkoušce. Pro další simulace tento faktor nebyl zohledněn a impaktní přepážka zůstala tuhá.



Obr. 70 - Porovnání deformace elastické a tuhé impaktní přepážky

8.4.5.3 Vliv tření

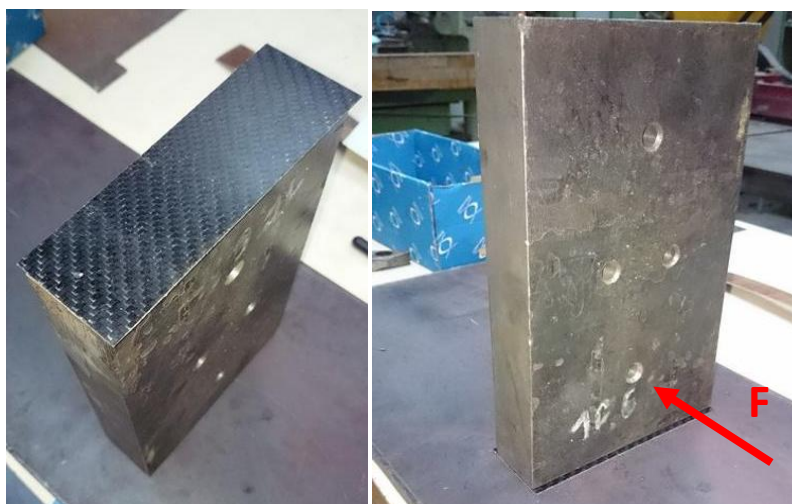
Podle několika dostupných zdrojů má na střední nárazovou sílu rasantní vliv tření mezi impaktorem a deformačním prvkem. Simulace začínala s koeficientem tření 0.1, přebraným z internetových podkladů. Po neúspěšných iteracích, které nevedly k uspokojivým výsledkům, bylo potřeba správně naladit jeho hodnotu. Z podkladů koeficient tření zcela neodpovídal, a proto bylo nejjednodušší si tento koeficient změřit přímo z reálné zkoušky. Pro zjištění koeficientu tření bylo využito znalostí z mechaniky a jeho určení vychází z principu na Obr. 71. Výpočet byl proveden podle Rov.35, kde T je tečná síla, μ je třecí součinitel a N je normálová síla. Síla T byla měřena vahou a převedena na sílu dle Newtonova zákona. Jako testovací vzorek byla použita dopadová plocha pádové zkoušky a vzorek uhlíkové tkaniny byl vyroben stejnou technologií a do stejné formy jakým se deformační prvek vyráběl. Zátěž na zkušební vzorku – síla N , byla 101,6 N. Po několika sadách měření vyšel zprůměrovaný výsledek tření mezi ocelí 11 373 a uhlíkovým vláknem HEXCELL 0.241.

Rov. 35

$$T = \mu N$$

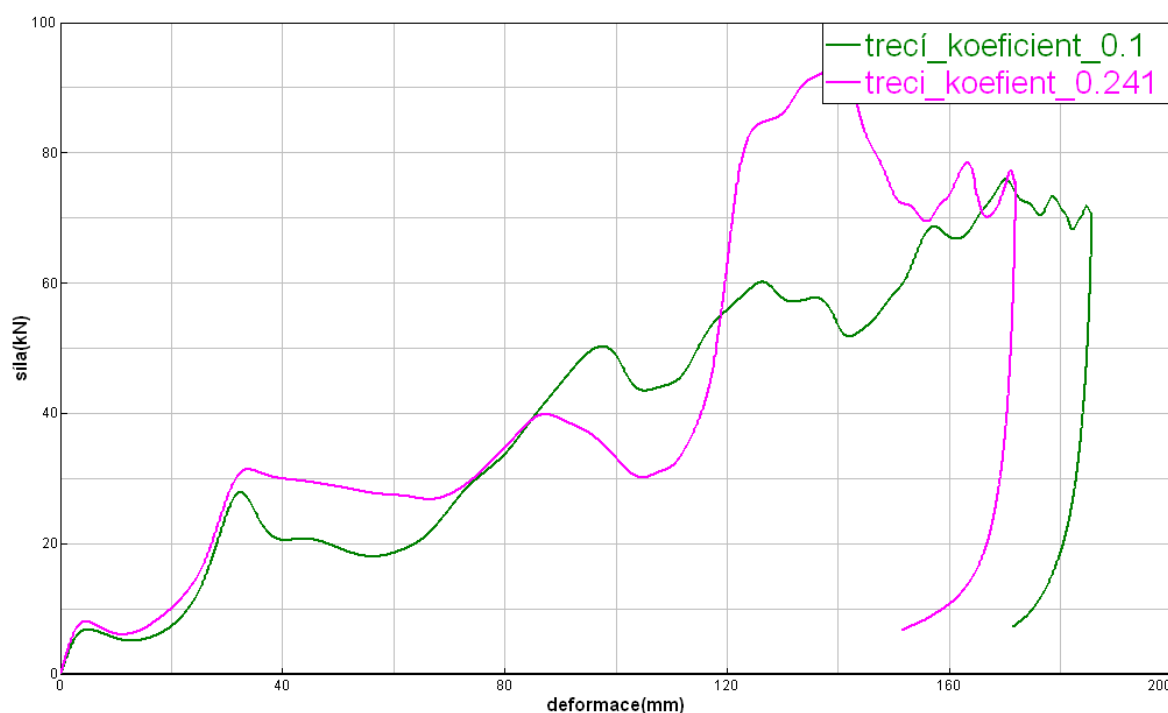


Obr. 71 – Grafická interpretace zkoušky tření



Obr. 72 - Zkouška koeficientu tření

Graf. 29 popisuje vliv tření v modelu. Podle tohoto grafu lze říci, že největším faktorem ovlivňujícím simulační průběh má koeficient tření. Po nastavení koeficientu na reálnou hodnotu začala simulace sledovat jisté reálné podobnosti a graf se velmi podobá realitě viz Kapitola 8.4.5. Tento krok byl poslední fází vývoje modelu a považován za finální.



Graf. 29 - Vliv tření mezi impaktorem a deformačním prvkem

8.4.6 Závěr

Numerická simulace kompozitního materiálu je velmi složitou úlohou. Z hlediska náročnosti na výpočetní čas, tvorbu modelu, materiálových konstant a zachycení módu poruchy. Všechny tyto parametry předpokládají optimální výrobní postup, dokonalé spojení vrstev a žádné materiálové vady.

Prototypové výrobky jako je deformační prvek, nebudou vykazovat stejné chování při zkoušce i pokud bude použit stejný výrobní postup a stejný operátor výroby. Technologie kontaktní laminace obnáší jisté nepřesnosti od numerického modelu, jakými jsou například, orientace vrstev, překlady vrstev, objemový podíl matrice a vláken, nebo geometrické odchylky formy. Všechny tyto faktory jsou zásadní pro dobrou korelaci modelu a reality. Proto hlavním výsledkem numerické simulace výrobku kontaktní laminací je predikce celkové deformace a průměrného zpomalení. Tyto dvě hodnoty se podařilo s drobnou odchylkou korelovat a model může být využit pro další návrh obdobné struktury deformačního členu.

Stejného módu porušení se však numericky nepodařilo dosáhnout. Je to dáno tím, že nejrealističtější model pěnového jádra neobsahuje kritéria eliminace prvků. Tudíž jádro ve vizualizaci nepodléhá reálnému průběhu deformace. Jádro v simulaci zůstalo spojeno v jednom partu bez poškození a při reálné zkoušce se rozlomilo na několik úlomků. Stejného módu poruchy tedy nemohlo nastat ani u porušení potahů. Při zkoušce došlo na jedné straně deformačního členu k delaminaci a na druhé ke křehkému odlamování. Tyto módy porušení se nepodařilo zachytit.

9 Závěr

Hlavním cílem této diplomové práce bylo zvýšení technické úrovně monopostů týmu eForce FEE Prague Formula. Po vypracování rešerše bylo zjištěno, že mnoho týmů v soutěži Formula Student používá pěnový deformační prvek. Tento typ používal tým ČVUT na monopostech FSE.01 a FSE.02. Kompozitní deformační prvky nejsou v soutěži běžným standardem a tuto konstrukci využívá opravdu málo špičkových týmů. Z tohoto důvodu vyplynul předpoklad na teoretické zvýšení bodového ohodnocení v disciplíně engineering design. Důkaz, že kompozitní deformační prvek není scestný, ukázala rešerše v ostatních formách motorsportu, kde se kompozitní materiál běžně používá. Největším příkladem je Formule 1. K jejich konstrukci neexistuje mnoho dostupných podkladů, ale z několika dokumentů se podařilo zjistit, že tyto vozy využívají pro absorpci energie sendvičovou strukturu. I tento fakt přispěl k rozhodnutí použít konstrukci sendvičového typu.

Prvním poznatkem práce byla zkušenost s absorpčními vlastnostmi uhlíkového kompozitu na voze FSE.03. Jeho deformační prvek se skládal ze svazku několika trubek. Tyto trubky byly vyrobeny firmou Compotech a jejich skladba byla dle práce [10] vhodná pro energii pohlcující strukturu. Hlavním premisou při návrhu deformačního členu bylo zjištění, že střední nárazová síla je stejná při dynamické i kvazi-statické zkoušce. Z této skutečnosti vycházel návrhový výpočet délky trubek pro absorpci daného množství energie. Následně byla skladba testována při kvazi-statických tlakových zkouškách, kde se ověřovaly vlastnosti jedné a svazku trubek. Zároveň byl zkoumán vliv iniciátoru, který vykázal jistou lineární závislost na střední nárazové síle. Z těchto údajů se již mohla analyticky vypočíst skladba pro splnění předpisu.

Reálný dynamický test však ukázal hlavní problém konstrukce. Při deformaci došlo k průhybu impaktní přepážky a trubky se vychýlily z osy nárazu. Tento fakt při návrhu nebyl zohledněn a v jeho důsledku došlo ke katastrofickému módu poruchy. Vyhodnocení dat ukázalo shodu s kvazi-statickým testem vzhledem ke střední nárazové síle. Díky vyosení trubek a následné katastrofální poruše dopadl impaktor na impaktní přepážku a byly překročeny maximální hodnoty zrychlení.

Trubky jsou z hlediska absorpce energie výhodnou koncepcí. Uzavřený tvar zaručuje stabilní hodnoty střední nárazové síly a provedení trubek Compotech je na velmi vysoké úrovni. Koncepce však měla vadu v rozměru použitých trubek. Pokud by trubky měly větší průměr, nebo by byly uloženy na dokonale tuhé přepážce, deformační člen by svoji funkci splnil. Při dynamickém testu se tyto trubky neosvědčily a z důvodu kolapsu nemohly být použity. Řešení pomocí trubek však není špatnou koncepcí, jelikož dokázaly pohltit většinu energie. K tomu byl deformační člen o 45% lehčí než pěnový. Poznatky získané vývojem se využily pro návrh další koncepce pro nadcházející sezónu na monopostu FSE.04x.

Cílem pro další generaci byla eliminace vyosení deformačního prvku z osy nárazu a zajištění progresivního průběhu deformace. Tento předpoklad vedl k sendvičovým strukturám, které by bylo možné vyrobit kontaktní laminací v prostorách laboratoří ČVUT. Problémem této technologie je dodržení poměru vláknů a matrice. Finální provedení tedy nikdy nebude tak precizní jako strojem navíjené trubky. Proto bylo potřeba zajistit dobrou vzpěrovou tuhost. Díky poznatkům z deformačního prvku FSE.03 se rozhodlo o zachování uzavřeného průřezu. Z úvodní rešerše vyplynulo, že pro zajištění vzpěrové stability je dobré

použít kuželovitost do 5°. Počáteční vize o tvaru musela splňovat konstrukční omezení zástavby do vozu a pravidla o minimálních rozměrech. Výchozím tvarem se tedy stal oválný průřez s kuželovitostí 5°.

Počátkem návrhu byla kvazi-statická zkouška, která ukázala zda-li je konstrukce dostatečně stabilní z hlediska vzpěru a kolik energie je schopna pohltit. Při analytickém návrhu skladby se vycházelo z napětí naměřeném při zkoušce tlakem. Následně se za použití experimentálního dynamického koeficientu navrhla skladba, která byla ověřena jednoduchým vzorcem pro vzpěr kompozitní desky sendvičové konstrukce (Rov. 4). Tento vzorec se nakonec ukázal jako použitelný i pro strukturu kuželu s oválným průřezem. Jeho odchylka od reálné hodnoty při dynamickém testu byla do 20%. Pro dynamické testování se navrhly dvě skladby s velkou bezpečností. Jedna předpokládala větší deformaci a druhá nižší.

Při dynamické zkoušce se oba vzorky chovaly velmi obdobně. Obě deformace materiálu se šířily progresivně bez katastrofální poruchy a to bylo hlavním cílem. Poruchy se šířily delaminací jádra a potahu, v některých místech dokonce křehkým odlamováním. Po vyhodnocení zkoušky bylo zjištěno, že na průběh deformace má obdobně jako u trubek vliv i průhyb impaktní přepážky. Oba vzorky se shodně vychýlily z osy nárazu a u vzorku VZ2 byl dokonce patrný jiný mód poruchy na straně většího průhybu přepážky. Vzorek VZ3, který byl tužší, takto rasantní změnu chování neměl. Na vyosení deformačního prvku měla vliv i výrobní vada rádiusu na rozhraní impaktní přepážky a konce prvku. Do tohoto rádiusu nebylo možné vložit pěnové jádro a toto místo se stalo nejslabší částí konstrukce. Zde se také iniciovala deformace. Podlomení deformačního prvku spolu s prohnutím impaktní přepážky způsobilo vychýlení obou vzorků z osy nárazu. Oba deformační prvky však pohltily předepsanou energii nárazu, ale předpisům vyhověl pouze vzorek VZ2. Tužší vzorek VZ3 přesáhl dovolenou hodnotu průměrného zpomalení. U obou prvků byla nevyužita velká část jejich deformační délky. To znamená mají zbytečnou hmotnost navíc. Pro odlehčení by bylo vhodné u vzorku VZ2 prodloužit segment I a tím by se využila jeho celá deformační délka. I přes to u vzorku VZ2 nastalo odlehčení oproti polyuretanové pěně o 35g.

Posledním bodem práce bylo ověření dynamické zkoušky v simulačním programu PAM-CRASH. Zpočátku práce bylo nutné provést několik sad fyzických testů a zjistit potřebné materiálové charakteristiky uhlíkového vlákna HEXCEL 43200 a pěny Divinycell H60. Z kvazi-statických testů byly naměřeny elastické i plastické vlastnosti uhlíku a tyto testy se následně validovaly softwarem PAM-CRASH. Dynamické koeficienty simulace byly laděny až na celkovém modelu. Kalibrace pěny proběhla ve dvou úrovních, nejprve kvazi-staticky a následně dynamickým testem. Materiálové charakteristiky pěny se podařilo v dynamice odladit a při simulaci celého prvku se ladily pouze vlastnosti uhlíkového vlákna.

Přístup modelování byl kombinací všech dostupných řešení pro simulaci kompozitu. Potahy z uhlíkového vlákna byly modelovány jako prvky typu SHELL a vnější potahy měly v jednom partu více vrstev laminátu. Ostatní party obsahovaly pouze jednu vrstvu laminátu. Jádro bylo vymodelováno prvky typu SOLID a všechny vrstvy spojeny vazbou TIED simulující matrici.

Z výsledků dynamické simulace se zjistilo, že odezva tří vrstev laminátu v jednom partu zcela neodpovídá realitě. Modelování čtyř vrstev přes dva party již dávalo shodnou odezvu s realitou. Největším faktorem ovlivňujícím průběh simulace však bylo tření mezi impaktorem a deformačním prvkem. Po tom, co se změnil reálný koeficient tření, začala simulace kopírovat tvar průběhu zkoušky a podařilo se docílit

velmi podobných průměrných hodnot. Model byl tedy kalibrován na vzorek VZ2 a jeho průběh se podařilo naladit tak, že by mohl být použit jako výchozí pro návrh další generace deformačního prvku.

Cíle vytyčené zadáním práce byly úspěšně dokončeny. Na monopostu FSE.04x byl použit deformační prvek sendvičové konstrukce, který vzbuzoval na závodech Formula Student velký ohlas. I díky němu se s tímto monopostem podařilo dosáhnout vynikajících výsledků jak na evropských závodech, tak i zámořských. Práce přinesla velké zkušenosti s výrobou kompozitního materiálu, zkušenosti s kvazi-statickými zkouškami materiálu a v neposlední řadě s dynamickým testem a jeho vyhodnocením. Konstrukce byla metodou reverzního inženýrství simulována v softwaru PAM-CRASH, ve kterém se získaly velké zkušenosti do budoucí praxe.



Obr. 73 - Nejúspěšnější vůz týmu eForce FEE Prague Formula - FSE.04x s deformačním členem vyvinutým v DP

Seznam použité literatury

- [1] FEL, Č. *eForce FEE Prague Formula* [online]. © 2016 [cit. 2016].
Dostupné z: <http://eforce.cvut.cz>
- [2] SAE INTERNATIONAL. *2016 Formula SAE® Rules*. 2016.
- [3] *Racecar Engineering: Formula Student 2016 Cars - Racecar Engineering* [online]. © 2016 [cit. 2016-11-21]. Dostupné z: <http://www.racecar-engineering.com/formulastudent/>
- [4] ŘADA, M. *Návrh kompozitního deformačního prvku pro vůz Formula Student*. Praha: ČVUT, 2014.
- [5] N.J. HOFF A S.E. MAUTNER. The buckling of sandwich-type panels. *Journal of the*. 1945, č. 12, s. 285-297
- [6] CALISKAN, A. G. *Crashworthiness of Composite Materials & Structures for Vehicle Applications*. Dearborn, Michigan: SAE International, 2000.
- [7] KRATOCHVÍL, B., V. ŠVORČÍK a D. VOJTĚCH. *Úvod do studia materiálů*. Praha: VŠCHT v Praze, 2005, 190 s
- [8] EHRENSTEIN, G. W. *Polymerní kompozitní materiály*. 1. Překlad Karel DOLEČEK. Praha (ČR): Nakladatelství Scienta, 2009, 351 s. ISBN 978.
- [9] ING. ZDENĚK KOŘÍNEK, C.. *KOMPOZITY - Ing. Zdenek Korinek, CSc.: Kompozity* [online]. © 2005 [cit. 2014-4-29]. Dostupné z: <http://mujweb.cz/zkorinek/>
- [10] KULÍŠEK, V. *Investigation of composite tubes subjected to impact and quazi-static load*. Praha: ČVUT, 2012.
- [11] RION, J. *Ultra-Light Photovoltaic Composite Sandwich Structures*. Suisse: ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE, 2008.
- [12] MARTIN, B. *Mechanika kompozitních materiálů, analytické metody výpočtu stabilitních úloh kompozitních desek a sendvičových panelů a jejich porovnání s MKP*. Praha: ČVUT.
- [13] HULL, D. A unified approach to progressive crushing of fibre-reinforced composite tubes. *Composites Science and Technology*. 1991, č. 40.4, s. 377-421
- [14] ESI GROUP. Solver reference manual. In. Volume VI. ESI GROUP, 2014, s. 526

Seznam použitých jednotek

Veličina	Jednotka	Název
Délka	[nm]	nanometr
	[μ m]	micrometr
	[mm]	milimetr
Rychlost	[mm/s]	milimetr za sekundu
	[m/s]	kilometr za sekundu
Čas	[ms]	milisekunda
Pevnost v tahu	[MPa]	megapascal
	[GPa]	gigapascal
Modul pružnosti v tahu	[MPa]	megapascal
	[GPa]	gigapascal
Pevnost ve smyku	[MPa]	megapascal
	[GPa]	gigapascal
Modul pružnosti ve smyku	[MPa]	megapascal
	[GPa]	gigapascal
Napětí v tlaku	[MPa]	megapascal
	[GPa]	gigapascal
Zrychlení	[g]	g
Energie	[J]	Joule
Hustota	[kg/m ³]	kilogram na metr krychlový
Jemnost vláken	[tex]	tex

Seznam příloh

Příloha 1	Výkres sestavy deformačního prvku FSE.04x
Příloha 2	Laminační protokol vzorku VZ2
Příloha 3	Protokol z pádové zkoušky
Příloha 4	Sekvence průběhu deformace v programu PAM-CRASH
Příloha 5	Fotodokumentace vzorku VZ2
Příloha 6	FSAE test data protokol

Příloha 2 – Laminační protokol vzorku VZ2

LAMINAČNÍ PROTOKOL

Díl: Deformační prvek VZ2

Datum: 19.3. 2015

Skladba (matrice): Epoxid LR284MGS + LH287

Materiál	Úhel natočení [°]	Tloušťka [mm]
CF Twill 2/2 200g/m2	45	
CF Twill 2/2 200g/m2	0	
CF Twill 2/2 200g/m2	0	
CF Twill 2/2 200g/m2	0	
Divinycell H60		4
CF Twill 2/2 200g/m2	0	
CF Twill 2/2 200g/m2	0	
CF Twill 2/2 200g/m2	0	
CF Twill 2/2 200g/m2	0	

Hmotnosti:

Vláken [g]	313,5
Jádra [g]	44
Matrice [g]	280
Hmotnost před ořezem [g]	533
Objemový poměr vláken [%]	64
Hmotnost dílu [kg]	515

Čas infuze:

Vytvrzení: 50°C @ 12hod.

Poznámka:

Laminoval: Záruba + Balejík

Podpis:



Příloha 3 – Protokol z pádové zkoušky



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta strojní
Ústav letadlové techniky

Zkušební protokol

TESTING REPORT

Název: Pádová zkouška deformačního členu pro vůz soutěže Formula Student

TITLE: IMPACT ATTENUATOR FRE FALL TEST FOR THE FORMULA STUDENT CAR

Měřeno pro: eForce FEE Prague Formula

MEASURED FOR:

Autor: Ing. Tomáš Čenský, Ph.D.
TESTED BY:

Datum: 28.03.2015
DATE:

Zakázka č.: 2015-eForce01
CONTRACT NO.:

Objednávka č.:
ORDER NO.:

ČVUT v Praze
Fakulta strojní
Ústav letadlové techniky
Karlovo nám. 13
121 35 Praha 2

tel.: +420 224 357 205
fax: +420 224 920 594
<http://aerospace.fsik.cvut.cz>

IČ: 68407700
DIC: CZ68407700
Bankovní spojení: KB Praha 6
č. ú.: 19-5505030267/0100

Název: Pádová zkouška deformačního členu pro vůz soutěže Formula Student

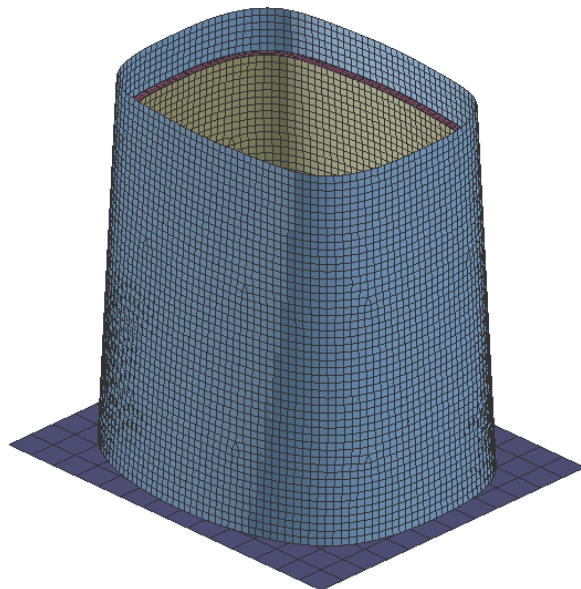
TITLE: IMPACT ATTENUATOR FREEFALL TEST FOR THE FORMULA STUDENT CAR

Parametry testu			
TEST SETUP			
Výška pádu [m] HEIGHT OF FREE FALL [M]	1,75	Kamera	Rozlišení RESOLUTION 1920x1080
Váha závaží [kg] WEIGHT [KG]	433,5		Rychlost snímání FRAMES PER SECOND 30
Měřená veličina MEASURED VALUE	Zrychlení ACCELERATION		
Zařízení kalibrováno CALIBRATED	Ano YES		
Frekvence snímání [Hz] FREKVENCE [Hz]	25 000		
Použitá měřicí technika:			
USED EQUIPMENT			
Dynamická měřicí karta IEPE - National Instruments 9234 (ser.č.: 14387F9)			
Kalibrátor Bruel and Kjaer - typ 4294 (ser.č. 2618024)			
Akcelerometr - PCB Piezotronics typ 353B01 (ser.č. 109167)			
Váha - Martes 1T46LN (ser.č. 200212304)			

Příloha 4 - Sekvence průběhu deformace v programu PAM-CRASH

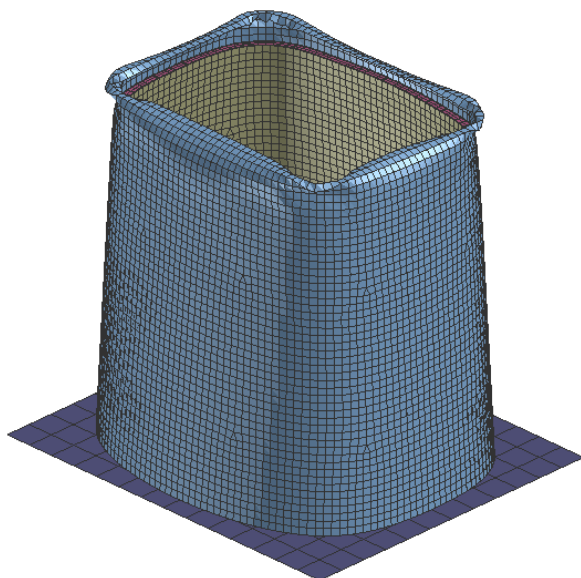
FSE04_VZ2_V8

1 / 0.000000



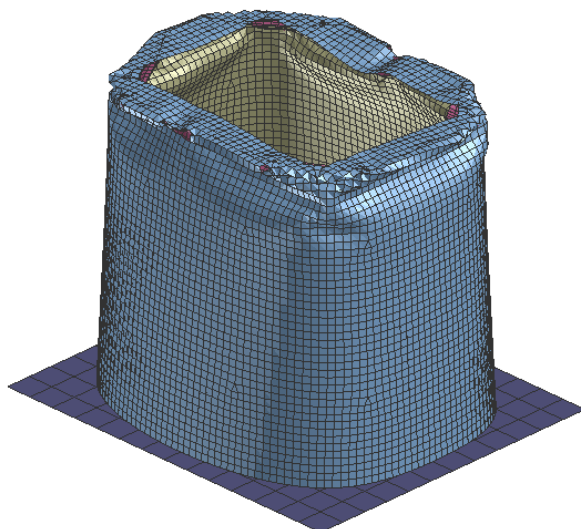
FSE04_VZ2_V8

5 / 2.000011



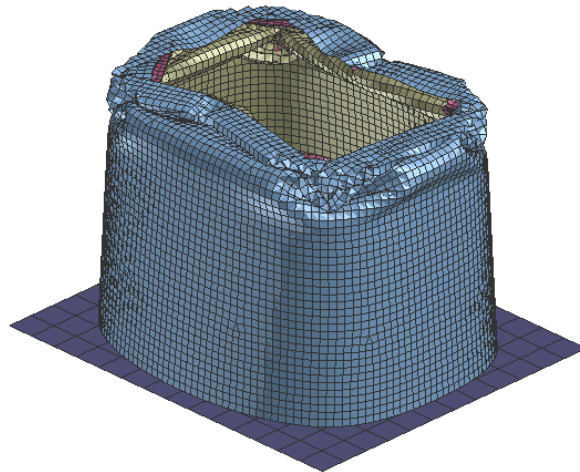
FSE04_VZ2_V8

15 / 7.000012



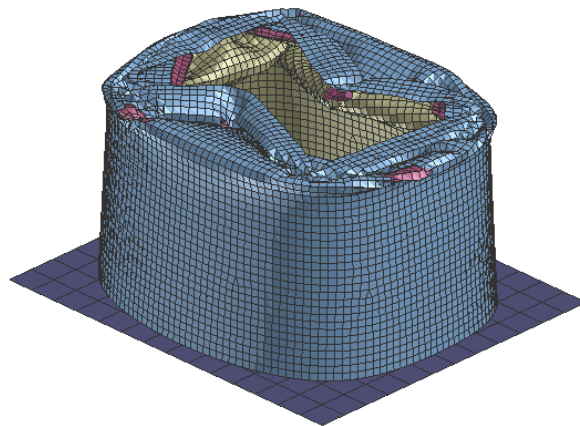
FSE04_VZ2_V8

30 / 14.500004



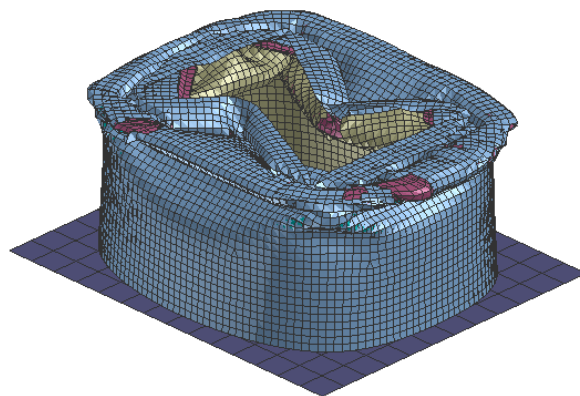
FSE04_VZ2_V8

45 / 22.000031

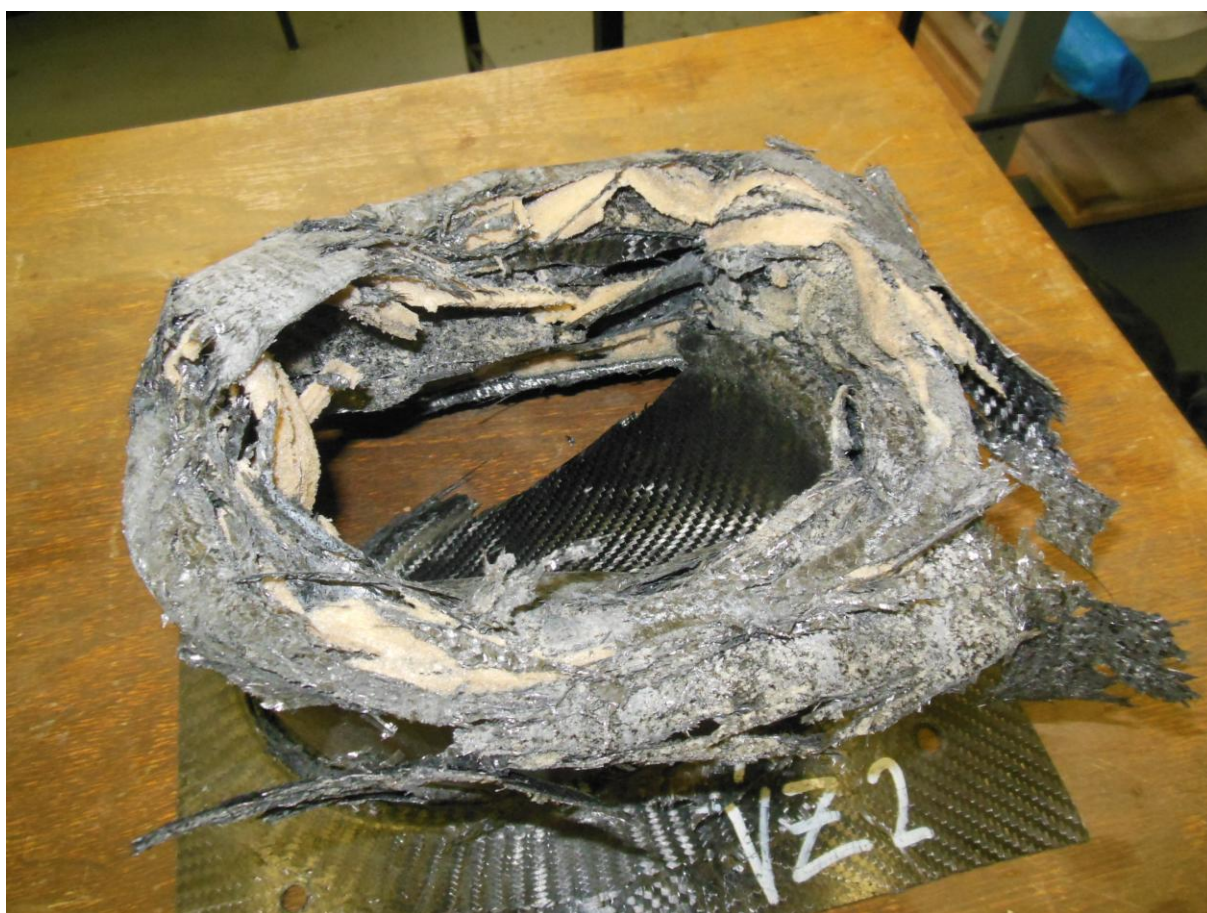


FSE04_VZ2_V8

60 / 29.500029



Příloha 5 – Fotodokumentace vzorku VZ2





Příloha 6 – FSAE test data protokol



APPENDIX T-2 2015 FSAE® IMPACT ATTENUATOR DATA REPORT

This form must be completed and submitted by all teams no later than the date specified in the Action Deadlines on specific event website. The FSAE Technical Committee will review all submissions which deviate from the FSAE® rules and reply with a decision about the requested deviation. All requests will have a confirmation of receipt sent to the team. Impact Attenuator Data (IAD) and supporting calculations must be submitted electronically in Adobe Acrobat Format (*.pdf). The submissions must be named as follows: schoolname_IAD.pdf using the complete school name. Submit the IAD report as instructed on the event website. For Michigan and Lincoln events submit through fsaeonline.com.

***In the event that the FSAE Technical Committee requests additional information or calculations, teams have one week from the date of the request to submit the requested information or ask for a deadline extension.**

University Name: Czech Technical University in Prague
Team Contact: Bc. František Pech
Faculty Advisor: Ing. Vít Hlinovský CSc.

Car Number(s) & Event(s): _____
E-mail Address: pechfran@fel.cvut.cz
E-mail Address: hlinovsk@fel.cvut.cz

Material(s) Used	CF Hexcell 43200 Twill 2x2 3K 200g/m ² ; Divinycell H60
Description of form/shape	Elliptical cone
IA to Anti-Intrusion Plate mounting method	Mounted with four M8 made 8.8 bolts
Anti-Intrusion Plate to Front Bulkhead mounting method	Mounted with four M8 made 8.8 bolts
Peak deceleration (<= 40 g's)	30.5 g
Average deceleration (<= 20 g's)	14.7 g

Confirm that the attenuator contains the minimum volume 200mm wide x 100mm high x 200mm long YES

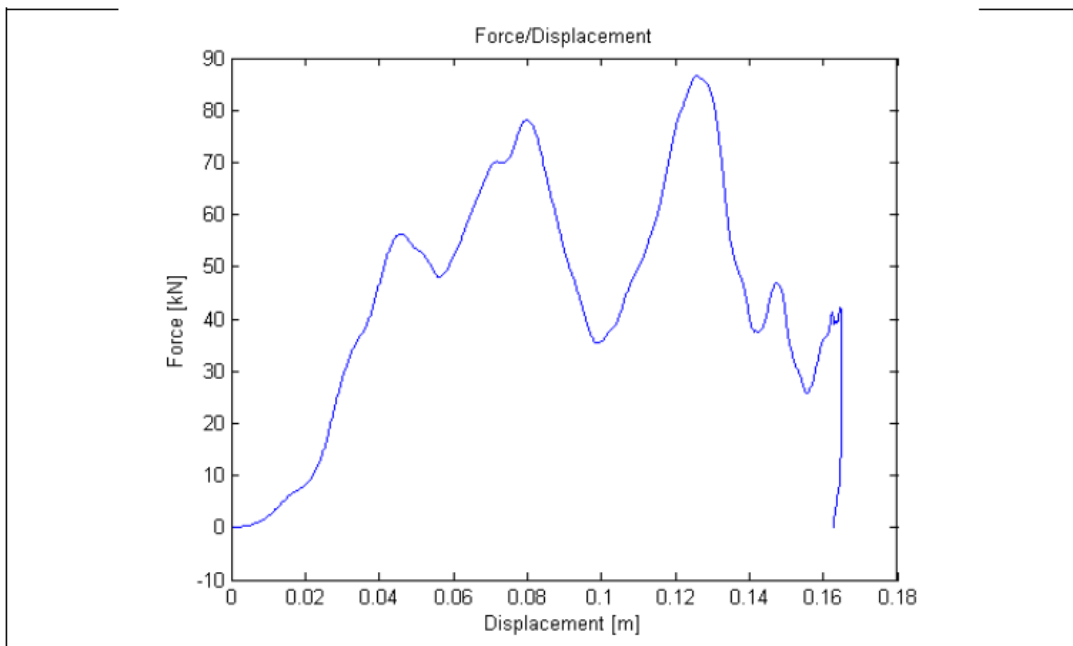


Figure 1: Force-Displacement Curve (dynamic tests must show displacement during collision and after the point $v=0$ and until force becomes = 0)

ATTACH PROOF OF EQUIVALENCY TECHNICAL COMMITTEE DECISION/COMMENTS

Approved by _____ Date _____

NOTE: THIS FORM AND THE APPROVED COPY OF THE SUBMISSION MUST BE PRESENTED

AT TECHNICAL INSPECTION AT EVERY FORMULA SAE EVENT ENTERED

University Name: Czech Technical University in Prague Car Number(s) & Event(s): _____

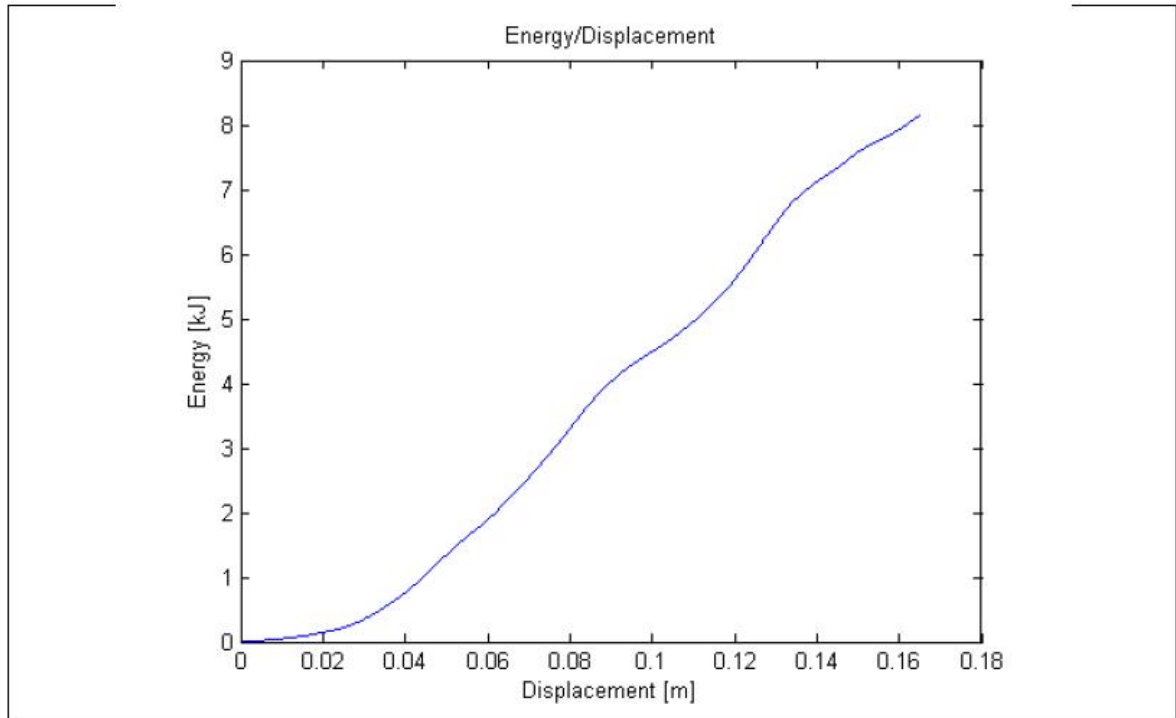


Figure 2: Energy-Displacement Curve (dynamic tests must show displacement during collision and after v=0)



Figure 3: Attenuator as Constructed



Figure 4: Attenuator after Impact



APPENDIX T-2
2015 FSAE® IMPACT ATTENUATOR DATA REPORT

Energy Absorbed (J): Must be ≥ 7350 J	8144 J	Vehicle includes front wing in front of front bulkhead?	Yes
IA Max. Crushed Displacement (mm):	165	Wing structure included in test?	No
IA Post Crush Displacement - demonstrating any return (mm):	163	Test Type:(e.g. barrier test, drop test, quasi-static crush)	Drop test
Anti-Intrusion Plate Deformation (mm)	<2 mm	Test Site:(must be from approved test site list on website for dynamic tests)	CTU in Prague Department of Aerospace Engineering

University Name: Czech Technical University in Prague Car Number(s) & Event(s): _____

T3.22.2, Note 2

The deceleration in vertical axis was measured. The velocity and displacement were iteratively calculated, using the assumption of a uniformly accelerated motion.

Velocity

$$v_{i+1} = v_i - aT,$$

where v ...velocity [m.s⁻¹]
 a ...measured deceleration [m.s⁻²]
 T ...sampling period [s]

The initial velocity in the moment of impact v_0 was calculated from the law of conservation of mechanical energy (friction and air resistance are negligible):

$$\frac{1}{2}mv_0^2 = mgh$$

$$v_0 = \sqrt{2gh},$$

where g ...gravitational constant [m.s⁻²]
 h ...drop height [m]

Displacement

$$d_{i+1} = d_i + v_iT - \frac{1}{2}aT^2,$$

where d ...displacement [m]

The displacement in the moment of impact was set $d_0 = 0$.

Energy

The absorbed energy E_a [J] was calculated as a difference of the mechanical energy at the moment and at the beginning of the impact

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

Average deceleration

The average deceleration during the test \bar{a}_{test} [m.s⁻²] was calculated as a mean value of the measured deceleration between the moment of impact and the end of rebound (when $a = 0$). Because the test was conducted as a drop tower crash test, it was necessary to add the gravitational constant to the measured values of deceleration. Only then do the deceleration values correspond to those of a vehicle run horizontally into a barrier:

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

The mass m_{test} of the weight used for the test differed from $m_{req} = 300kg$ specified in the functional requirements. The average deceleration therefore had to be scaled in order to calculate the deceleration corresponding to m_{req} :

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

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

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

Peak deceleration

The peak deceleration during the test \hat{a}_{test} [m.s⁻²] was determined as the highest deceleration between the moment of impact and the end of rebound (when $a = 0$). The CFC 60 filter was used to filter the peaks in the raw data. For the same reason as in the calculation of the average deceleration, the gravitational constant was added to that value and the result then scaled:

$$\hat{a}_{test} = \max_{n_{start} \leq i \leq n_{end}} \{a_i + g\}$$

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

T3.22.3, b)

Wing is attached by 8 aluminium M5 bolts trough endplate to frame.

Fasteners shear calculation

Material used:

Aluminium EN AW 6060 T.6

$R_{p0,2} = 160 \text{ MPa}$ Yield strength

$R_m = 215 \text{ MPa}$ Ultimate strength

Shear stress:

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

Shear force on 1 bolt

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

$$F_{bolt} = \frac{R_m * \pi * d^2}{4} = \frac{215 * \pi * 4,02^2}{4} = 2,73 \text{ kN}$$

Total force needed for wing attachment failure:

$$F_{wing} = 8 * F_{bolt} = 21,84 \text{ kN}$$

Total force during impact:

$$F_{IA} = m * g * a_{peak} = 300 * 9,81 * 30,5 = 89,7 \text{ kN}$$

$$F_{total} = F_{wing} + F_{IA} = 21,84 + 89,7 = 114,54 \text{ kN}$$

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

$$F_{total} < F_{limit}$$

Insert Required Calculation T3.22.2 note 2 and T3.22.3

University Name: Czech Technical University in Prague Car Number(s) & Event(s): _____

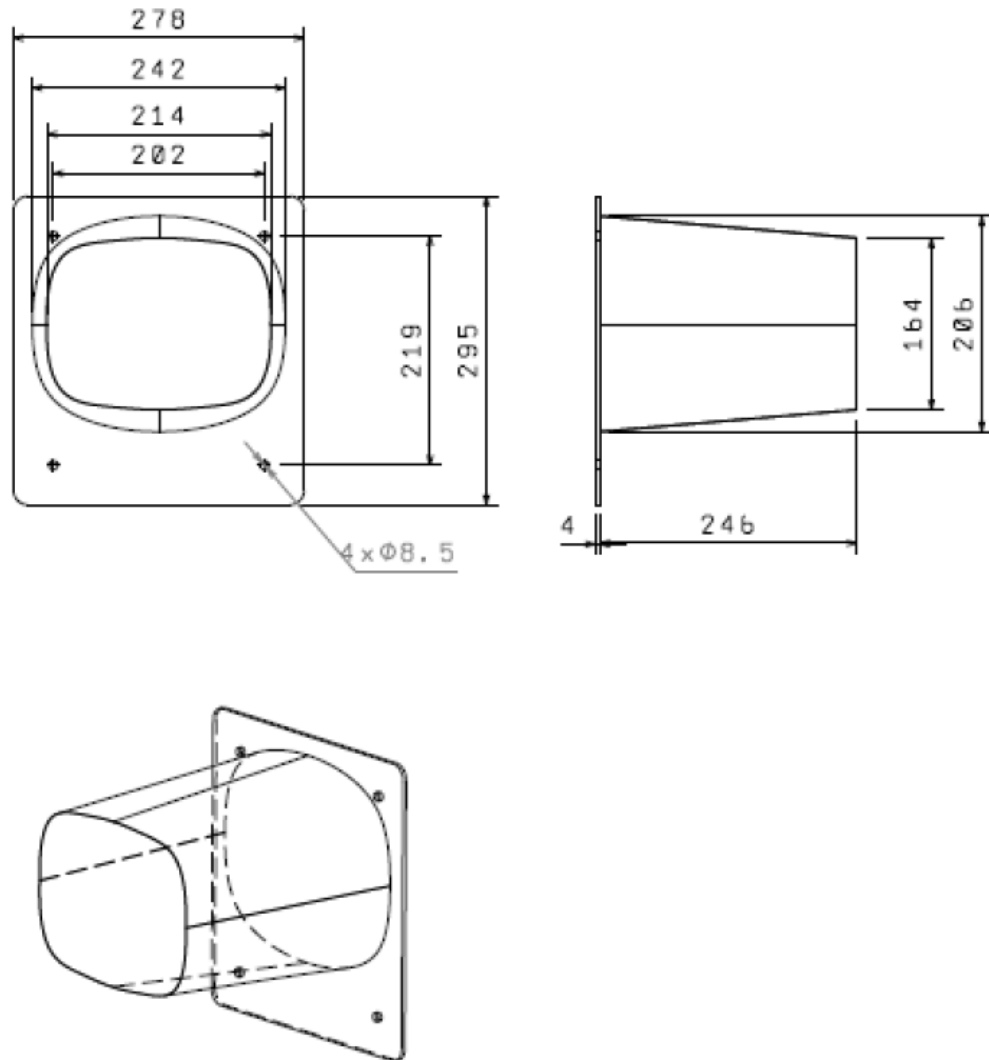


Figure 5 : Design Drawings

Length (fore/aft direction): 250mm (≥ 200 mm)

Width (lateral direction): 242mm (≥ 200 mm)

Height (vertical direction): 206mm (≥ 100 mm)

Attenuator is at least 200mm wide by 100mm high for at least 200mm: Yes

Attach additional information below this point and/or on additional sheets

Test schematic, photos of test, design report including reasons for selection and advantages/disadvantages, etc.
Additional information shall be kept concise and relevant.