

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 2301T001 Dopravní a manipulační technika

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Vývoj deformačního členu pro vůz FSAE

Autor: **Bc. Martin KOCOUREK**

Vedoucí práce: **Doc. Ing. Martin HYNEK, Ph.D.**

Akademický rok 2016/2017

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Martin KOCOUREK**
Osobní číslo: **S15N0034P**
Studijní program: **N2301 Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Dopravní a manipulační technika**
Název tématu: **Vývoj deformačního členu pro vůz FSAE**
Zadávající katedra: **Katedra konstruování strojů**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

Základní požadavky:

Rešerše možných řešení deformačního členu pro FSAE. Specifikace požadavků. Konstrukční návrh pro ZČU, včetně zakomponování členu do vozidla a přípravku pro upevnění deformačního členu při testování. Vypracování postupu výroby, materiálového konceptu. Použití VPS (PAM-CRASH) pro numerickou simulaci ověření splnění požadavků FSAE. Výroba deformačního členu. Provedení zkoušky deformačního členu vyžadovanou pravidly. Porovnání výsledků simulace a testu.

Základní technické údaje:

Technické parametry jsou uvedeny v příloze zadání.

Osnova diplomové práce:

1. Rešerše
2. Konstrukční návrh deformačního členu
3. Numerická simulace konceptu
4. Experimentální měření a porovnání výsledků
5. Vyhodnocení a závěr

Rozsah grafických prací: **dle potřeby**
Rozsah kvalifikační práce: **50-70 stran A4**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**
Seznam odborné literatury:

ESI GROUP VPS 2016 Solver Reference Manual. ESI Group, 2016

VLK, F. Stavba motorových vozidel. Brno: nakl. Vlk, 2003

MALEN, D. E. Fundamentals of Automobile Body Structure Design. Hardbound: SAE International, 2011

Podkladový materiál, výkresy, katalogy, apod. poskytnuté zadavatelem úkolu.

Vedoucí diplomové práce: **Doc. Ing. Martin Hynek, Ph.D.**

Katedra konstruování strojů

Konzultant diplomové práce: **Ing. Miloslav Pašek, Ph.D.**

MECAS ESI, s.r.o.

Datum zadání diplomové práce: **19. září 2016**

Termín odevzdání diplomové práce: **2. června 2017**



Doc. Ing. Milan Edl, Ph.D.
děkan



Doc. Ing. Václava Lašová, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 19. září 2016

Prohlášení o autorství

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

V Plzni dne:

.....

podpis autora

ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ (BAKALÁŘSKÉ) PRÁCE

AUTOR	Příjmení Kocourek	Jméno Martin	
STUDIJNÍ OBOR	2301T001 „Dopravní a manipulační technika“		
VEDOUcí PRÁCE	Příjmení Doc. Ing. Hynek, Ph.D.	Jméno Martin	
PRACOVIŠTĚ	ZČU - FST - KKS		
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte
NÁZEV PRÁCE	Vývoj deformačního členu pro vůz FSAE		

FAKULTA	strojní	KATEDRA	KKS	ROK ODEVZD.	2017
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	99	TEXTOVÁ ČÁST	68	GRAFICKÁ ČÁST	31
---------------	----	---------------------	----	----------------------	----

STRUČNÝ POPIS ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY	Diplomová práce obsahuje návrh deformačního členu pro vozidlo Formula Student ve třech variantách, včetně zakomponování do sestavy. Dynamická zkouška byla simulována a zároveň byl proveden reálný experiment.
KLÍČOVÁ SLOVA	deformační člen, numerická simulace, voštinový materiál, dynamická zkouška, vzorky, bezpečnost

SUMMARY OF DIPLOMA SHEET

AUTHOR	Surname Kocourek	Name Martin	
FIELD OF STUDY	2301T001 „Transport and handling Machinery“		
SUPERVISOR	Surname Doc. Ing. Hynek, Ph.D.	Name Martin	
INSTITUTION	ZČU - FST - KKS		
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR	Delete when not applicable
TITLE OF THE WORK	Development of the impact attenuator for vehicle FSAE		

FACULTY	Mechanical engineering	DEPARTMENT	Machine Design	SUBMITTED IN	2017
----------------	------------------------	-------------------	----------------	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	99	TEXT PART	68	GRAPHICAL PART	31
----------------	----	------------------	----	-----------------------	----

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	Diploma thesis contents development of the impact attenuator for the vehicle Formula Student in three variants including integration to the assembly. Dynamic test was simulated and also it was made a real experiment.
KEY WORDS	impact attenuator, numerical simulation, honeycomb, dynamic test, sample, safety

Poděkování

Rád bych poděkoval všem, kteří mi pomohli s mojí diplomovou prací. V první řadě patří můj dík Doc. Ing. Martinu Hynkovi, Ph.D. za vedení této práce a Ing. Miloslavovi Paškovi Ph.D. za rady, konzultace a přístup, který ke mně měl. Dále děkuji Ing. Stanislavovi Špírkovi Ph.D. za vřelý přístup a přínosné konzultace. Zároveň bych chtěl poděkovat členům týmu UWB Racing Team Pilsen, kteří mi v případě potřeby vždy pomohli a poradili. V neposlední řadě děkuji své rodině, za plnou podporu během celého studia.

Obsah

Úvod	3
1. Bezpečnost vozidel.....	4
1.1 Bezpečnost v F1.....	4
1.2 FSAE.....	5
2. Rešerše	6
2.1 Specifikace požadavků kladené organizací FSAE	6
2.2 Obecně kladené požadavky	8
2.3 FSAE standardní deformační člen.....	8
2.4 Konkurenční týmy	11
2.5 UWB	12
2.6 Koncepty deformačního členu	13
2.7 Materiály	13
2.7.1 Plechy.....	14
2.7.2 Pěny	14
2.7.3 Hliníková voština.....	15
2.7.4 Kompozitní materiály	15
3. Návrh deformačního členu	16
3.1 Výběr materiálu pro deformační člen.....	16
3.2 Zkoušky vzorků	16
3.2.1 Tlaková zkouška	16
3.2.2 Zkouška smykem	22
3.2.3 Výsledné hodnoty	28
3.2.4 Simulace zkoušky vzorků.....	29
3.3 Deformační člen.....	32
3.3.1 Hliníkový deformační člen – Varianta č. 1.....	32
3.3.2 Aramidový deformační člen s příčným narušením struktury – Varianta č. 2.....	33
3.3.3 Aramidový deformační člen s vnitřním odlehčením – Varianta č. 3.....	34
3.4 Ochranná přepážka.....	35
3.5 Přípravek pro fyzický test.....	37
3.6 Sestava pro dynamickou zkoušku	39
4. Numerická simulace.....	40
4.1 Vliv rychlosti deformace na chování materiálu	40
4.2 Model sestavy pro numerickou simulaci	42
4.3 Síť	43
4.4 Okrajové podmínky.....	45
4.5 Nastavení materiálu.....	46

4.6	Výsledky	47
5.	Výroba sestavy deformačního členu pro dynamickou zkoušku	52
6.	Dynamická zkouška deformačního členu	54
7.	Porovnání simulace a experimentu.....	61
7.1	Hliníkový deformační člen	61
7.2	Aramidový deformační člen	62
7.3	Shrnutí.....	63
Závěr		65
Použitá literatura.....		66
Seznam obrázků.....		67
Seznam tabulek.....		68
Seznam grafů.....		68
Seznam příloh.....		68

Úvod

Tématem této diplomové práce je návrh deformačního členu pro Formuli Student. Formula Student je mezinárodní soutěž technických univerzit z celého světa. Hlavním cílem každé univerzity je postavit vozidlo formulového typu a zúčastnit se závodů. Na závodě musí týmy kromě dynamických částí závodu obhájit ve statických disciplínách svůj vůz v oblasti návrhu, výroby, dokumentace a současně i schopnosti vozidlo prodat. Stejně jako u každého závodního vozidla je i v případě studentské formule kladen důraz na bezpečnost řidiče vozidla a současně také všech účastníků. Kromě bezpečnostních opatření organizačních disponuje také každé vozidlo bez výjimky bezpečnostními prvky. Pro případ čelního nárazu vozidla, ke kterému skutečně občas dochází, musí být každé vozidlo vybaveno deformačním členem v přední části vozidla, který zmírňuje následky nehody.

Cílem diplomové práce je navrhnout deformační člen, který v první řadě splňuje veškeré bezpečnostní požadavky stanovené pravidly. V druhé řadě se bere zřetel na vlastní hmotnost, hmotnost souvisejících prvků, jednoduchost montáže a cenovou dostupnost. Součástí pravidel, týkajících se deformačního členu, je dynamický test, při kterém musí být prokázáno splnění požadavků. Dynamický test se provede na přípravku, který vychází z přední části rámu. K přípravku se deformační člen připevní spolu s ochrannou přepážkou. Pro ověření, zda návrh splní požadavky, bude provedena numerická simulace dynamické zkoušky. Vhodné varianty se vyrobí a podrobí pádové dynamické zkoušce. Na základě výsledků z dynamické zkoušky vzejde deformační člen, kterým bude disponovat nový vůz UWB04 závodního týmu UWB Racing Team Pilsen. Na základě porovnání simulace a experimentu bude možné zpřesnit simulaci, lépe predikovat chování deformačního členu a dopředu připravit optimální variantu deformačního členu a přílehlých součástí ve vozech nadcházejících let.

1. Bezpečnost vozidel

Dopravní prostředky jsou kvůli bezpečnosti posádky vybaveny celou řadou bezpečnostních prvků. Ty se dají rozdělit do dvou základních odvětví: aktivní a pasivní bezpečnostní prvky. Úkolem aktivních bezpečnostních prvků je předejít vzniku nehody. Mezi aktivní prvky bezpečnosti patří například: brzdy, řízení, výkonný motor, pneumatiky, odpružení a tlumiče, dobrý výhled z vozidla, osvětlení automobilu a řada elektronických systému napomáhajících lepší ovladatelnosti vozidla či pohodlí řidiče.



Obrázek 1 - Prvky aktivní bezpečnosti

V případě, že „selžou“ prvky aktivní bezpečnosti a dojde k nehodě, přichází na řadu prvky bezpečnosti pasivní. Ty mají především řídit: průběh nehody, postupnou deformaci jednotlivých částí či pohyb pasažéra ve vozidle a snížit tak účinky vzniklé nehody a ochránit posádku a okolní účastníky provozu. Mezi pasivní prvky bezpečnosti vedle struktury karoserie patří zejména: bezpečnostní pásy, airbag, dětské autosedačky a aktivní systémy ochrany cestujících.



Obrázek 2 - Prvky pasivní bezpečnosti

1.1 Bezpečnost v F1

Formule 1 je označována královskou disciplínou automobilového sportu. Jedná se o soutěž velmi podobnou Formuli Student zejména v tom, že si každý tým konstruuje své vozidlo sám a musí splňovat daná pravidla. Vozidla dosahují rychlosti až 370 km/h. Vysokých rychlostí dosahují i v zatáčkách, z čehož vyplývají přísné požadavky pro bezpečnostní prvky. Mezi bezpečnostní prvky se řadí opěrka, lemující celý kokpit, odnímatelná sedačka, vyrobená z uhlíkových vláken, ochranný oblouk chránící jezdce hlavu při přetočení vozidla koly vzhůru. Dále bezpečnostní pásy obsahují popruhy pro ramena, pánev a rozkrok a sbíhají se do centrální spony. Systém HANS¹ spolu s přilbou

¹ HANS - Head and neck support – podpora hlavy a krku

² ZYLON – obchodní označení textilního vlákna s chemickým složením poly(p-fenylen-2, 6-benzobisoxazol)

chrání jezdce hlavu a krční páteř. „Monokok“ – rám vozidla vyztužuje Zylon² a panely z uhlíkových vláken.



Obrázek 3 - Bezpečnostní prvky F1

Kromě vozidla napomáhá bezpečnosti uzpůsobená trať. Významnou inovací v tomto směru je Tecpro bariéra, jež pohltí značné množství energie a postupně zpomaluje vozidlo při nárazu ve vysoké rychlosti a zachová tak přetížení působící na řidiče na nižší hodnotě.

1.2 FSAE

Jedná se o studentský projekt, což je důvodem pro vytvoření speciálních pravidel a zakomponování mnoha bezpečnostních prvků. Bezpečnost studentů je prioritou číslo jedna, a proto existují obsáhlá omezující, příkazující a zakazující pravidla, která musí každé vozidlo bez výjimky splňovat a která jsou pečlivě kontrolována před započítáním vlastních závodů.

Velmi významným prvkem je v oblasti pasivní bezpečnosti základní stavební kámen celého vozu – rám. Standardní prostorový trubkový rám se skládá z trubek daných minimálních rozměrů, dvou oblouků chránících řidiče a boční nárazový člen. Mezi další prvky pasivní bezpečnosti patří nehořlavý oděv každého řidiče včetně rukavic, bot a helmy. Kokpit neboli prostor pro řidiče obsahuje další prvky snižující následky nehody. Jsou to hlavová opěrka, 5-7 bodové pásy či celkové uspořádání tak, aby bylo možno opustit vozidlo do 5 sekund v případě vzplanutí vozidla. V neposlední řadě je do vozidla zakomponován také deformační člen, jehož účelem je snížení účinků nehody v případě čelního nárazu.

² ZYLON – obchodní označení textilního vlákna s chemickým složením poly(p-fenylen-2, 6-benzobisoxazol)

2. Rešerše

2.1 Specifikace požadavků kladené organizací FSAE

Deformační člen – konstrukční požadavky

Na přední přepážce musí být sestava deformačního členu. Skládá se ze samotného deformačního členu a plechu - přepážky, zabraňujícímu mechanickému vniknutí do prostoru rámu.

Deformační člen musí být:

- Nejméně 200 mm dlouhý (rozměr je orientován podél „předozadní“ osy rámu – osa zepředu dozadu).
- Nejméně 100 mm vysoký a 200 mm široký v místě minimálně 200 mm před přední přepážkou.
- Bezpečně připojen k plechu nebo přímo k přední části rámu.

Plech musí být:

- Z 1,5 mm tuhé oceli, 4 mm tuhého hliníkového plechu nebo schválené alternativy dle přílohy T3.38., která je součástí pravidel a která se týká konceptu deformačního členu spolu s alternativním rámem.
- Bezpečně připevněn k přední části rámu.

Dovolené metody uchycení sestavy deformačního členu jsou:

- Svařování, kde musí být svar buď spojitý, nebo přerušovaný. V případě přerušovaného svaru musí být dodržen minimální poměr svařované části vzhledem k nesvařované 1:1 a zároveň musí být každý svařovaný úsek dlouhý alespoň 25 mm ($\approx 1''$).
- Šroubové spojení. Přičemž je předepsáno minimálně osm šroubů s metrickým závitem o průměru 8 mm a pojištěním proti povolení. Vzdálenost mezi jednotlivými šrouby musí být minimálně 50 mm ($\approx 2''$).

K připevnění deformačního členu k přepážce může být použito také lepidlo. V tomto případě musí být spojení ekvivalentní předchozím typům. Ekvivalence tohoto spojení šroubovému či svařovanému musí být doložena v příslušném dokumentu.

Upevnění musí být konstruováno tak, aby obstálo při zatížení jak v příčném směru, tak i ve směru vertikálním pro případ mimoosového nárazu. V případě segmentových deformačních členů musí být všechny segmenty spojeny k sobě, aby bylo zamezeno vzájemnému posuvu či „paralelogramingu“.

Požadavky pro vnější profil přepážky závisí na typu upevnění k přední části rámu:

- Pro případ svařovaného spoje musí vnější profil přepážky přesahovat na všech stranách centrální osu trubek přední části rámu.

- Pro případ šroubového spojení musí vnější profil přepážky dosahovat vnějším rozměrům přední části rámu.

Týmy nemusí využít doporučené výztuhy přední části rámu, musí však fyzickým testem dokázat, že se přepážka neprohne o více než 25 mm ($\approx 1''$).

Několik dalších pravidel je věnováno deformačnímu členu připojovanému k alternativnímu rámu „monokoku“.

Deformační člen – požadovaná data

Report, který se odesílá ke kontrole organizátorům, musí obsahovat:

- Data z testu, ve kterém 300 kilogramové závaží symbolizující vozidlo narazí do tuhé bariéry rychlostí 7 m/s. Zpomalení přitom nesmí průměrně přesáhnout 20g a ve špičce 40g. Celková absorbovaná energie při tomto testu musí být více než 7350 J (Toto jsou funkční požadavky, nikoliv testové. Kvizistická zkouška je dovolena).

Během jakéhokoliv testu musí být deformační člen připevněn k přepážce stejným způsobem, jako je tomu plánováno u vozidla.

Sestava deformačního členu musí být připevněna k přední části rámu, která přímo odpovídá plánované podobě rámu. Minimální prostor za přepážkou je 50 mm, z důvodu možnosti a kontroly průhybu.

Žádná část přepážky se nesmí trvale prohnout o více než 25 mm ($\approx 1''$) oproti původní poloze před testem.

Týmy, které použijí konstrukční „nosy“ přímo připojitelné k přední části rámu, musí splnit další test. Ten musí prokázat, že přepážka vydrží zatížení 120 kN (300 kg násobeno 40g), kde má zatěžující prvek minimální nutné rozměry deformačního členu.

Zkušební přípravek musí mít rovnocennou tuhost a pevnost jako výchozí přední část rámu.

Dynamický test musí být proveden na specializovaném pracovišti. Pracoviště může být součástí univerzity, ale test musí být proveden pod dohledem odborného pracovníka.

Průměrná hodnota zpomalení se vyhodnocuje z neodfiltrovaných dat.

Špičkové zpomalení se může vyhodnocovat z dat odfiltrovaných pomocí CFC 60, J211, nebo -3dB.

Statický test může být proveden týmy na univerzitních pracovištích.

Všechny nedeformovatelné objekty vně primární struktury musí buď:

- Být zahrnutý ve fyzickém testu.
- Montovány za myšlenou rovinou, která se nachází směrem vpředu od přední přepážky ve vzdálenosti rovnající se délce zdeformovaného deformačního členu.

V případě, že jsou nedeformovatelné součásti montovány před zmíněnou rovinou, musí být prokázáno, že kombinace deformačního členu a nedeformovaných součástí při deformaci

působí špičkové zpomalení pod zmiňovanou hodnotou 40g. Některé z následujících metod mohou prokázat, že konstrukce nepřevyší 120 kN.

- Fyzický test zahrnuje nedeformované součásti.
- Špička silového zatížení při fyzickém testu vyvolá porušení v upevnění nedeformovaných součástí stříhem nebo vzpěrem.

2.2 Obecně kladené požadavky

Vedle požadavků daných organizací FSAE je třeba specifikovat celou řadu dalších obecných požadavků:

Nízká hmotnost: Jedná se o jeden z nejdůležitějších parametrů ve všech odvětvích techniky. Speciálně u závodních vozidel se klade důraz na sebemenší úsporu hmotnosti na všech částech vozidla. Deformační člen není výjimkou a při výběru vhodného materiálu bude hmotnost hrát významnou roli.

Dostupnost a cena materiálu: Při volbě materiálu je třeba brát v úvahu dostupné prostředky, cenu materiálu a současně jeho dostupnost. Ne vždy firmy prodávají cenově dostupný materiál v požadovaném množství a v požadované dodací lhůtě.

Snadná výroba: Z výběru materiálu plynou možné způsob výroby, kterým se zhotoví deformační člen. Cílem je co možná nejlevnější a nejrychlejší výroba.

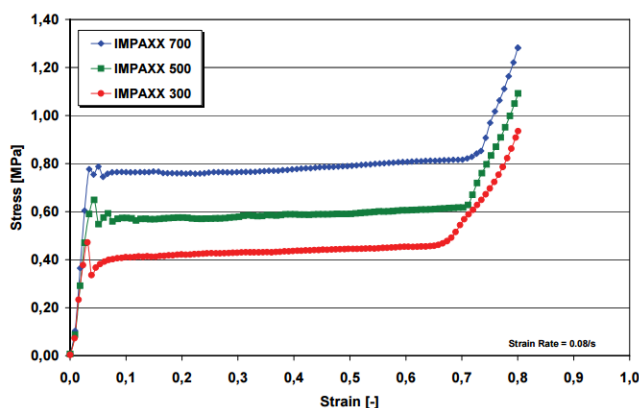
Vhodné navržení upevnění: Ze zkušeností z předchozího vozu, kdy docházelo k časté montáži a demontáži sestavy deformačního členu, klást důraz na způsob připevnění sestavy s ohledem na jednoduchou montáž.

Respektování tvaru rámu a vhodné navržení úchytů: Úchyty situovat do dobře dostupných míst rámu.

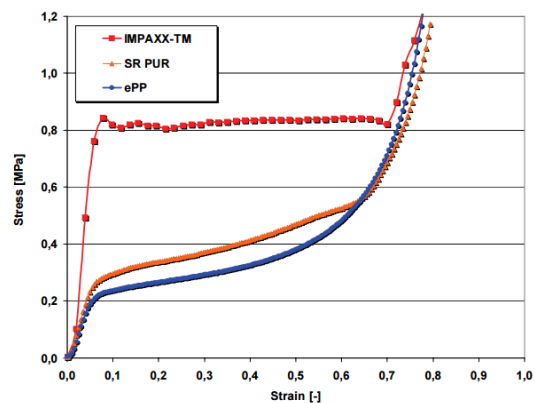
Dodržení rozměrů: Vedle požadovaných minimálních rozměrů zároveň nepřesáhnout rozměry kapoty a rámu.

2.3 FSAE standardní deformační člen

Každé vozidlo musí disponovat deformačním členem. V případě, že si tým nevyvine vlastní člen, může použít standardní. Ten tvoří polystyrenové termoplastické pěny, známé pod názvem Impaxx 700 foam. Číslovka za názvem značí hodnotu napětí na mezi kluzu materiálu. Konkrétně má Impaxx 700 hodnotu napětí na mezi kluzu 0,7 MPa. Díky relativně snadné výrobě, a tudíž úspoře času i peněz se tohoto materiálu často využívá v průmyslu nejen pro části mající úlohu absorbovat energii při nárazu, jako jsou helmy či autosedačky, ale také jako výztuhy a obalové materiál pro převoz či uskladnění různých výrobků. Oproti jiným pěnovým materiálům má pěna Impaxx „lepší“ mechanické vlastnosti. Vyšší mez kluzu umožňuje absorbování výrazně vyššího množství kinetické energie než je tomu například u polyuretanové či polypropylenové pěny. Na následujících grafech jsou zobrazeny napěťové charakteristiky několika druhů pěny Impaxx a porovnání s dalšími pěnovými materiály.

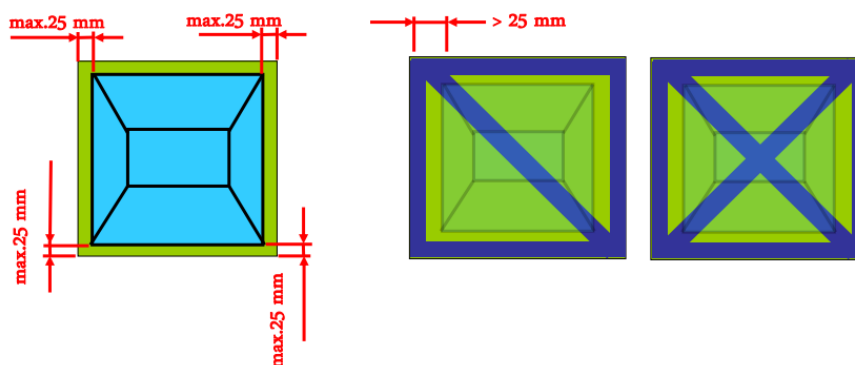


Graf 1 - Napěťové charakteristiky materiálu Impaxx foam



Graf 2 - Napěťové char. materiálu Impaxx, PUR a PP

Tento prvek je organizátory navržen tak, aby byly splněny všechny požadavky soutěže. V případě, že jsou zároveň splněna další kritéria v soustavě deformačního členu společně s rámem, není důvod provádět statický ani dynamický test. Vzdálenost okraje přepážky od kraje deformačního členu musí být maximálně 25 mm, v případě, že je vzdálenost vyšší, jelikož je přední část rámu příliš velká, je nutné, aby byla přední část rámu vyztužena diagonální výztuhou nebo výztuhou ve tvaru „X“, jak je vidět na následujícím obrázku. Existuje možnost, že se nepoužije výztuha, ani v případě větší vzdálenosti zmíněných částí než je 25 mm. Tým však následně musí provést dynamickou zkoušku a doložit, že se přední přepážka neprohne o více než 25 mm.

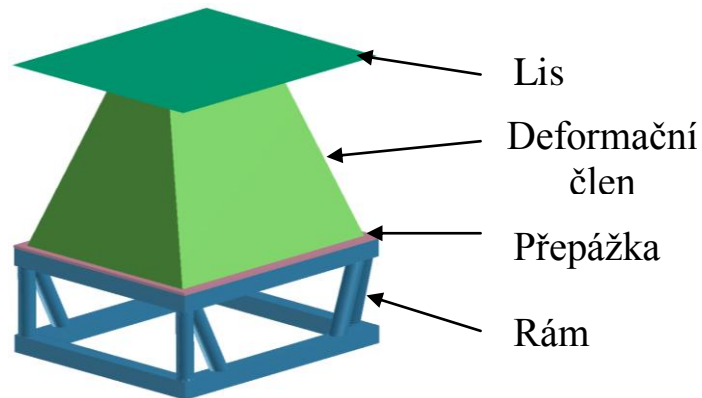


Obrázek 4 - Podmínka použití výztuhy

Použití standardního deformačního členu se může zdát být výhodou z hlediska úspory času, tím však nezíská body za jeho vlastní vývoj.

Model sestavy pro dynamickou zkoušku

Pro představu funkčnosti standardního členu se vytvoří simulace dynamické zkoušky. Přípravek, který musí být součástí dynamického testu, představuje posledních 100 mm rámu formule UWB03. Přepážka mezi rámem a pěnovou částí je vyrobena ze slitiny hliníku o nutné tloušťce 4 mm. Standardní deformační člen má dané rozměry a ve výpočtu jsou zanedbány díry pro šrouby, kterými je člen s přepážkou připevněn k rámu.

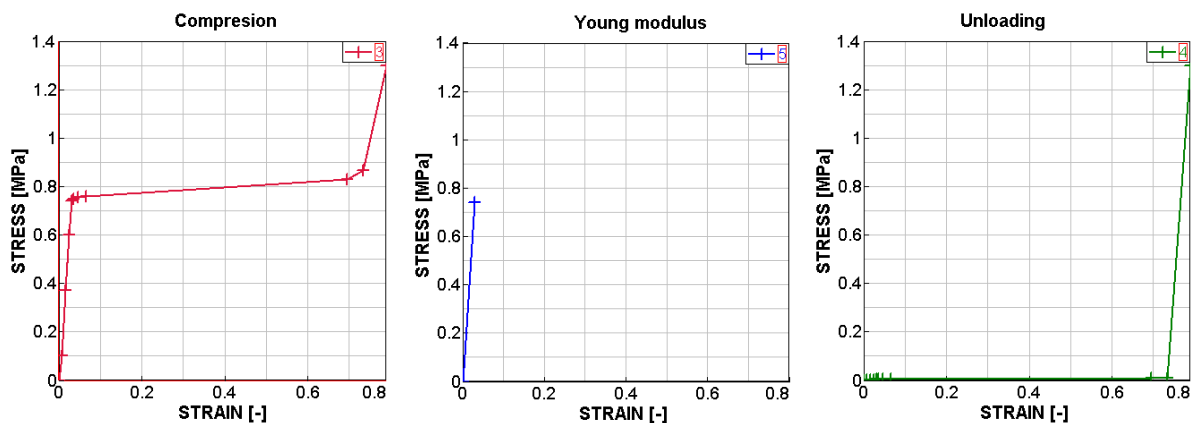


Obrázek 5 - 3D model pro simulaci dynamické zkoušky

Numerická simulace dynamické zkoušky

Pro upřesnění představy funkčnosti standardního deformačního členu byla provedena simulace dynamického testu deformačního členu, která je popsána v podkapitole 2.1 Specifikace požadavků. Uskutečnění výpočtu vyžaduje detailní popsání materiálu jednotlivých součástí. Ve výpočtu se uvažují následující materiálové vlastnosti jednotlivých částí:

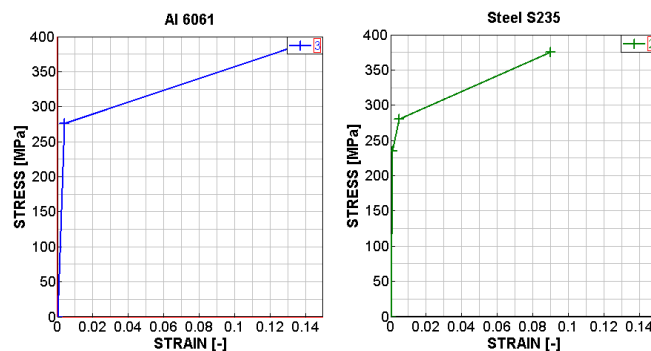
Pěna:



Graf 3 - Materiálové vlastnosti - pěna

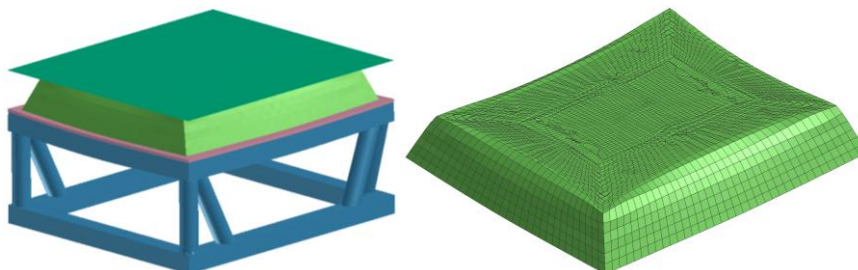
Přepážka:

Rám:

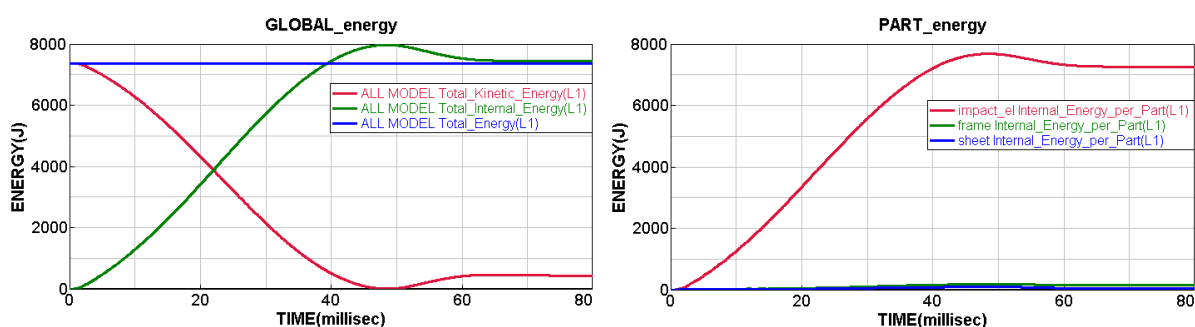


Graf 4 - Materiálové vlastnosti - přepážka, rám

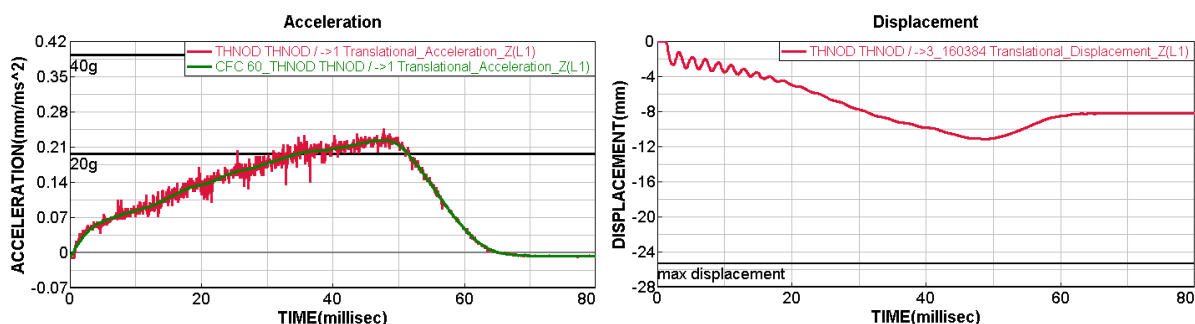
Stav sestavy při maximální deformaci je zachycen na následujícím obrázku. Další grafy zachycují průběh sledovaných veličin v závislosti na čase, ze kterých lze vyhodnotit, zda splňuje deformační prvek všechny požadavky dané pravidly.



Obrázek 6 - Deformovaný stav sestavy



Graf 5 - Průběh energií součástí sestavy



Graf 6 - Průběh zrychlení desky lisu a průhybu výztuhy rámu

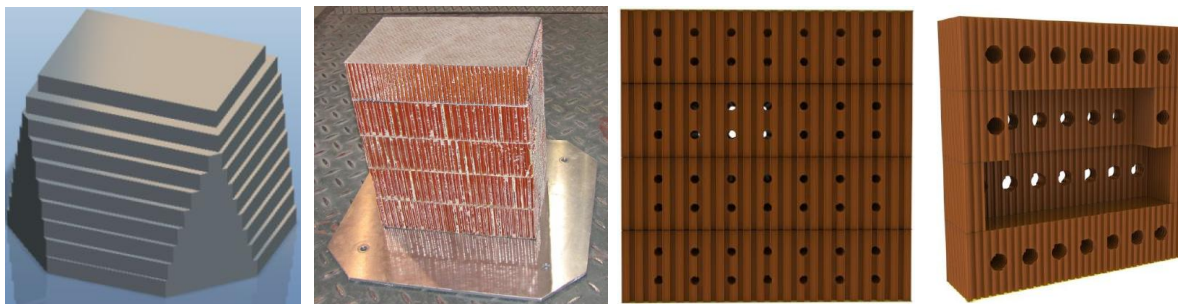
Dle výsledků numerické simulace lze potvrdit, že standardní deformační člen splňuje veškeré požadavky dané pravidly. Pěna použitá jako absorpční prvek sestavy vstřebává podstatnou část kinetické energie a do přepážky a rámu přejde už jen zlomek. Zpomalení nepřesahuje maximální dovolené hodnoty ani ve špičce a ani v průměru. Celkový průhyb výztuhy dosahuje po odlehčení hodnoty přibližně 8 mm. Ve všech požadavcích má tento deformační člen značné rezervy.

2.4 Konkurenční týmy

TU Brno racing

Brněnský tým doposud představil 6 závodních vozů s názvem Dragon 1-6. Za šest let prošel vůz celou řadou změn a úprav. Svým vývojem si prošel také jejich deformační člen. V prvním vozidle tvořila tento bezpečnostní prvek hliníková pěna. V druhém vozidle se využilo

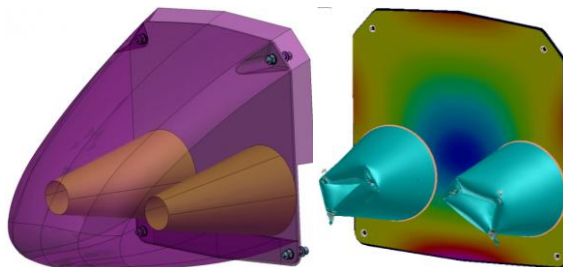
kompozitního materiálu - voštiny z aramidových vláken typu C1-4, 8-48. Na třetím vozidle se provedlo odlehčení aramidové voštiny a zároveň byl kvůli nutnosti dynamické zkoušky v Německu použit standardní deformační člen FSAE, který je popsán v podkapitole 2.3. Na následujících vozidlech 4-6 upřednostnil tým z Brna opět aramidovou voštinu, a sice typu C1-3, 2-80 skládající se z jádra a potahového materiálu. Předmětem vývoje deformačního členu během posledních let byla především snaha o snížení hmotnosti, při zachování dostatečné bezpečnosti.



Obrázek 7 - Deformační členy TU Brno racing

CTU Cartech

Pražský tým na svém vozidle použil deformační člen v podobě dvou kuželů z uhlíkových vláken. Kužely jsou umístěny pod pevnou špičkou z uhlíkových vláken, která je spojena s přením křídlem. Jelikož je špička s předním křídlem nedeformovatelná, musí být součástí dynamického testu.



Obrázek 8 - Deformační člen – CTU CarTech

2.5 UWB

Postupný vývoj deformačního členu týmu Západočeské univerzity v letech 2011 až 2013 je vidět na následujících obrázcích. Nejdříve byl na voze použit deformační člen z ocelového plechu. V rozích členu se střídají užší a tlustší místa, což umožňuje postupnou řízenou deformaci. Deformační člen však dosahuje velmi vysoké hmotnosti. Další použitou variantou byl standardní deformační člen, který nemusí být testován a hmotnost je nižší než u ocelové varianty. Další vývoj vedl k použití segmentů z hliníkové voštiny, přilepené vždy k dvojici plechů. Tato varianta byla předchůdcem té poslední. Poslední variantou použitou na voze UWB04 v roce 2016 je hliníková voština z jednoho kusu.



Obrázek 9 - Vývoj deformačních členů UWB Racing Team Pilsen

2.6 Koncepty deformačního členu

Deformační člen lze pojmut dvěma následujícími způsoby. Na každý koncept se zároveň vztahují odlišná specifická pravidla. Varianta integrovaného deformačního členu spočívá v tom, že zároveň plní funkci nosného prvku či prvku aerodynamického resp. designového. Ve formuli se často jedná o „strukturální nos“, ke kterému je připevněn zároveň prvek „aeropaketu“.



Obrázek 10 - Integrovaný deformační člen - strukturální nos

Druhou variantou je samostatný deformační člen. Ten je spolu s přepážkou připevněn k rámu a přes člen se nasadí kapota, která ho zakrývá. Tento koncept byl použit na veškerých předchozích vozidlech týmu UWB Racing Team Pilsen. Samostatný deformační člen neslouží jako nosný prvek a nelze k němu cokoli jakkoli připevnit. Jeho funkcí je pouze absorpce energie v případě čelního nárazu.

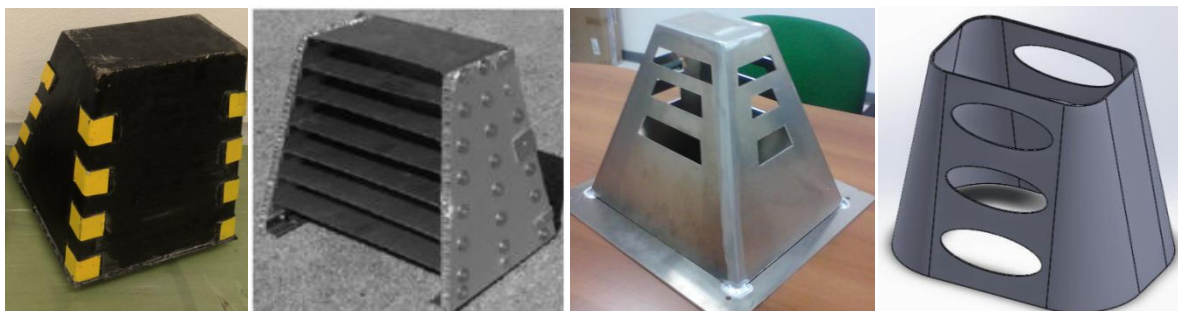
2.7 Materiály

Výběr deformačního členu velkou měrou závisí na použitém materiálu. Každý materiál má specifické mechanické a fyzikální vlastnosti, jež v zásadě určují funkčnost deformačního členu. Mechanické vlastnosti udávají množství energie, které je daný prvek schopen pohltit a vlastnosti fyzikální určují, kolik je potřeba materiálu a jaká bude jeho hmotnost. Cílem vhodného výběru materiálu je bezesporu kombinace schopnosti pojmouti velkého množství energie a současně nízká hustota resp. hmotnost.

Různé týmy používají různé materiály od plechů, přes pěny až po kompozitní materiály. Pro výběr optimálního materiálu si některé z materiálů včetně vlastností nastíníme. Optimální materiál bude následně použit pro deformační člen na vozu UWB04.

2.7.1 Plechy

Plechové deformační členy vstřebávají energii plastickou deformací. Tým používající tento typ vynalézají různé plechové struktury, které se řízeným způsobem postupně deformují. Celková plastická deformace plechu odpovídá vstřebané energii a lze tak určit velikost a množství plechů případně zvýšit množství absorbované energie „přidáním další plastické deformace“ v podobě přidání plechu, případně změny jeho rozměrů. Na následujících obrázcích jsou ukázky některých používaných plechových deformačních členů.



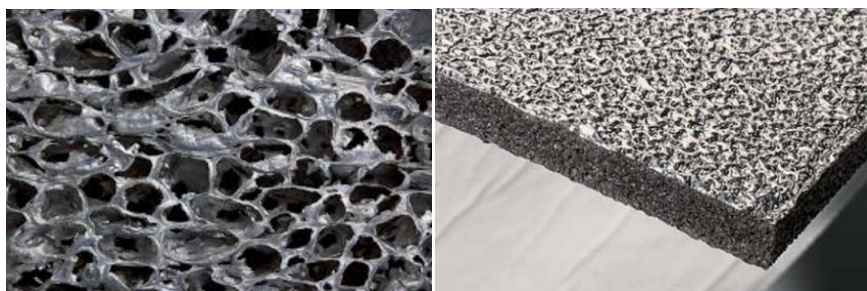
Obrázek 11 - Deformační členy z plechů

Rozhodně by bylo zajímavé vytvářet sofistikovanou strukturu, jež by vstřebala potřebnou energii a ochránila tak posádku. Bohužel však všechny výše zobrazené příklady dosahují příliš vysoké hmotnosti. Měrná hmotnost oceli je 7850 kg/m^3 a slitiny hliníku je přibližně 2700 kg/m^3 .

2.7.2 Pěny

Existuje více druhů pěn, které by mohly být použity pro deformační člen. Patří mezi ně například tvrzené pěny. Tyto pěny mají v porovnání s dalšími materiály velmi nízkou měrnou hmotnost. Současně však mají výrazně nižší tuhost, a proto je nutné použít větších rozměrů, čímž se celková hmotnost vyrovnává a zvyšuje se zástavbový prostor. Hustota se pohybuje okolo 100 kg/m^3 . Pevnost v tlaku se pohybuje kolem $1,5 \text{ MPa}$. Například zmíněná pěna IMPAXX 700 má pevnost v tlaku okolo $0,8 \text{ MPa}$ a měrnou hmotnost 45 kg/m^3 .

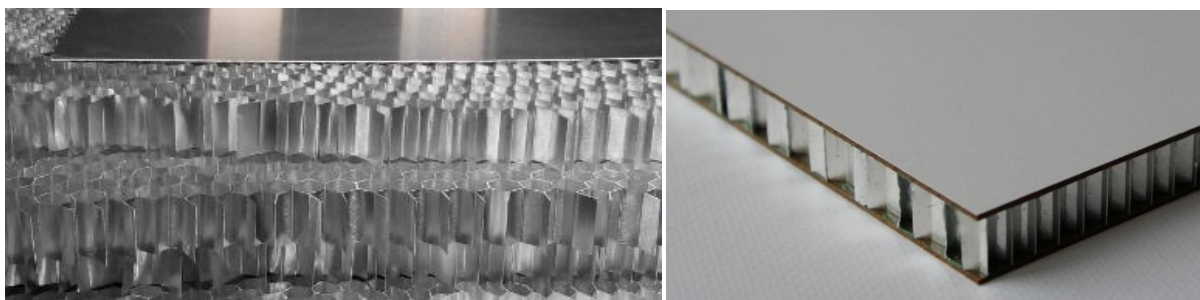
Dalším druhem používaných pěn jsou pěny kovové. Jedná se o kovové materiály, které ve své struktuře obsahují velké množství pórů a dutin. Ty způsobují snížení hmotnosti při malé změně mechanických vlastností daného kovu. Vzhledem k hmotnosti se pro deformační člen používá pěna hliníková. Měrná hmotnost hliníkové pěny je přibližně 250 kg/m^3 .



Obrázek 12 - Hliníková pěna

2.7.3 Hliníková voština

Hliníkové voštiny jsou tvořeny hliníkovou fólií o různé tloušťce. Fólie je skládaná do šestiúhelníkového hexagonu. Voština může být sendvičová nebo jednodílná. Sendvičová varianta se skládá z jednotlivých segmentů, které tvoří jádro, a krajních částí, které může tvořit například plech. Krajiní části segmentů v praxi běžně slouží jako ochrana vnitřní struktury proti mechanickému poškození z vnějšího prostředí a drží voštinu v požadovaném tvaru. Hliníková voština tvořená fólií $0,002'' \approx 0,05\text{mm}$ a charakteristickým rozměrem šestiúhelníku $0,1875'' \approx 4,763\text{mm}$ má specifickou hmotnost $91,3 \text{ kg/m}^3$ a tuhost přibližně $2,3\text{MPa}$.



Obrázek 13 - Hliníková voština

2.7.4 Kompozitní materiály

Kompozitní materiály se začínají stále častěji používat v různých aplikacích, kde je kladen značný důraz na hmotnost. Vynikají totiž svou velmi nízkou měrnou hmotností a zároveň vysokou pevností v tahu.

Pro deformační členy se používají aramidové voštiny s podobnou strukturou jako voštiny hliníkové, ale jsou tvořeny materiálem kompozitním zvaným NOMEX®. Tyto voštiny mají měrnou hmotnost okolo 80 kg/m^3 a pevnost přibližně $3,5\text{MPa}$.



Obrázek 14 - Aramidová voština

Další variantou mohou být karbonová nebo skelná vlákna prosycená vhodným pojivem. V tomto případě je hmotnost opět velmi nízká.

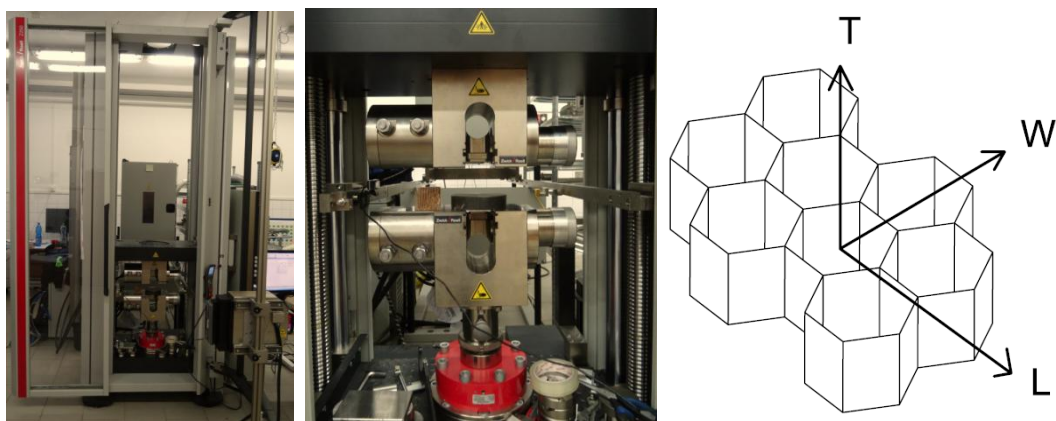
3. Návrh deformačního členu

3.1 Výběr materiálu pro deformační člen

Z možných materiálů použitelných na výrobu deformačního členu spolu s dostupnými prostředky a možnostmi byly s ohledem na nízkou hmotnost vybrány aramidová voština Cormaster typu C1-3, 2-80 a hliníková voština typu PAMG-XR1-5.7-3/16-P-5052.

3.2 Zkoušky vzorků

Mechanické vlastnosti použitých materiálu jsou vstupem do simulace dynamické zkoušky deformačního členu. Z tohoto důvodu musí být provedeny statické zkoušky vzorků daných materiálů. Cílem je získat kompresní a smykové vlastnosti daného materiálu. Zkouška se provede v Mechanické zkušebně RTI na trhacím stroji Zwick/Roell Z250.



Obrázek 15 - Zwick/Roell Z250, Struktura voštiny








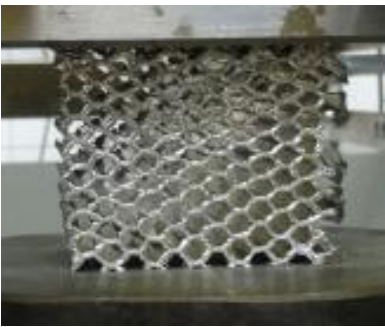
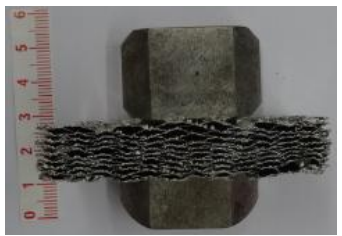
Vzorky z voštinového materiálu mají strukturu patrnou z obrázku č. 16. V každém směru mají díky struktuře odlišné vlastnosti, a proto je nezbytné provést zkoušky ve třech na sebe kolmých směrech.

3.2.1 Tlaková zkouška

Tlaková zkouška je provedena dle normy ASTM C-365. Polotovarem pro výrobu vzorků je voština vyrobená z hliníkové fólie ve tvaru kvádru a současně deska o tloušťce 50 mm z aramidových vláken spojených a potažených fenolovou pryskyřicí. Vzorky jsou nařezány ve tvaru krychle a mají délku hrany 50 mm.

Struktura voštiny způsobuje, že má voštinový materiál odlišné vlastnosti v různých směrech. Proto je zkouška provedena ve všech třech směrech T (transverse), L (longitudinal) a W (width). Z důvodu cenových možností a z nich vyplývajícího omezeného množství materiálu jsou testovány vždy alespoň dva vorky. K objektivnímu posouzení vlastností by však bylo zapotřebí větší množství. Každý vzorek nese označení ve tvaru XY, kde X značí směr zatěžování a Y číselné označení vzorku dle pořadí.

Podmínky zkoušky jsou následující:Rychlost zatěžování $v = 1 \text{ inch/min} \approx 25,4 \text{ mm/min} = 0,42 \text{ mm/s}$ Předzatížení $F = 30 \text{ N}$ Teplota $T \approx 25 \text{ }^\circ\text{C}$ **Vzorky z hliníkové voštiny**

	Před deformací	Během deformace	Po deformaci
Směr T			
Směr L			
Směr W			

Tabulka 1 - Průběh tlakové zkoušky – materiál hliníkový

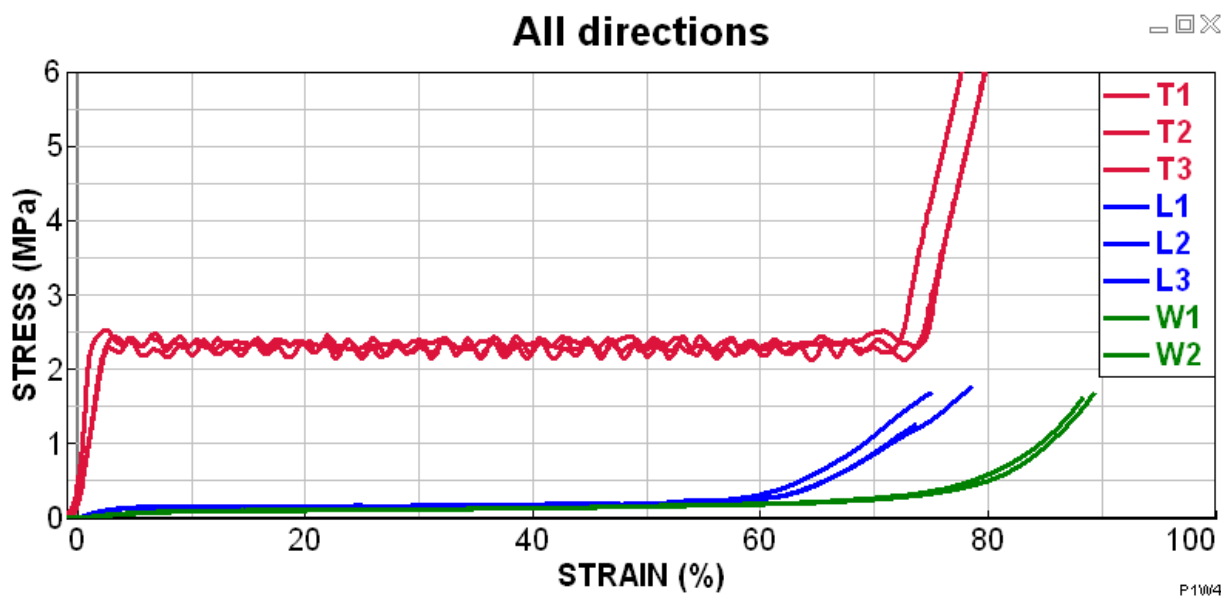
Vzorky se ve směru T deformují postupně od spodní části vzorku. Fólie se skládají ve směru kolmém na směr zatížení a šestihránná struktura voštiny zůstává zachována. Příčné rozměry 50 x 50 mm se po testu výrazně nezměnily a zdeformovaný vzorek po odlehčení na výšku měří přibližně 14 mm, což je přibližně 28 %. Ve směru L se deformuje šestihránná

struktura voštiny. Stejně jako ve směru L se i ve směru W deformuje vzorek ve smyslu porušování šestihranné struktury. Fólie se složí na sebe do několika vrstev a materiál klade výrazně nižší odpor.

Porovnání výsledků ve všech směrech





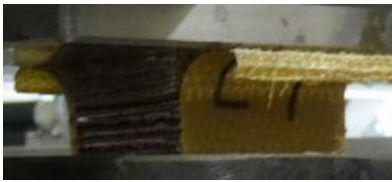
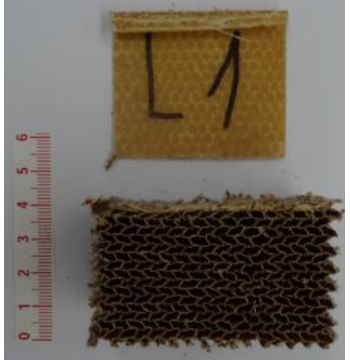



Následující graf nám zobrazuje výsledný průběh napětí v závislosti na deformaci hliníkových vzorků. Můžeme vidět porovnání průběhu napětí v různých směrech. Na první pohled je patrné, že ve směru T má voština výrazně vyšší mez kluzu než v dalších dvou směrech, přibližně okolo 2,3 MPa. Spolu s rostoucí deformací se napětí výrazně nezvyšuje. Voština se deformuje při přibližně stálém napětí až do úplného zmačkání. Po dobu své deformace absorbuje energii a přibližně při 72% vyčerpá voština svou plastickou deformaci. Následuje výrazné zvyšování napětí a materiál se začíná chovat jako plný hliníkový materiál, ze kterého se vyrobila folie tvořící voštinu.

V dalších směrech L a W dosahuje materiál výrazně nižší pevnosti a současně meze kluzu. Deformace při přibližně konstantním napětí opět probíhá do určité hodnoty a následně se také výrazně zvyšuje napětí při závěrečném smáčknutí vzorku.



Graf 7 - Průběh napětí vzorků v různých směrech - materiál hliníkový

Vzorky z aramidové voštiny

	Před deformací	Během deformace	Po deformaci
Směr T			
Směr L			
Směr W			

Tabulka 2 - Tabulka 1 - Průběh tlakové zkoušky – materiál aramidový

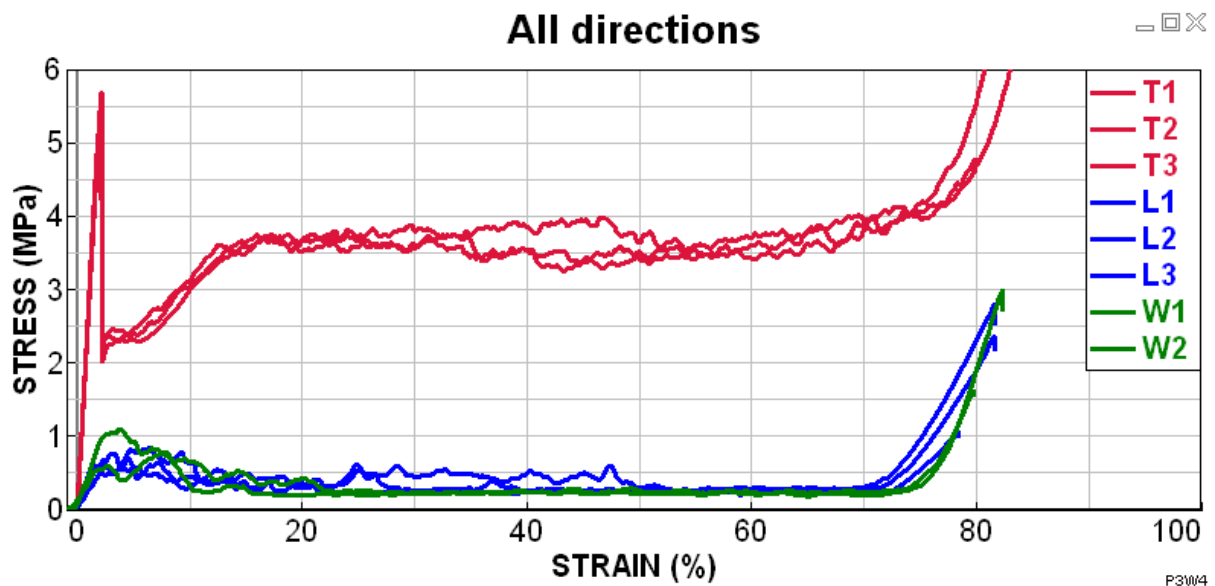
Vzorky se ve směru T deformují postupně obdobně jako u předchozího materiálu. Neplatí však deformace od spodní části vzorku. Při zatížení praská fenolová pryskyřice a materiál se skládá opět ve směru kolmém na směr zatížení a šestihránná struktura voštiny zůstává zachována. Příčné rozměry se po testu výrazně nezměnily a zdeformovaný vzorek po odlehčení na výšku měří přibližně 20 mm, což je přibližně 40 %. Ve směru L se odloupla potahová část a opět se deformuje šestihránná struktura voštiny. Po odlehčení vzorek výrazně zvýší rozměr ve směru deformace oproti fázi plné komprese. Při následném smáčknutí v ruce vzorek nevykazuje žádnou snahu odporu a působí velmi elasticky. Důvodem je porušená

struktura a degradované spojení fenolovou pryskyřicí. Ve směru W je charakter deformace obdobný s deformací ve směru L.

Porovnání výsledků ve všech směrech

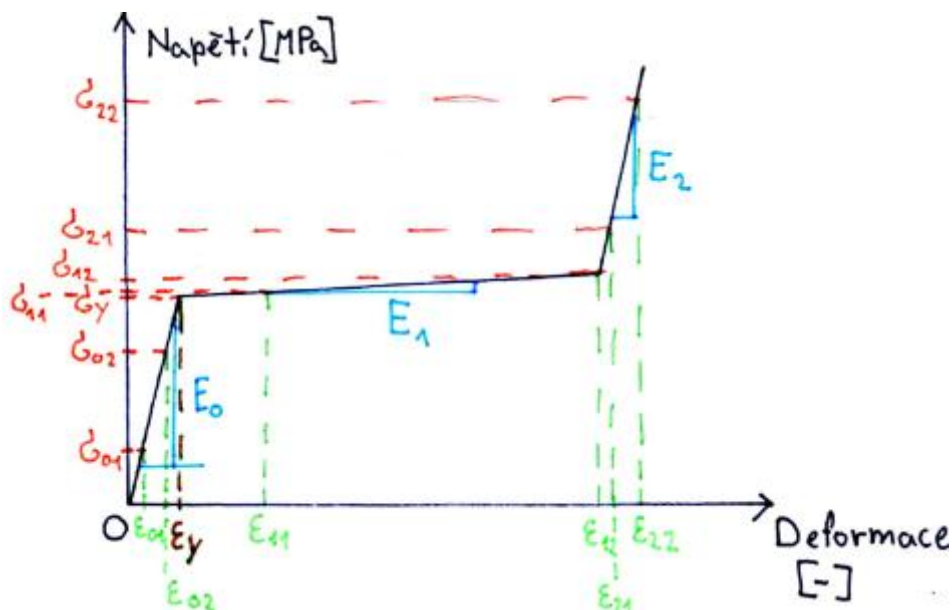
Na následujícím grafu jsou zobrazeny závislosti napětí na deformaci aramidových vzorků v jednotlivých směrech. Zatěžování ve směru T se oproti předchozímu materiálu liší v několika věcech. Na první pohled je patrná výrazná špička napětí. S narůstající deformací se napětí snižuje pod hodnotu napětí, při které se materiál plasticky deformuje a na kterou následně pomalu vzroste. Pokud zjednodušíme výsledný průběh, dosahuje hodnota napětí na mezi kluzu 3,6 MPa a následně probíhá plastická deformace, při níž se napětí výrazně nemění. Hodnota napětí, kdy se materiál plasticky deformuje, je přibližně o 1,3 MPa vyšší než u předchozího materiálu. Kolem 75% deformace začne napětí i u tohoto materiálu výrazně vzrůstat.

V dalších směrech L a W dosahuje materiál výrazně nižší pevnosti, meze kluzu i napětí, při kterém se materiál plasticky deformuje. Fáze nárůstu napětí při vyčerpání plastické deformace dochází ve všech směrech při podobné hodnotě deformace.



Graf 8 - Průběh napětí vzorků v různých směrech - materiál aramidový

Vypočet potřebných hodnot



Obrázek 16 - Obecný průběh napětí - označení veličin

Obecný výpočet E (Modul pružnosti):

$$E_0 = \frac{\sigma_{02} - \sigma_{01}}{\epsilon_{02} - \epsilon_{01}} \text{ [GPa]} ; \quad E_1 = \frac{\sigma_{12} - \sigma_{11}}{\epsilon_{12} - \epsilon_{11}} \text{ [GPa]} ; \quad E_2 = \frac{\sigma_{22} - \sigma_{21}}{\epsilon_{22} - \epsilon_{21}} \text{ [GPa]}$$

Ukázka výpočtu modulů pružnosti $E_{0,1,2}$ ve směru T hliníkového materiálu:

$$E_0 = \frac{0,00185 - 0,00158}{0,0185 - 0,0157} = 0,0948 \text{ [GPa]}$$

$$E_1 = \frac{0,00251 - 0,00242}{0,7072 - 0,0309} = 0,000134 \text{ [GPa]}$$

$$E_2 = \frac{0,00708 - 0,00311}{0,8114 - 0,7546} = 0,0698 \text{ [GPa]}$$

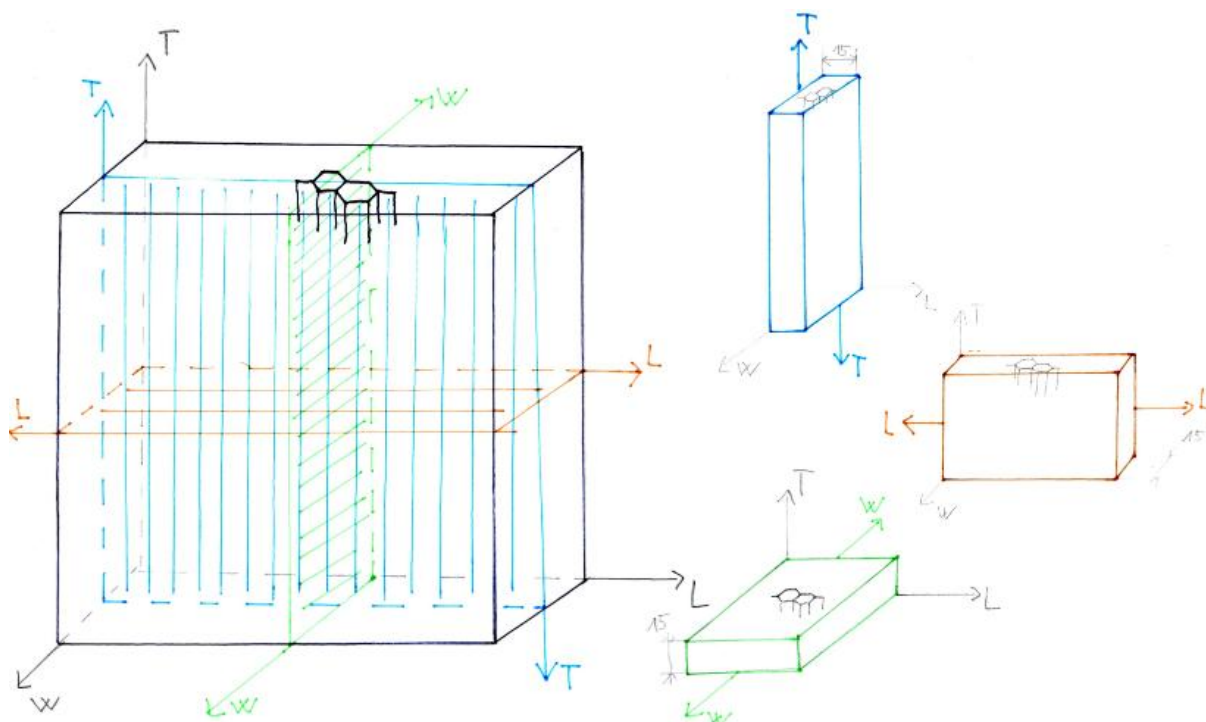
	σ_0 [Mpa]	ϵ_0 [-]	E_0 [Gpa]	ϵ_y [-]	σ_y [Gpa]	σ_1 [Gpa]	ϵ_1 [-]	E_1 [Gpa]	σ_2 [Gpa]	ϵ_2 [-]	E_2 [Gpa]
T1	0,00185	0,0185				0,00242	0,0309		0,00311	0,7546	
	0,00158	0,0157	0,0948	0,0309	0,00242	0,00251	0,7072	0,000134	0,00708	0,8114	0,0698
T2	0,00194	0,0084				0,00243	0,0167		0,00368	0,7405	
	0,00159	0,0068	0,2160	0,0167	0,00243	0,00246	0,7237	0,000041	0,00906	0,8144	0,0728
T3	0,00194	0,0187				0,00231	0,0267		0,00373	0,7614	
	0,00151	0,0143	0,0982	0,0267	0,00231	0,00239	0,7045	0,000116	0,00801	0,8233	0,0691

Tabulka 3 - Vypočtené hodnoty - směr T - materiál hliníkový

Obdobným způsobem se vypočítají potřebné moduly pružnosti daných materiálů v dalších směrech a z grafu jsou odečteny hodnoty napětí a deformace na mezi kluzu.

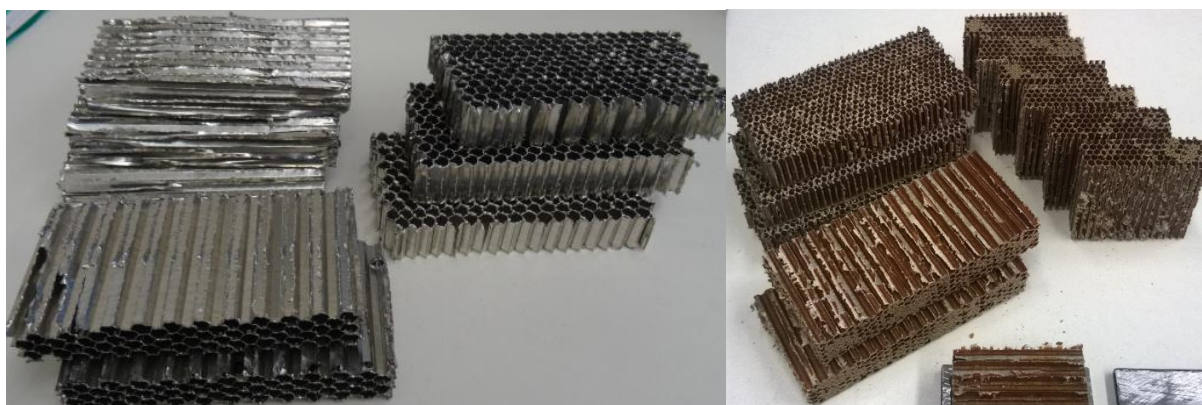
3.2.2 Zkouška smykem

Smyková zkouška je inspirována normou ASTM C-273 viz příloha č. 1. Cílem zkoušky je zjištění smykových vlastností ve třech na sebe kolmých rovinách zatěžovaných ve třech daných směrech. Na následujícím obrázku jsou patrné roviny zatěžování a příslušný směr, ve kterém je daná rovina zatížena.



Obrázek 17 - Struktura materiálu vzorků pro všechny směry smykové zkoušky

Polotovary pro výrobu vzorků jsou totožné s polotovary pro zkoušku tlakem. Vzorky mají tvar kvádrů o rozměrech 100 x 50 x 15 mm, přičemž 100 mm je vždy rozměr ve směru zatěžování a 15 mm je tloušťka vzorku.

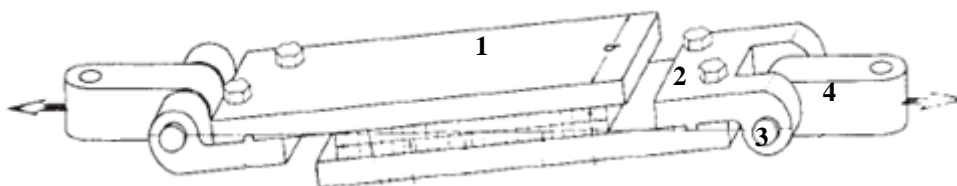


Obrázek 18 - Vzorky pro smykovou zkoušku

Stejně jako u zkoušky tlakem se i v tomto případě „trhaly“ minimálně dva vzorky v každém směru. Každý vzorek opět charakterizuje specifické označení ve tvaru XY.

Podmínky zkoušky jsou následující:Rychlost zatěžování $v = 0,5 \text{ mm/min}$ Předzatížení $F = 30 \text{ N}$ Teplota $T \approx 25 \text{ °C}$ **Model přípravku pro zkoušku smykem**

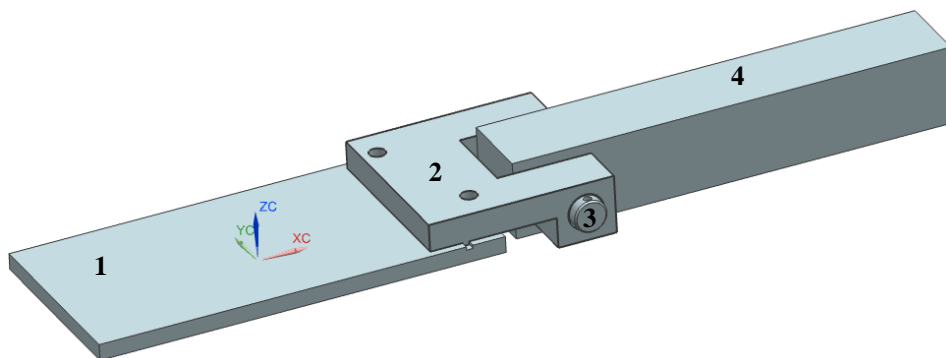
Smyková zkouška zahrnuje pomocný přípravek. Ten je navržen podle vzoru zmíněné normy a skládá se z destičky (1), úchyty (2), čepu (3) a upínací části (4).



Obrázek 19 - Přípravek dle normy ASTM C-273

Na zkoušku každého vzorku jsou zapotřebí dva přípravky. Vzorek se pomocí lepidla přilepí mezi destičky přípravků, destičky jsou pevně spojeny spolu s úchytem. Úchytem a upínací částí je prostrčen čep, který umožňuje vzájemný pohyb – rotaci kolem osy čepu. Za upínací část je přípravek připevněn do čelistí trhacího stroje.

Po konzultaci s odborníky v mechanické zkušebně a s ohledem na obtížnost výroby se přípravek upravil do podoby, jíž můžete vidět na následujícím obrázku.

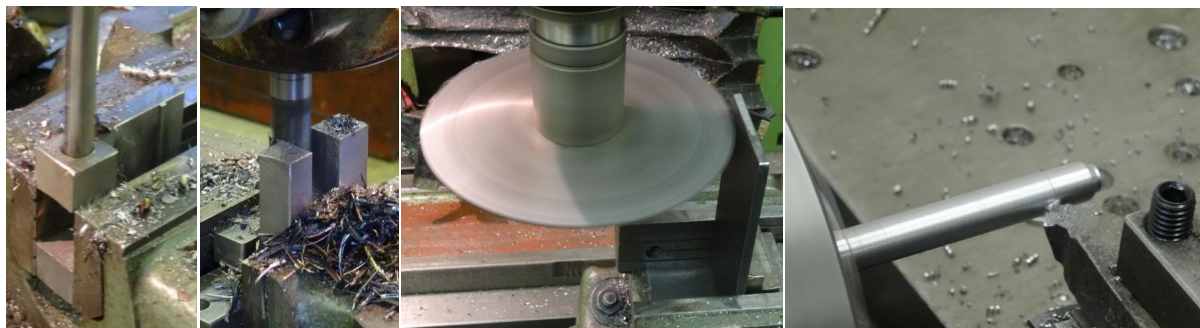


Obrázek 20 - Model přípravku pro smykovou zkoušku

Destička je spolu s úchytem spojena pomocí šroubového spojení, které vyvozuje dostatečnou třecí sílu pro přenos zatížení. Do destičky je vyfrézována drážka, která spolu s perem ve spojení s úchytem slouží jako středící a pojistná část. Zjednodušený tvar úchyty usnadňuje výrobu. Rádus na úchyty nemá principiální smysl, a proto se zanedbá. Na krajích čepu se nachází díry. Vložený drát do děr zamezuje vyklouznutí čepu ze spojení. Upínací část má tvar kvádrů. Jeho délka musí být dostatečná pro spolehlivé upnutí do čelistí trhacího stroje.

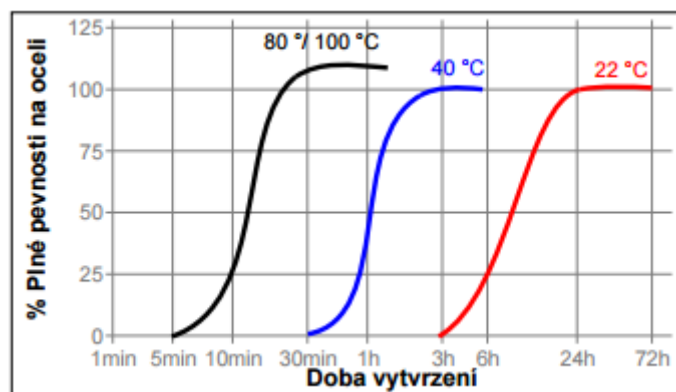
Výroba přípravku pro smykovou zkoušku

Na následujících obrázcích lze vidět průběh výroby jednotlivých součástí přípravku. Všechny komponenty byly vyrobeny na obráběcích strojích dílny KKS.



Obrázek 21 - Výroba přípravku pro smykovou zkoušku

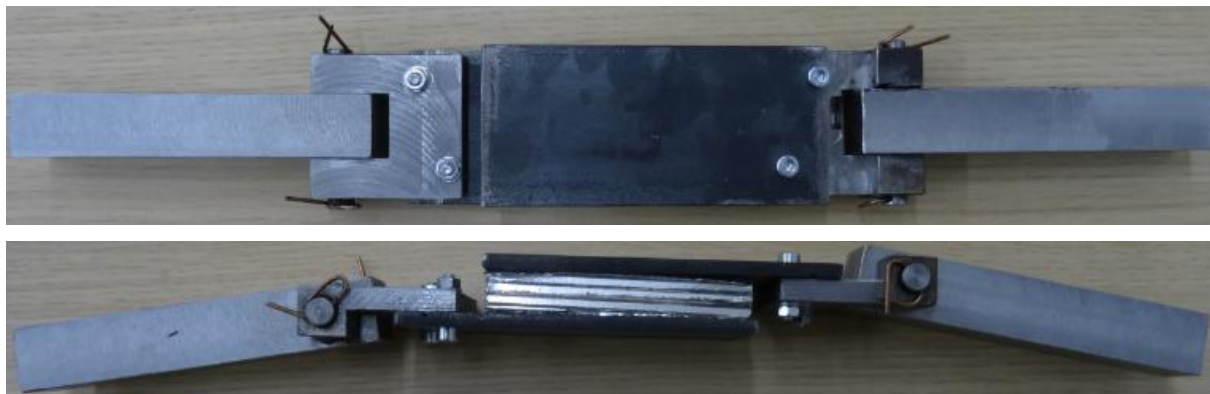
Destička po sešroubování musí umožnit nalepení vzorku o délce 100 mm. Samotná příprava testované sestavy je relativně zdlouhavá. Plocha destičky určená pro nalepení vzorku musí být zdrsňena a odmaštěna, aby nedošlo k odloupení lepidla s voštinou od destičky. Následně se vzorek přilepí. Doba tvrdnutí lepidla závisí na okolní teplotě. Následující obrázek zachycuje závislost dobu vytvrzení lepidla v závislosti na teplotě.



Graf 9 - Doba vytvrzení lepidla v závislosti na teplotě okolí

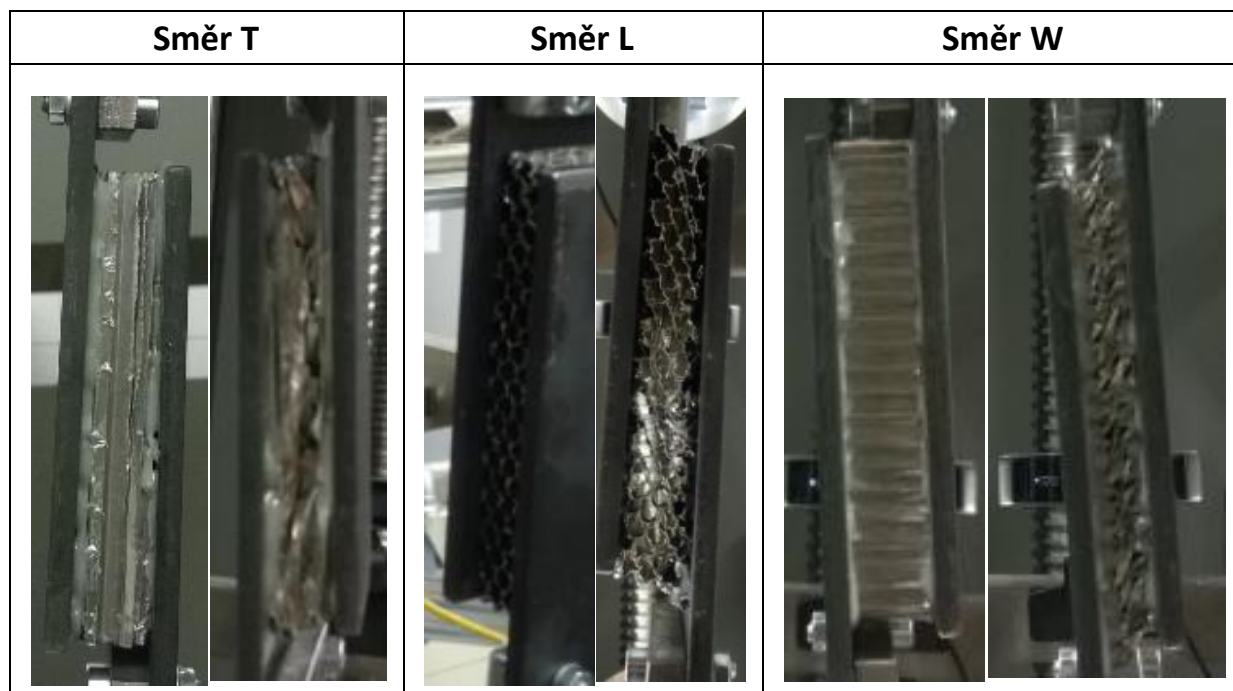
První sada vzorků byla, při teplotě přibližně 22 °C, vytvrzována více než 24 hod. Kvůli úspoře času se u dalších sad využila k vytvrzení vzorků pec v mechanické zkušebně. Pec se vyhřála na 100 °C a sestava byla dle obrázku po 30 minutách připravena ke zkoušce. Po zkoušce bylo nezbytné přilepené vzorky spolu s lepidlem odstranit z destiček přípravku, aby se mohly nalepit další. Technický list použitého lepidla viz příloha č. 2.





Obrázek 22 - Příprava přípravku pro smykovou zkoušku

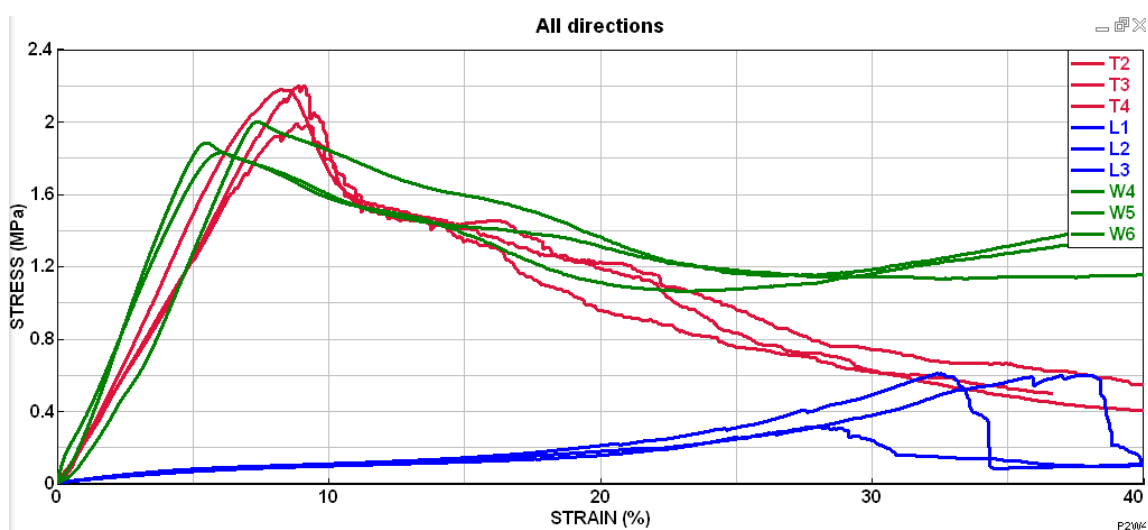
Vzorky z hliníkové voštiny



Tabulka 4 - Průběh smykové zkoušky - materiál hliníkový

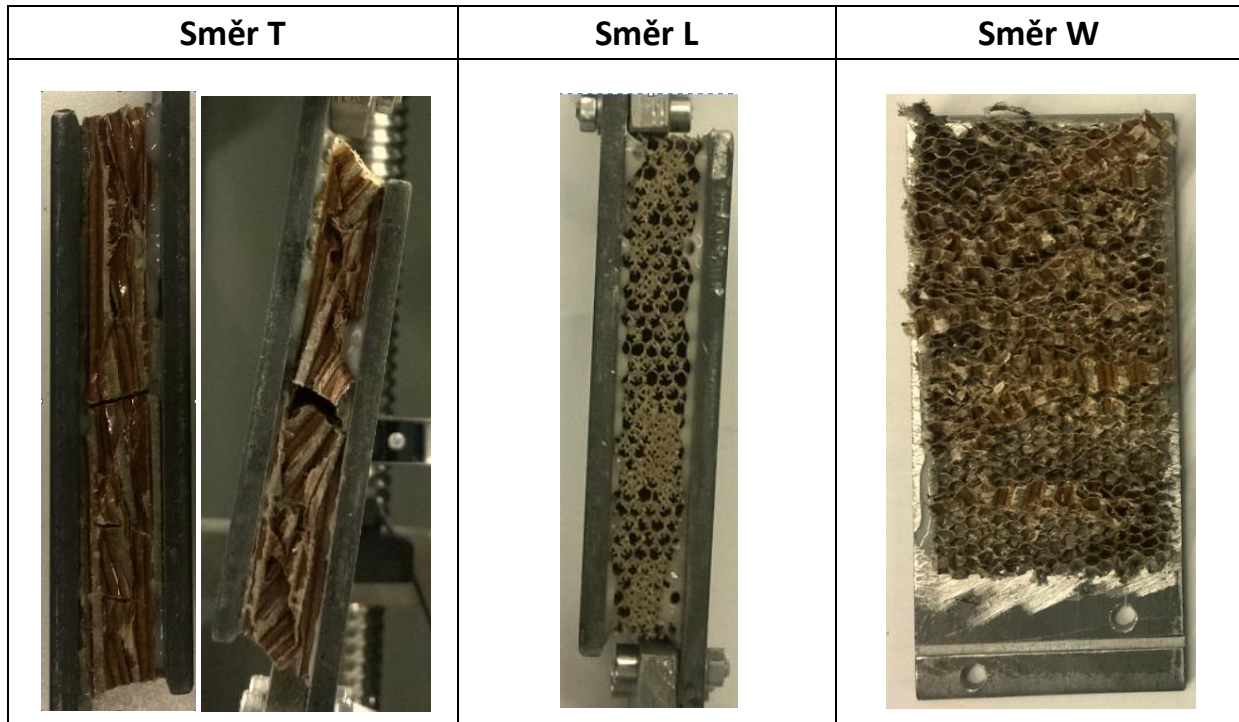
Porovnání výsledků ve všech směrech

Následující graf zobrazuje výsledný průběh napětí vzorků v jednotlivých směrech v závislosti na deformaci. Průběh se ve směrech T a W příliš neliší. V první fázi materiál vykazuje odpor a vzrůstá hodnota napětí spolu s rostoucí deformací. Po dosažení meze kluzu se materiál začíná výrazněji deformovat a hodnota napětí výrazně klesá vlivem porušení materiálu. Ve směru L se napětí na mezi kluzu nachází velmi nízkou a přechod do fáze plastického porušování je hladký. S narůstající deformací za mezi kluzu odpor materiálu stále narůstá až do doby, kdy dojde k narušení struktury a vzorek je přetržen. Nárůstu napětí odpovídá tažení struktury voštiny patrné z předchozího obrázku číslo 20 (směr L).



Graf 10 – Průběh smykových napětí jednotlivých vzorků - materiál aramidový

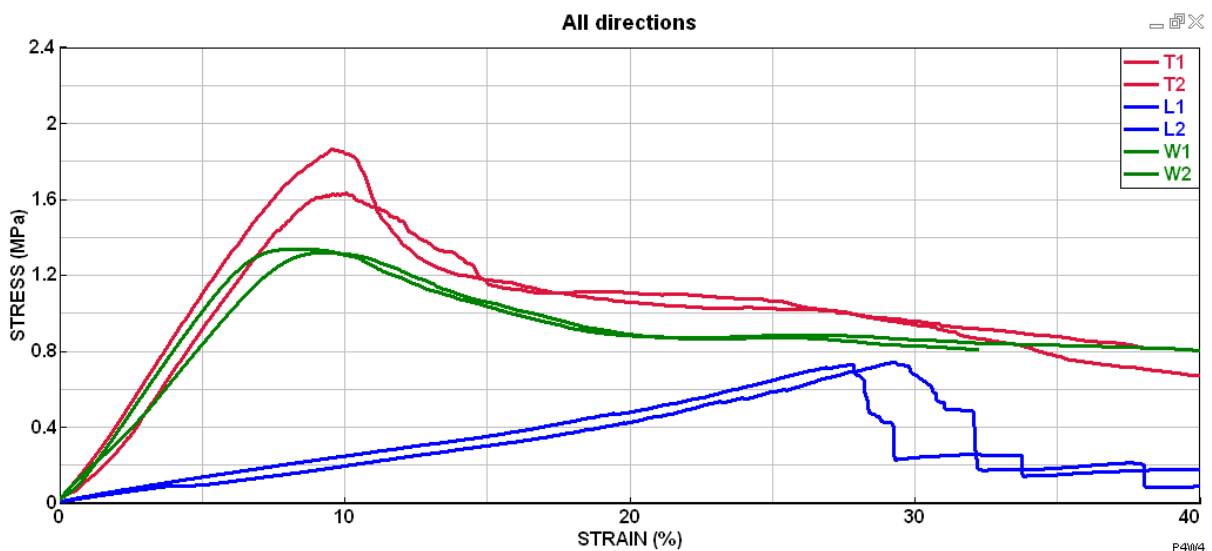
Vzorky z aramidové voštiny



Tabulka 5 - Průběh smykové zkoušky - materiál aramidový

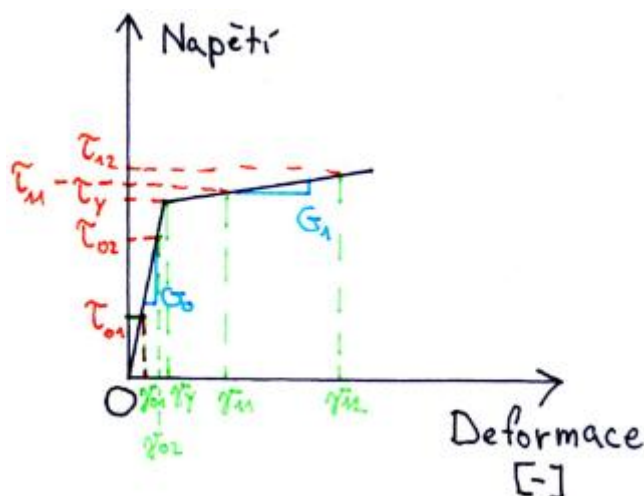
Porovnání výsledků ve všech směrech

Průběh smykového napětí v závislosti na deformaci aramidové voštiny zobrazuje následující graf. Základní tvar křivek ve všech směrech principiálně odpovídá tvaru křivek materiálu hliníkového. Rozdíl můžeme sledovat u hodnoty napětí na mezi kluzu, které jsou ve směrech T a W nižší.



Graf 11 - Průběh smykových napětí jednotlivých vzorků - materiál aramidový

Vypočet potřebných hodnot



Obrázek 23 - Obecný průběh smykového napětí - označení veličin

Obecný výpočet G :

$$G_0 = \frac{\tau_{02} - \tau_{01}}{\gamma_{02} - \gamma_{01}} \text{ [GPa]}$$

Ukázka výpočtu modulů pružnosti G_0 ve směru T hliníkového materiálu:

$$G_0 = \frac{0,00185 - 0,00158}{0,0185 - 0,0157} = 0,0948 \text{ [GPa]}$$

	τ [Mpa]	ν [-]	G_0 [Gpa]	$\nu\nu$ [-]	$G1$ [Gpa]
T2	1,6801	0,056	0,0304	0,083	0,001
	1,3998	0,047			
T3	1,7666	0,068	0,0290	0,089	0,001
	1,5136	0,059			
T4	1,5643	0,062	0,0278	0,088	0,001
	1,3774	0,056			

Tabulka 6 - Vypočtené hodnoty - směr T - materiál hliníkový

Obdobným způsobem se vypočítají potřebné moduly pružnosti daných materiálů v dalších směrech a z grafu jsou odečteny hodnoty napětí a deformace na mezi kluzu. Materiálový model simulace neumožňuje zadání záporných modulů pružnosti ve smyku $G1$, a proto jsou zvoleny nízké hodnoty 0,001. Poklesu napětí způsobeného porušením materiálu je docíleno hodnotami napětí a deformací, kdy dochází k porušování a k jak intenzivnímu. Hodnoty se odladí pomocí simulací statických zkoušek.

3.2.3 Výsledné hodnoty

Z vypočtených hodnot minimálně dvou vzorků, jejichž výsledky se příliš nelišily, se u každé veličiny stanoví průměrná hodnota. Výčet všech potřebných veličin takto stanovených je zapsán do tabulky viz níže.

Hliník	σ_y [GPa]	ϵ_y [-]	E0 [GPa]	E1 [GPa]	E2 [GPa]
T	0,002367	0,0288	0,0947	0,000125	0,0695
L	0,000120	0,0332	0,0410	0,000187	0,0106
W	0,000081	0,0712	0,0015	0,000282	0,0171
	γ_y [-]	G0 [GPa]	G1 [GPa]		
TL	0,0866	0,0289	0,0001		
LW	0,0395	0,0017	0,0001		
WT	0,0631	0,0368	0,0001		

Tabulka 7 - Výsledné materiálové vlastnosti - Hliník

Aramid	σ_y [GPa]	ϵ_y [-]	E0 [GPa]	E1 [GPa]	E2 [GPa]
T	0,003515	0,0125	0,2815	0,001036	0,1709
L	0,000319	0,0078	0,0454	0,000047	0,0226
W	0,000231	0,0033	0,0492	0,000026	0,0369
	γ_y [-]	G0 [GPa]	G1 [GPa]		
TL	0,0982	0,0217	0,0001		
LW	0,2811	0,0026	0,0001		
WT	0,0785	0,0164	0,0001		

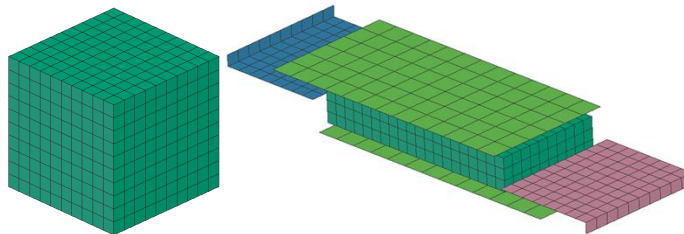
Tabulka 8 - Výsledné materiálové vlastnosti - Aramid

3.2.4 Simulace zkoušky vzorků

Při zkouškách jednotlivých vzorků se objevují mírné nuance. Během zkoušky se může měnit počáteční nastavená plocha vzorku a může tak docházet ke zkreslení výsledných napětí, jelikož jsou přepočítávána z působící síly příčnicku a počáteční plochy vzorku. Z tohoto důvodu a z důvodu co nejlepšího nastavení materiálu se vytvoří simulace tlakové a smykové zkoušky vzorků.

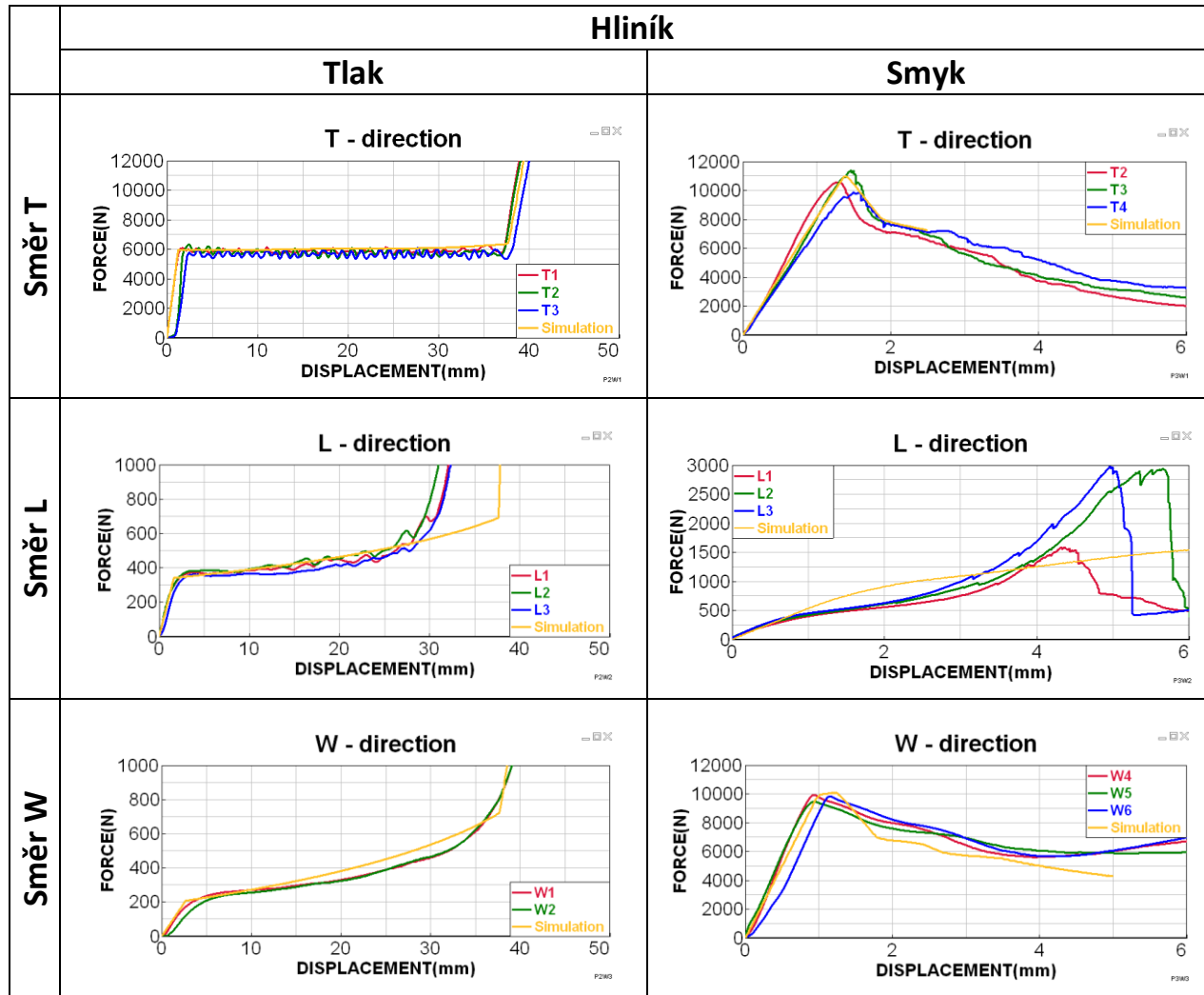
Modely pro simulaci zkoušky vzorků

Modely pro simulaci jsou zjednodušeny tak, aby byl zachován princip zkoušky. Simulace se pro omezení vlivu velikosti elementů provede s různou hustotou sítě, a sice 5 a 10mm. Okrajové podmínky odpovídají podmínkám reálných zkoušek.

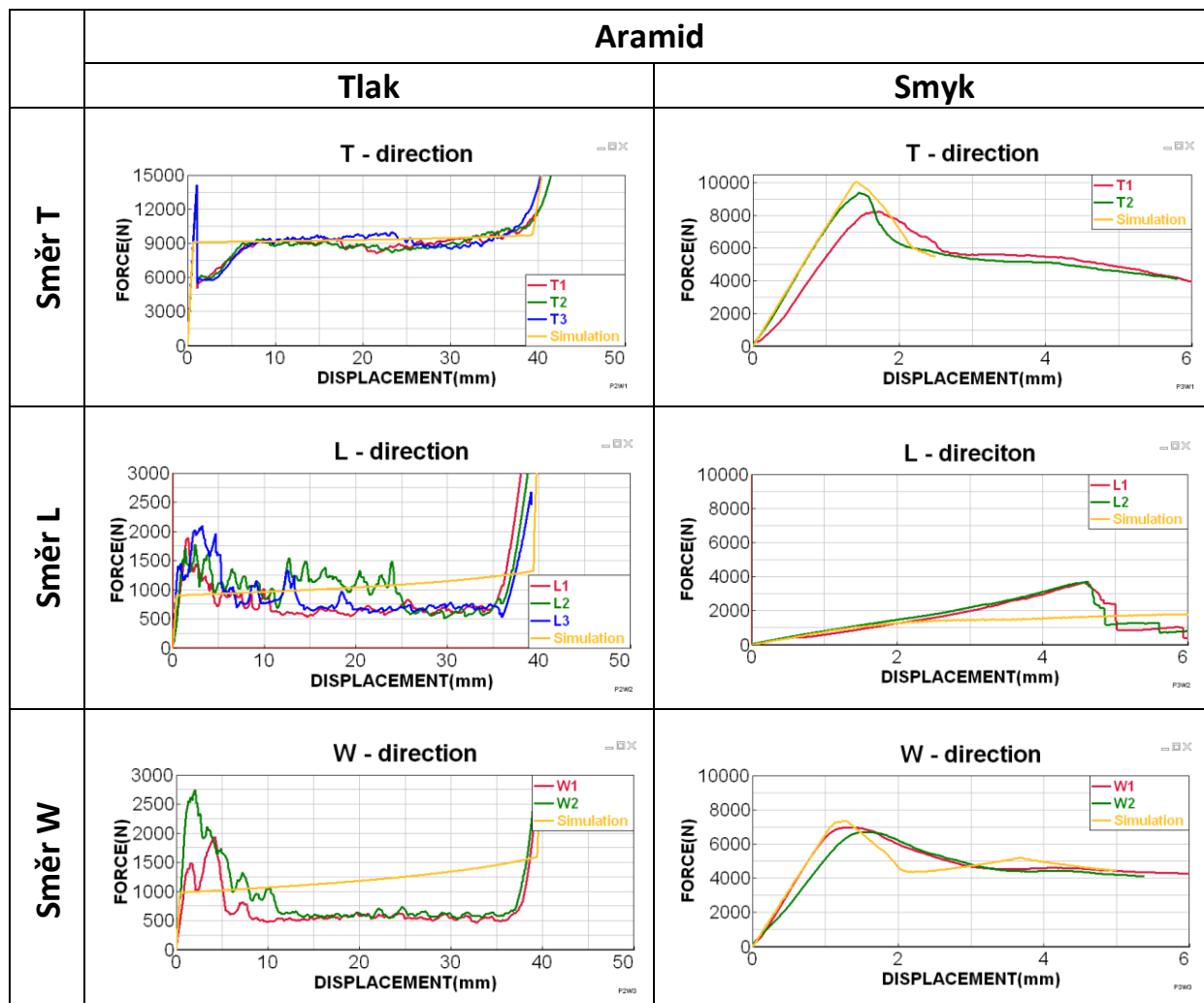


Obrázek 24 - Modely vzorků

Výsledky simulace v porovnání s výsledky ze zkoušky



Tabulka 9 - Výsledné napět'ové charakteristiky vzorků - Hliník



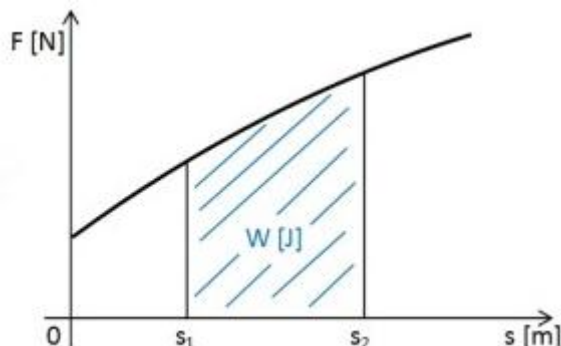
Tabulka 10 - Výsledné napěťové charakteristiky vzorků - Aramid

Žlutá křivka vždy symbolizuje výsledný průběh napětí-deformace simulace. Ostatní barvy charakterizují jednotlivé vzorky v daném směru. Použitým materiálovým modelem nelze zachytit všechny aspekty materiálu. Cílem, je co nejvíce se přiblížit výsledkům statických zkoušek a to především: v tlaku ve směru T a ve smyku ve směru T a W. Související vlastnosti pro všechny směry jsou v ostatních směrech v definici materiálu podřízeny předchozím.

Pomocí těchto simulací jsou doladěny zásadní rozdíly a materiálové vlastnosti se použijí v simulaci dynamické zkoušky.

3.3 Deformační člen

Deformační člen musí dle pravidel vstřebat energii 7350J. Pomocí hrubého analytického výpočtu se navrhnu základní rozměry deformačního členu.



Obrázek 25 - Vztah pro práci (energii)

3.3.1 Hliníkový deformační člen – Varianta č. 1



Obrázek 26 - Návrh deformačního členu - materiál hliníkový - Varianta 1

Vzorek:

Hrana vzorku $a = 0,05 \text{ m}$

Plocha vzorku S_V

Energie vstřeboaná vzorkem E_V

Síla, při které dochází k plastické deformaci vzorku $F = 6020 \text{ N}$

Posuv, při kterém začíná docházet k plastické deformaci s_1

Posuv, při kterém končí výrazná plastická deformace s_2

$$S_V = a^2 = 0,05^2 = 0,0025 \text{ m}^2$$

$$\Delta s = s_2 - s_1 = 0,03694 - 0,00142 = 0,03694 \text{ m}$$

$$E_V = F \cdot \Delta s = 6074 \cdot 0,03694 = 224,4 \text{ J}$$

Deformační člen:

Minimální rozměry deformačního členu jsou 200x100x200 mm viz specifikace požadavků.

Plocha deformačního členu S_D

Energie vstřebovaná 50 mm deformačního členu E_S

Energie vstřebovaná celým deformačním členem E_D

$$S_D = 0,2 \cdot 0,1 = 0,02 \text{ m}$$

$$\begin{array}{c} \uparrow S_V \dots \dots \dots E_V \uparrow \\ \uparrow S_D \dots \dots \dots E_S \uparrow \end{array}$$

$$E_S = E_V \frac{S_D}{S_V} = 224,4 \frac{0,02}{0,0025} = 1795 \text{ J}$$

$$E_D = 4 \cdot E_S = 4 \cdot 1795 = 7180 \text{ J}$$

Samotný deformační člen nevstřebá dle hrubého výpočtu požadované množství energie, přestože mnoho nezbyvá. Určité množství energie ještě pojme přepážka, která se plasticky také zdeformuje. Vzhledem k tomu, že se prodává hliníková voština určená přímo pro použití jako deformační člen, uvažuje se deformační člen z hliníkové voštiny jako první varianta. Hmotnost deformačního členu o minimálních rozměrech v podobě hliníkové voštiny je teoreticky dle hustoty a objemu 0,37 kg.

3.3.2 Aramidový deformační člen s příčným narušením struktury – Varianta č. 2

Vzorek:

Hrana vzorku $a = 0,05 \text{ m}$

Plocha vzorku $S_V = 0,0025 \text{ m}$

Energie vstřebovaná vzorkem E_V

Síla, při které dochází k plastické deformaci vzorku $F = 8750 \text{ N}$

Posuv, při kterém začíná docházet k plastické deformaci s_1

Posuv, při kterém končí výrazná plastická deformace s_2

$$\Delta s = s_2 - s_1 = 0,0384 - 0,00063 = 0,0378 \text{ m}$$

$$E_V = F \cdot \Delta s = 8750 \cdot 0,0378 = 330,75 \text{ J}$$

Deformační člen:

Plocha deformačního členu S_D

Energie vstřebovaná segmentu o výšce 50 mm deformačního členu E_S

Energie vstřebovaná celým deformačním členem E_D

$$S_D = 0,2 \cdot 0,1 = 0,02 \text{ m}$$

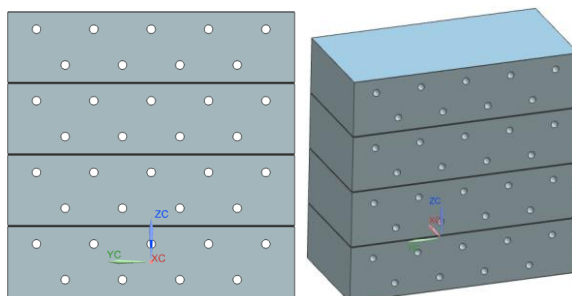
$$\begin{array}{c} \uparrow S_V \dots \dots \dots E_V \uparrow \\ \uparrow S_D \dots \dots \dots E_S \uparrow \end{array}$$

$$E_S = E_V \frac{S_D}{S_V} = 330,75 \frac{0,02}{0,0025} = 2646 \text{ J}$$

$$E_D = 4 \cdot E_S = 4 \cdot 2646 = 10584 \text{ J}$$

Plný aramidový deformační člen vstřebá požadovanou energii s rezervou přibližně 3000 J. Současně má vyšší tuhost, což by mohlo být důsledkem příliš vysoké hodnoty zpomalení. Předchozí důvody vedou k nutnosti narušení struktury aramidové voštiny nebo odlehčení a

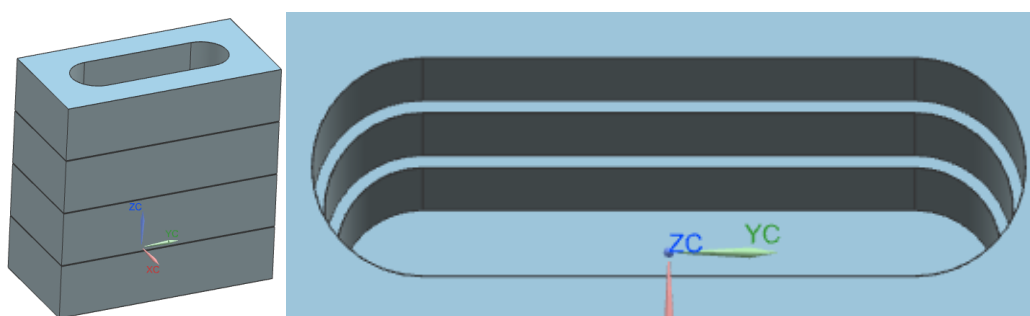
dosazení tak nižší celkové vstřebané energie. Deformace bude probíhat snáze. Varianta č. 2 je charakteristická vyvrtáním děr o průměru 6mm skrz segmenty deformačního členu ve směru kolmém ke směru zatížení, viz následující obrázek. Plný aramidový deformační člen váží dle hustoty a objemu 0,32 kg a po odlehčení vyvrtáním děr se soustava segmentů odlehčí o 10 gramů.



Obrázek 27 - Návrh deformačního členu – materiál aramidový - Varianta 2

3.3.3 Aramidový deformační člen s vnitřním odlehčením – Varianta č. 3

Vzhledem k výrazné rezervě v hodnotě vstřebané energie plného deformačního členu z aramidové voštiny se ve třetí variantě deformačního členu provede odstupňované odlehčení jednotlivých segmentů dle následujícího obrázku. Největší díra se nachází nejdále od rámu vozidla a v dalších segmentech se postupně zmenšuje, kdy v posledním článku už díra není žádná. Během dynamického jevu se pak předpokládá deformace soustavy segmentů od nejvzdálenějšího segmentu od rámu vozidla. Díky odlehčení se sníží hmotnost a zároveň nebude deformační člen příliš tuhý a průběh zpomalení bude nižší než v případě deformačního členu neodlehčeného. Hmotnost je v tomto případě snížena z teoretických původních 0,32 na 0,26 kg. Vnější rozměry jsou stejně jako u předchozích variant ponechány minimální možné.



Obrázek 28 - Návrh deformačního členu – materiál aramidový - Varianta 3

Vzorek:

Hrana vzorku $a = 0,05 \text{ m}$

Plocha vzorku $S_V = 0,0025 \text{ m}^2$

Energie vstřebaná vzorkem $E_V = 330,75 \text{ J}$

Síla, při které dochází k plastické deformaci vzorku $F = 8750 \text{ N}$

Posuv, při kterém začíná docházet k plastické deformaci s_1

Posuv, při kterém končí výrazná plastická deformace s_2

$$\Delta s = s_2 - s_1 = 0,0384 - 0,00063 = 0,0378 \text{ m}$$

Deformační člen:

Plocha segmentu deformačního členu 1,2,3,4 $S_{D1,2,3,4}$

Energie vstřebovaná segmentu o výšce 50 mm deformačního členu $E_{S1,2,3,4}$

Energie vstřebovaná celým deformačním členem E_D

$$S_{D1} = 0,2 \cdot 0,1 = 0,02 \text{ m}$$

$$S_{D2} = 0,01589$$

$$S_{D3} = 0,01494$$

$$S_{D4} = 0,01391$$

$$\begin{array}{c} \uparrow S_V \dots \dots \dots E_V \uparrow \\ \uparrow S_D \dots \dots \dots E_S \uparrow \end{array}$$

$$E_{S1} = E_V \frac{S_{D1}}{S_V} = 330,75 \frac{0,02}{0,0025} = 2646 \text{ J}$$

$$E_{S2} = E_V \frac{S_{D2}}{S_V} = 330,75 \frac{0,01539}{0,0025} = 2056 \text{ J}$$

$$E_{S3} = E_V \frac{S_{D3}}{S_V} = 330,75 \frac{0,01494}{0,0025} = 1951 \text{ J}$$

$$E_{S4} = E_V \frac{S_{D4}}{S_V} = 330,75 \frac{0,01391}{0,0025} = 1840 \text{ J}$$

$$E_D = \sum E_S = 2646 + 2056 + 1951 + 1840 = 8493 \text{ J}$$

3.4 Ochranná přepážka

Ochranná přepážka slouží v první řadě jako prvek, ke kterému bývá připevněn deformační člen, kromě této funkce zároveň plní funkci ochrannou. Přepážka zabraňuje vniknutí cizího tělesa z vnějšku vozidla do prostoru uvnitř, kde má řidič dolní končetiny.

Pravidla FSAE v základu dovolují použití 1,5 mm tlustého ocelového plechu nebo 4 mm tlustého plechu z hliníkové slitiny. Mezi možné způsoby připevnění přepážky k přední části rámu patří: šroubové spojení, svarový spoj a případně lepený spoj. Optimální varianta těchto dvou kritérií bude zvolena s ohledem na hmotnost, montáž a dostatečnou pevnost. V případě hliníkového materiálu je zvolena slitina EA AW 7075 T6, a to z důvodu vysokého napětí na mezi kluzu současně s dostupností materiálu. Pro plech ocelový se uvažuje materiál S235.

Mechanické vlastnosti

Vlastnosti	EA AW 7075 T6	Ocel S235
RP _{0,2} [MPa]	475	235
R _m [MPa]	545	450
E [MPa]	70 000	210000
ρ [kg.m-3]	7850	2850

Tabulka 11 - Ochranná přepážka - mechanické vlastnosti

Hmotnost

Hmotnost plechu:

Objem plechu v případě šroubového spojení s přední částí rámu: 335x407x1,5(4)

$$m_{ocel} = \rho_{ocel} \cdot V = 7350 \cdot 0,335 \cdot 0,407 \cdot 0,0015 = 1,50 \text{ kg}$$

$$m_{AW} = \rho_{AW} \cdot V = 2850 \cdot 0,335 \cdot 0,407 \cdot 0,004 = 1,55 \text{ kg}$$

Objem plechu v případě svarového spojení s přední částí rámu: 322,5x394,5x1,5

$$m_{ocel} = \rho_{ocel} \cdot V = 7350 \cdot 0,3225 \cdot 0,3945 \cdot 0,0015 = 1,4 \text{ kg}$$

Svařitelnost materiálu EA AW 7075 T6 je špatná

Hmotnost šroubových / svarových prvků:

$$V_{svar} = 0,0015 \times 0,0015 \times 0,742 = 1,67 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$$

$$m_{svar} = \rho_{ocel} \cdot V = 7350 \cdot 1,67 \cdot 10^{-6} = 0,0123 \text{ kg}$$

$$m_{šroub} = 0,0088 \text{ kg}$$

$$m_{matice} = 0,0020 \text{ kg}$$

$$m_{držák1} = 7350 \cdot 0,00000198 = 0,0146 \text{ kg}$$

$$m_{držák2} = 7350 \cdot 0,00000271 = 0,0199 \text{ kg}$$

$$m_{celkova} = 8 \cdot (m_{šroub} + m_{matice}) + 4 \cdot (m_{držák1} + m_{držák2}) = 0,2244 \text{ kg}$$

Hmotnost [kg]	Varianta 1	Varianta 2	Varianta 3
Plech - ocel	1,5	1,4	X
Plech - AW	X	X	1,55
Šroub. spojení	0,2244	X	0,2244
Svar. spojení	X	0,0123	X
Celková hmotnost	1,7244	1,4123	1,7744

Tabulka 12 - Ochranná přepážka - hmotnost jednotlivých prvků

Ohybová tuhost

Deformační síla působící na deformační člen dále přechází do přepážky. Osová síla se mění na sílu ohybovou. Jelikož přepážka nedosahuje velkých rozměrů co do tloušťky, je při výběru varianty nutné brát v potaz ohybovou tuhost daného materiálu.

$$\text{ohybová tuhost}_{ocel} = E \cdot I = E \cdot \frac{1}{3} \cdot b \cdot h^3 = 210 \cdot 10^9 \cdot \frac{1}{3} \cdot 0,382 \cdot 0,0015^3 = 90,25 \text{ Nm}^2$$

$$\text{ohybová tuhost}_{AW} = E \cdot I = E \cdot \frac{1}{3} \cdot b \cdot h^3 = 70 \cdot 10^9 \cdot \frac{1}{3} \cdot 0,382 \cdot 0,004^3 = 570,45 \text{ Nm}^2$$

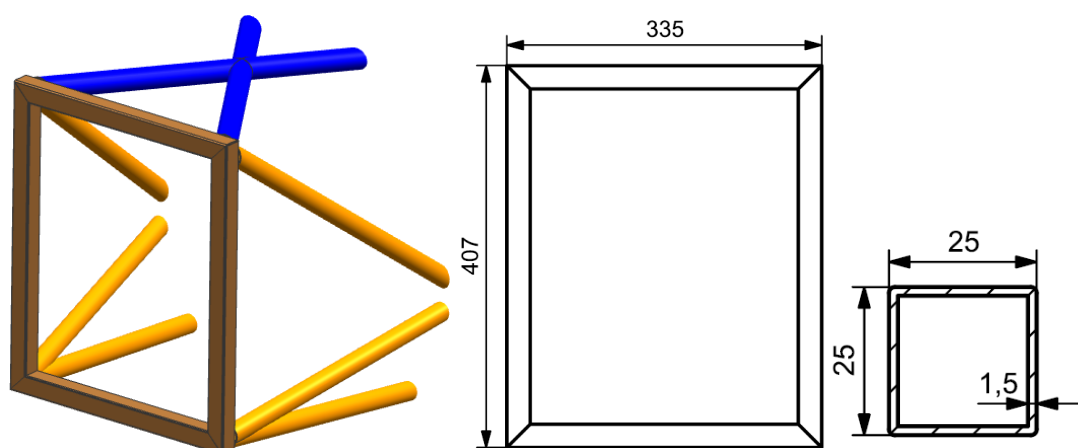
Vyhodnocení optimální varianty

Hmotnost samostatného plechu vychází nižší pro ocelový materiál. Lehčí samostatné spojovací prvky jsou svarové. Po porovnání možných kombinací materiálu a spojovacích prvků lze jako nejvhodnější variantu z hlediska hmotnosti prohlásit variantu číslo 2, kde je použit ocelový plech a spojení je svarové. Varianta číslo 1 s ocelovým plechem a šroubovým spojením je na druhém místě. Přesto tyto varianty mají oproti třetí variantě přibližně šestkrát nižší ohybovou tuhost než varianta s hliníkovým materiálem. Z hlediska montáže/demontáže se jako optimálnější způsob uchycení jeví rozebíratelné spojení, především z důvodu lepší přístupnosti k pedálům vozidla.

Vzhledem k montáži/demontáži, nepříliš výrazným hmotnostním rozdílům a naopak velmi výraznému rozdílu v ohybové tuhosti vybraných materiálů se použije varianta číslo 3, u které se uvažuje přepážka z hliníkové slitiny s označením EA AW7075 o tloušťce 4 mm a spolu s deformačním členem se k rámu připevní za pomoci osmi šroubů.

3.5 Přípravek pro fyzický test

Použitelnost deformačního členu pro závody podmiňuje splnění požadavků daných pravidly, a proto musí být fyzicky otestován. Nutnou součástí sestavy je přípravek, na kterém se deformační člen testuje. Výstupem z rámu a zároveň jedním ze vstupů pro návrh přípravku a celé sestavy deformačního členu pro fyzický test je přední část rámu. Ta má obdélníkový tvar o rozměrech 407 x 335 mm a profil tvoří jekl z materiálu S235 o rozměrech 25x25x1,5.



Obrázek 29 - Přední část rámu, rozměry a profil přední části rámu

Současná pravidla soutěže v případě šroubového spojení nově (od roku 2017) nařizují uchycení deformačního členu osmi šrouby M8. Jejl má výhodný tvar pro přivaření držáků a dosednutí bezpečnostní přepážky. Střední děr držáků pro šrouby od sebe mohou být vzdálené minimálně 50 mm a současně musí být poměr e/D , kde D = průměr díry pro šroub a e =

vzdálenost osy díry od volné hrany, vyšší nebo roven 1,5. Průměr díry pro každý šroub M8 je 8,4 mm. Pro splnění pravidel musí být splněna následující podmínka:



Obrázek 30 - Vzdálenost osy díry od hrany rámu

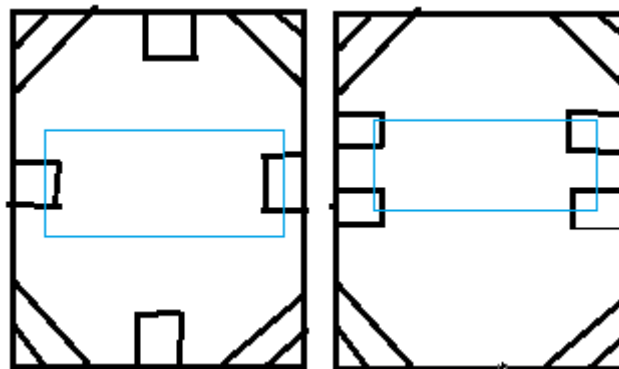
$$\frac{e}{D} \geq 1,5$$

$$e \geq 1,5 \cdot D$$

$$e \geq 1,5 \cdot 8,4$$

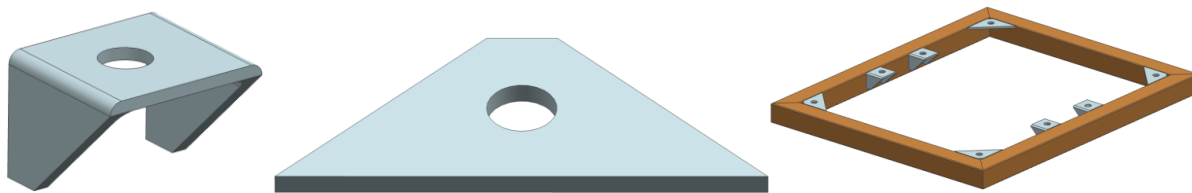
$$e \geq 12,6 \text{ mm}$$

Osa díry je s ohledem na pravidla, na velikost hlavy šroubu a na snadnou montáž vzdálena 12,6 mm od volné hrany držáku. Rozmístění osmi držáků se nabízí rovnoměrné, viz následující obrázek vlevo. Čtyři držáky umístěné do každého rohu a další čtyři vždy do středu stěny. Deformační člen je vyznačen modrou barvou. Při deformaci během experimentu bude na přípravek působit nejvyšší zatížení v místě deformačního členu, a proto se držáky rozmístí dle následujícího obrázku vpravo. Čtyři držáky se nachází v rozích obdélníku a dvojice držáků se nachází vždy na vertikální hraně rámu. Držáky v tomto rozmístění více podporují deformační člen. Zároveň se dodrží minimální vzájemná vzdálenost os děr držáků 50 mm.



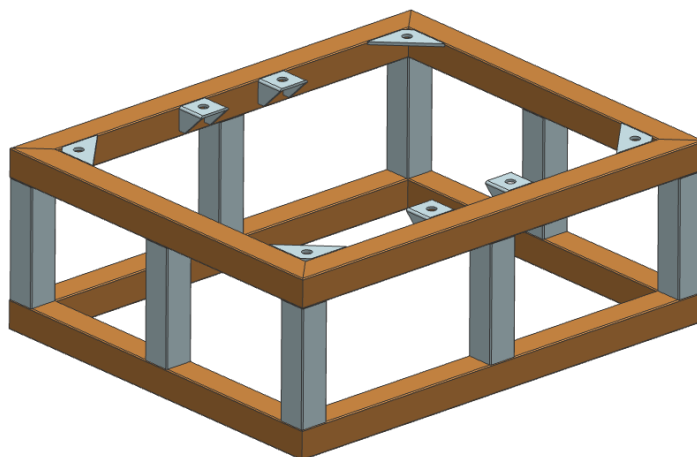
Obrázek 31 - Přípravek - rozmístění držáků

Držáčky se vyříznou pomocí laseru z plechu o tloušťce 2,5 mm a držáky patřící na stěnu se ještě ohnou do výsledného tvaru na ohraňovacím lisu, viz obrázek níže. Držáčky se k části přípravku přivaří.



Obrázek 32 - Přípravek - držáky

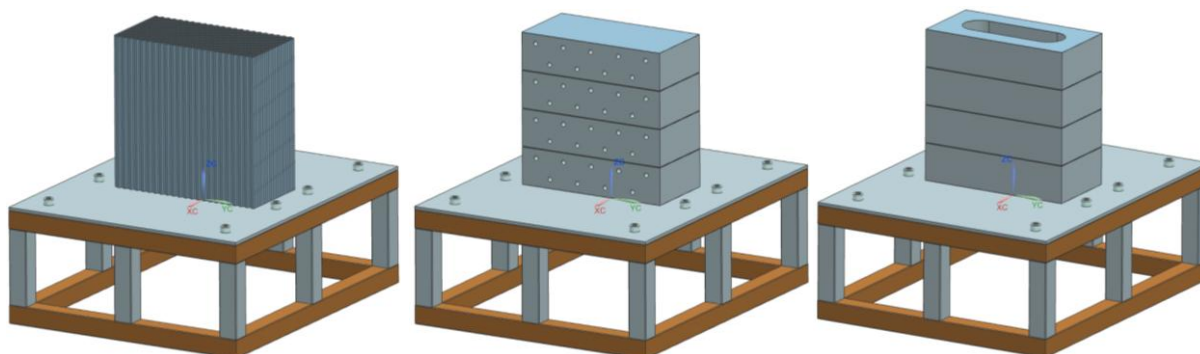
Další část přípravku není dle pravidel omezena ničím jiným než prostorem alespoň 50 mm mezi částí reprezentující rám a zemí. Prostor umožňuje deformaci přepážky a následnou kontrolu konečného průhybu. Z předchozích zkušeností tento prostor bude větší. Bude tak možno lépe zdokumentovat sestavu po deformaci a současně půjde lépe vložit do prostoru pod přepážkou modelína. Přepážka se během testu deformuje plasticky a elasticky. Po odlehčení se těleso vrátí o elastickou deformaci a pomocí modelíny můžeme zachytit maximální deformaci před odlehčením. Maximální deformace poslouží jako kontrolní prvek při porovnání simulace a experimentu.



Obrázek 33 - Přípravek

3.6 Sestava pro dynamickou zkoušku

Sestavu deformačního členu pro dynamickou zkoušku tvoří ocelový přípravek z jeklu 25x25x1,5 mm s držáky, přepážka z hliníkové slitiny. Spojujícími prvky jsou šrouby M8x20-12,9 a šestihránná matice M8. Poslední částí je deformační člen ve třech variantách.



Obrázek 34 - Sestava pro dynamickou zkoušku - tři varianty

4. Numerická simulace

Numerická simulace dynamické zkoušky deformačního členu, která je současně reálně provedena v laboratoři KTG s.r.o., je provedena v software VPS (PAM-CRASH). Simulace se vytvoří pro dvě ze tří variant, a sice pro variantu č. 1 a 3.

4.1 Vliv rychlosti deformace na chování materiálu

Statické vlastnosti každého materiálu získané na základě statických zkoušek vzorků popisují chování daného materiálu při nízkých rychlostech. V případě, že se materiál deformuje vyšší rychlostí, obecně dochází ke změnám vlastností – zpravidla ke zvýšení hodnot mechanických vlastností. Zvyšující se rychlost deformace způsobuje viskózní efekt a materiál klade větší odpor proti porušení.

Vliv rychlosti deformace závisí na parametru strain rate. Ten upravuje zadané statické vlastnosti v základu dvěma možnými způsoby. První způsob spočívá v analytickém modelu a druhý vychází z definování více křivek napětí-deformace materiálu.

Analytický model strain rate

Chování dle rychlosti deformace může být analyticky popsáno následující formou:

Případ 1: $\sigma(\varepsilon, \dot{\varepsilon}) = \sigma_0(\varepsilon)f(\varepsilon, \dot{\varepsilon})$ nebo 2: $\sigma(\varepsilon, \dot{\varepsilon}) = \sigma(p(\varepsilon, \dot{\varepsilon}))$

kde: σ = skutečné plastické napětí

ε = skutečná plastická deformace

$\dot{\varepsilon}$ = ekvivalentní rychlosti plastické deformace (strain rate)

V prvním případě vychází účinky rychlosti deformace z analytické funkce $f(\varepsilon, \dot{\varepsilon})$, která násobí základní materiálovou křivku označenou jako: $\sigma_0(\varepsilon)$ nebo $\sigma_y(\varepsilon)$. V druhém případě závisí účinky rychlosti deformace na každém parametru p dle základního materiálového vzorce $\sigma(p(\varepsilon))$, účinky také závisí na $\dot{\varepsilon}$ (ESI Group 2016).

Existuje celá řada analytických vzorců, ze kterých je možno vycházet pro změnu vlastností materiálu v závislosti na rychlosti deformace. Pro deformační člen se vychází z modelu Cowper-Symonds. Analytický vzorec tohoto modelu má následující podobu:

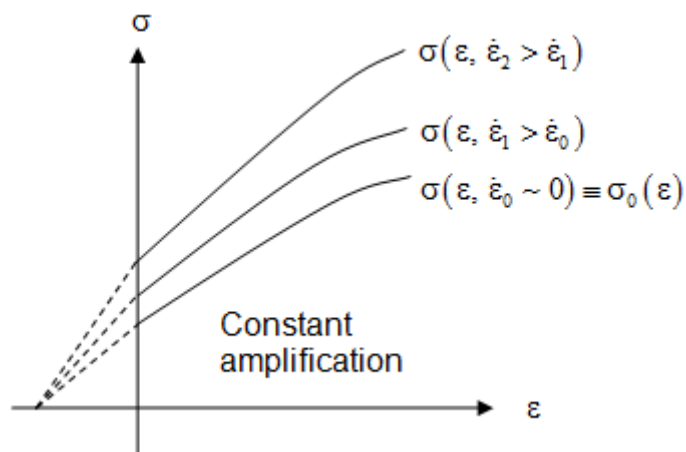
$$\sigma = \sigma_0(\varepsilon) \left[1 + \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{D} \right)^{\frac{1}{p}} \right]$$

kde, σ = dynamická hodnota napětí na mezi kluzu

σ_0 = statická hodnota napětí na mezi kluzu

$\dot{\varepsilon}$ = strain rate

D, p = konstanty jedinečné pro každý materiál

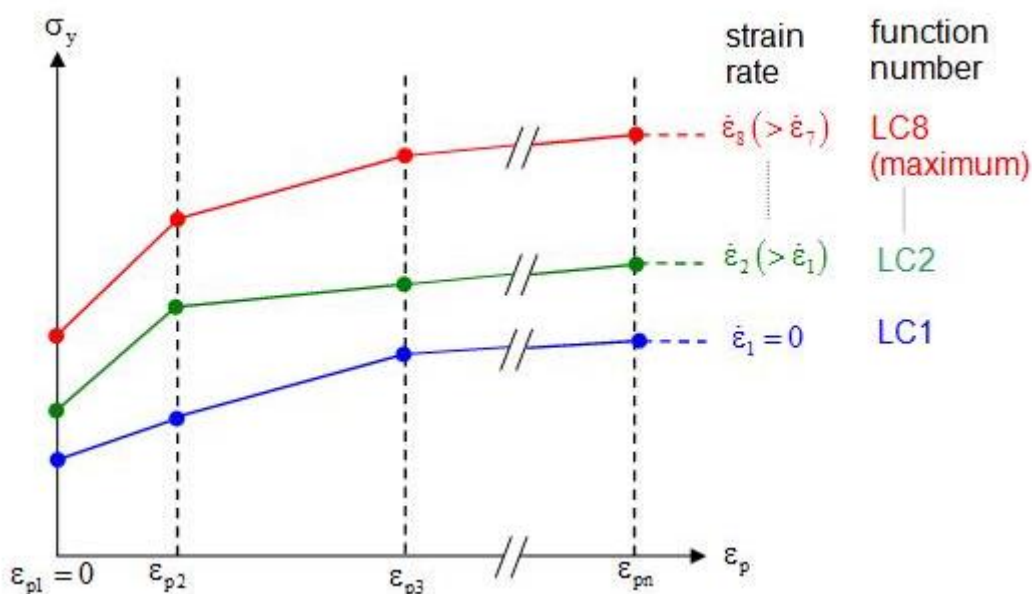


Obrázek 35 - Strain rate - Cowper-Symonds model

Formule Cowper-Symonds násobí základní křivku napětí-deformace $\sigma_0(\epsilon)$ funkcí $\dot{\epsilon}, f(\dot{\epsilon})$. Z tohoto důvodu je faktor zvyšující hodnoty křivky $\sigma_0(\epsilon)$ v důsledku rychlosti deformace konstantní v celém rozsahu deformace (ESI Group 2016).

Formulace více křivek napětí-deformace

Vliv rychlosti deformace je definován pomocí několika křivek napětí-deformace.



Obrázek 36 - Strain rate - popis více křivkami napětí-deformace

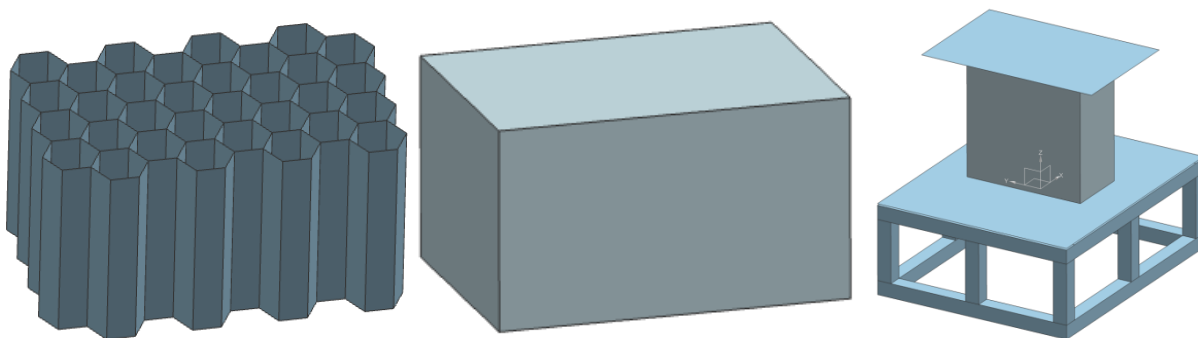
Popis chování pomocí více křivek umožňuje větší variabilitu než popis analytickými vzorci $f(\epsilon, \dot{\epsilon})$. Umožňuje nelineární závislost zvýšení hodnot křivky na rychlosti deformace v různých oblastech deformace ϵ a současně je možná závislost na rychlosti deformace $\dot{\epsilon}$. Extrapolace za poslední zadanou plastickou deformací je konstantní a všechny křivky musí mít běžné označení $\epsilon_{pi}, i=1, \dots, n$ (bez omezení). Pro dané deformace ϵ a rychlost deformace $\dot{\epsilon}$ interpoluje program hodnoty z uvedených křivek (ESI Group 2016).

Konstanty používané pro voštiny z hliníkové slitiny Al5052 jsou $D = 6500 \text{ s}^{-1}$ a $p = 4$. Vzhledem k velmi malé tloušťce fólie, použité pro voštinu na deformační člen, nemá rychlost deformace výrazný vliv na tuhost voštiny.

4.2 Model sestavy pro numerickou simulaci

Model sestavy a síť pro numerickou simulaci jsou vytvořeny v softwaru NX 11. Časová náročnost výpočtu se odvíjí od počtu prvků a kvality sítě. Přípravek z jeklu čtvercového profilu, držáky vypálené z ocelového pasu i hliníkovou přepážku ze 4 mm tlustého plechu lze převést na 2D model. Dojde tak k výraznému snížení počtu uzlů a elementů. Ocelový válec, který při dynamickém testu padá na deformační člen, se vyznačuje relativně vysokou tuhostí a reprezentuje ho proto tuhá 2D plocha.

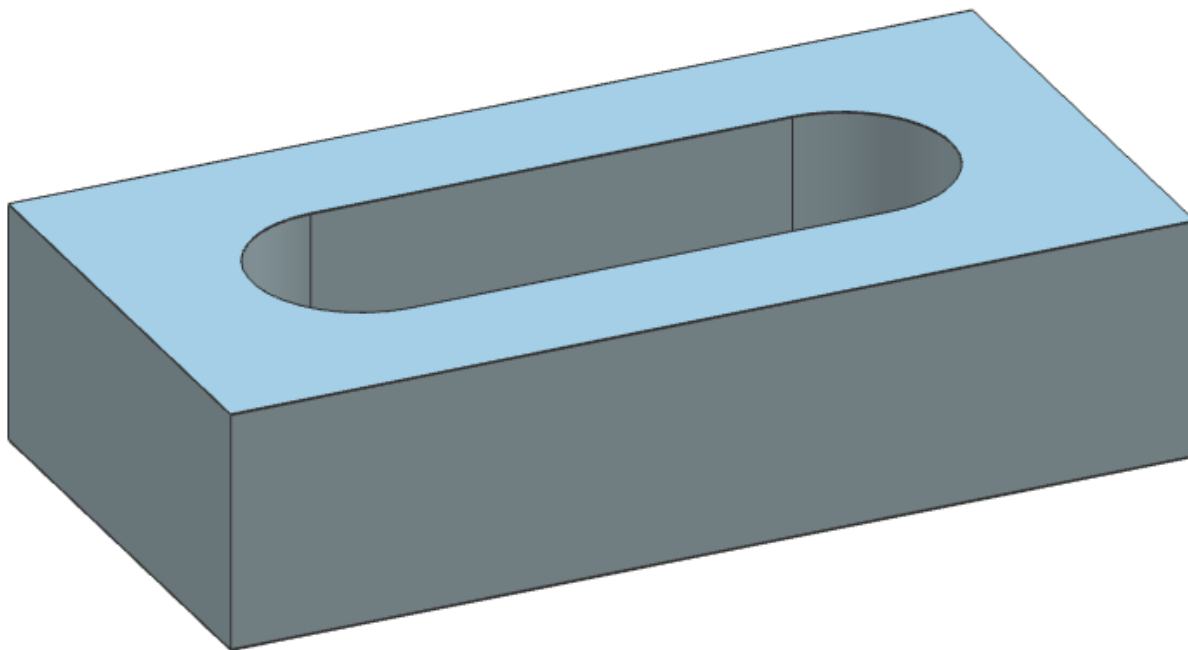
K deformačnímu členu lze přistoupit dvěma způsoby. V prvním případě se dodrží struktura voštiny, vymodelují se jednotlivé buňky a model deformačního členu bude 2D. 2D modelu se přiřadí vlastnosti hliníkového materiálu a tloušťka odpovídající tloušťce hliníkové fólie, ze které je voština vyrobena. V druhém případě se struktura voštiny nahradí plným materiálem. Plnému materiálu se přiřadí mechanické vlastnosti celé voštiny. Výhodou modelu, kde vystupuje voštinová struktura, je především možnost snadného použití simulace pro různé materiály. Vyplní se základní materiálové vlastnosti izotropního materiálu, které jsou obvykle známé. V případě nahrazení voštiny plným tělesem je z důvodů ortotropie potřeba zjistit pro konkrétní voštinu materiálové vlastnosti ve všech směrech. Ty nejsou tak snadno k sehnání jako vlastnosti konkrétních materiálů a nezbývá, než zjistit vlastnosti konkrétní voštiny pomocí statických zkoušek.



Obrázek 37 - Dva přístupy k modelování deformačního členu, model sestavy

Voštinový materiál pro statické zkoušky je k dispozici a zároveň lze provést statické zkoušky v Mechanické zkušebně RTI na ZČU. Z tohoto důvodu se vytvoří model deformačního členu 3D tělesem a přiřadí se mu materiálové vlastnosti voštiny.

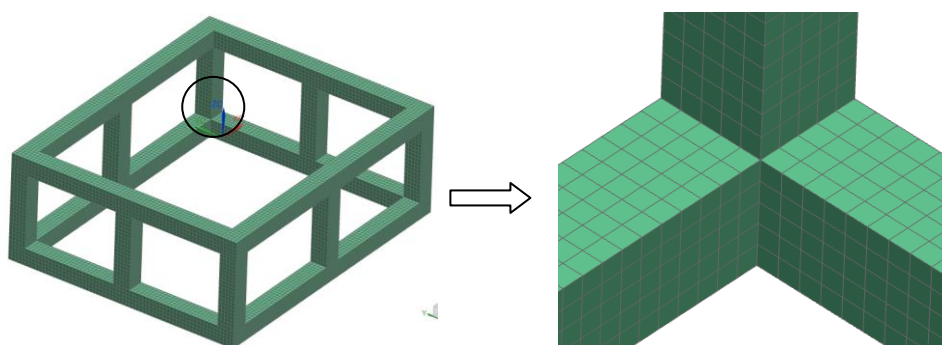
Aramidový deformační člen se vyrobí z desky o výšce 50 mm. Pro dodržení minimálních rozměrů deformačního členu je zapotřebí čtyř segmentů. Z obou stran aramidového materiálu se nachází úzká vrstva kompozitního materiálu ze skelných vláken. Půl milimetru tlustá vrstva z každé strany je nahrazena střední plochou. Střední část každého segmentu tvoří 3D těleso.



Obrázek 38 - Segment aramidového deformačního členu

4.3 Sít'

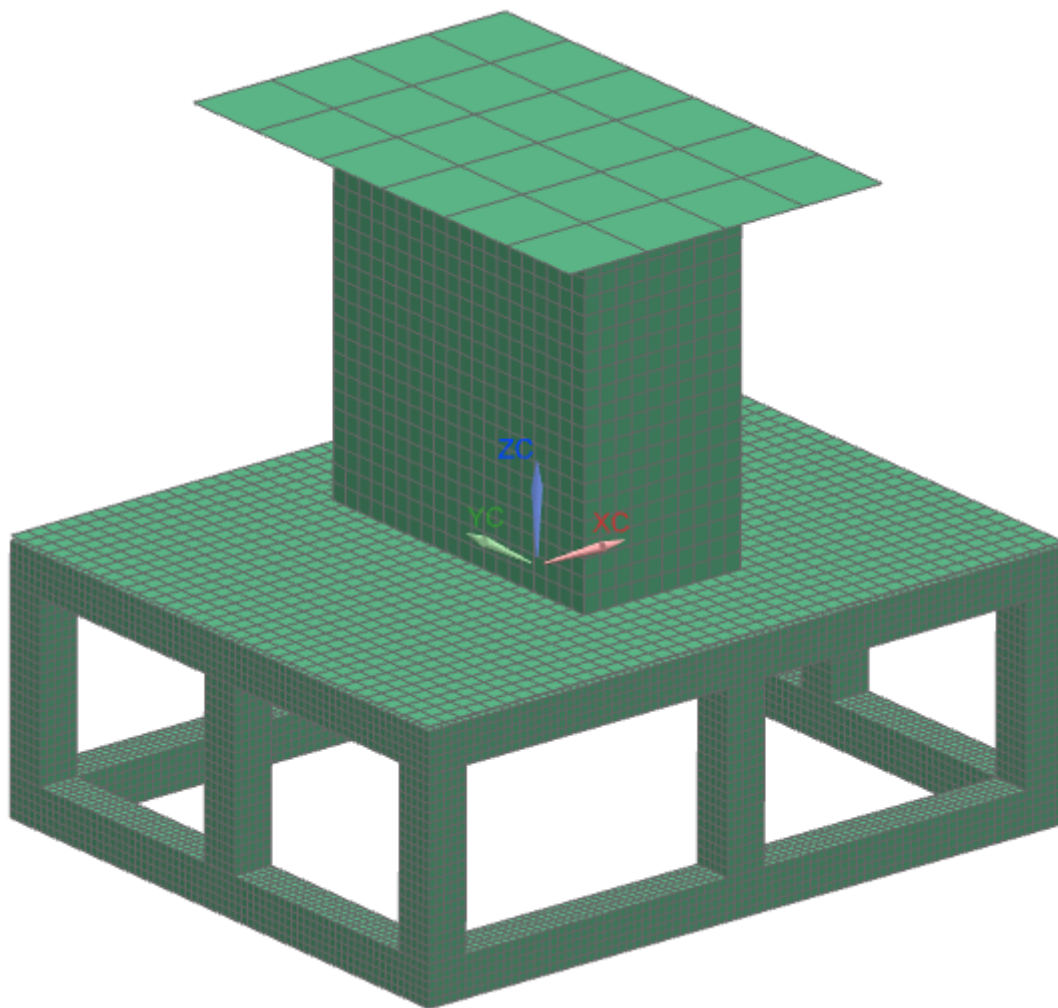
Při tvorbě sítě je třeba dbát na pravidelnost prvků. 2D model přípravku lze pravidelně zasítovat 2D prvky CQUAD4. Geometrii držáků je třeba pro pravidelnou síť nejprve připravit. Plochy reprezentující držáky se vhodným způsobem nařiznou a automatické síťování vytvoří opět pravidelnou síť. U přepážky, lisovací desky a 1. varianty deformačního členu není díky pravidelnému tvaru problém s vytvořením sítě. Díry v držácích a v přepážce se zanedbají. Díry deformaci deformačního členu nehrají výraznou roli a při jejich zanedbání se síť velmi zjednoduší.



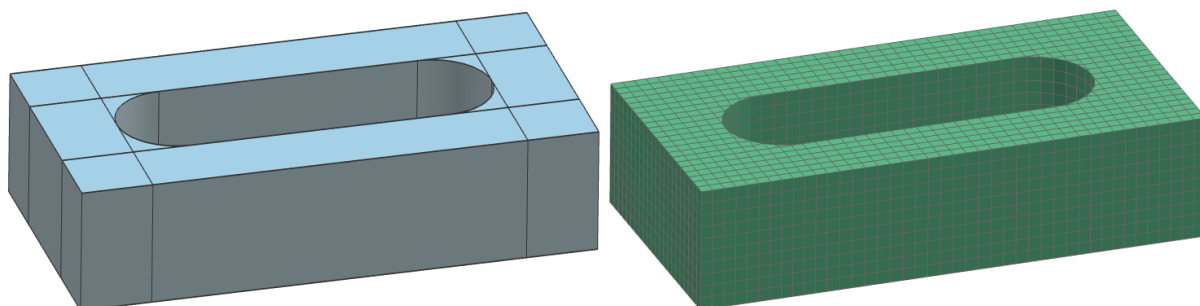
Obrázek 39 - Sít' - přípravek

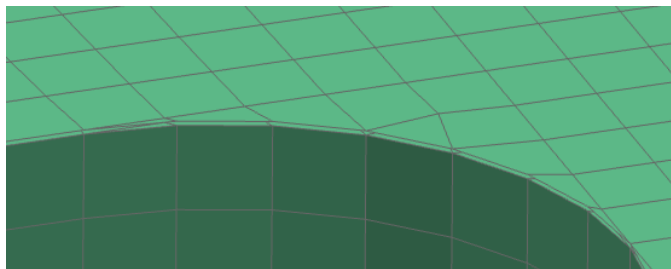


Obrázek 40 - Sít' - držáky

**Obrázek 41 - Síť - sestava**

V případě segmentu aramidového deformačního členu se dvojice ploch i 3D těleso nařiznou dle obrázku níže. Použijí se 2D prvky pro plochy reprezentující kompozitní materiál ze skelných vláken a 3D síť se v rozích otvoru vytvoří pomocí mapované 2D sítě, která slouží pouze jako pomocná a nevstupuje do simulace. Zbylá část 3D tělesa je pravidelná a není problém ji automaticky zasítovat.

**Obrázek 42 - Síť - segment aramidového deformačního členu**



Obrázek 43 - Síť - detail

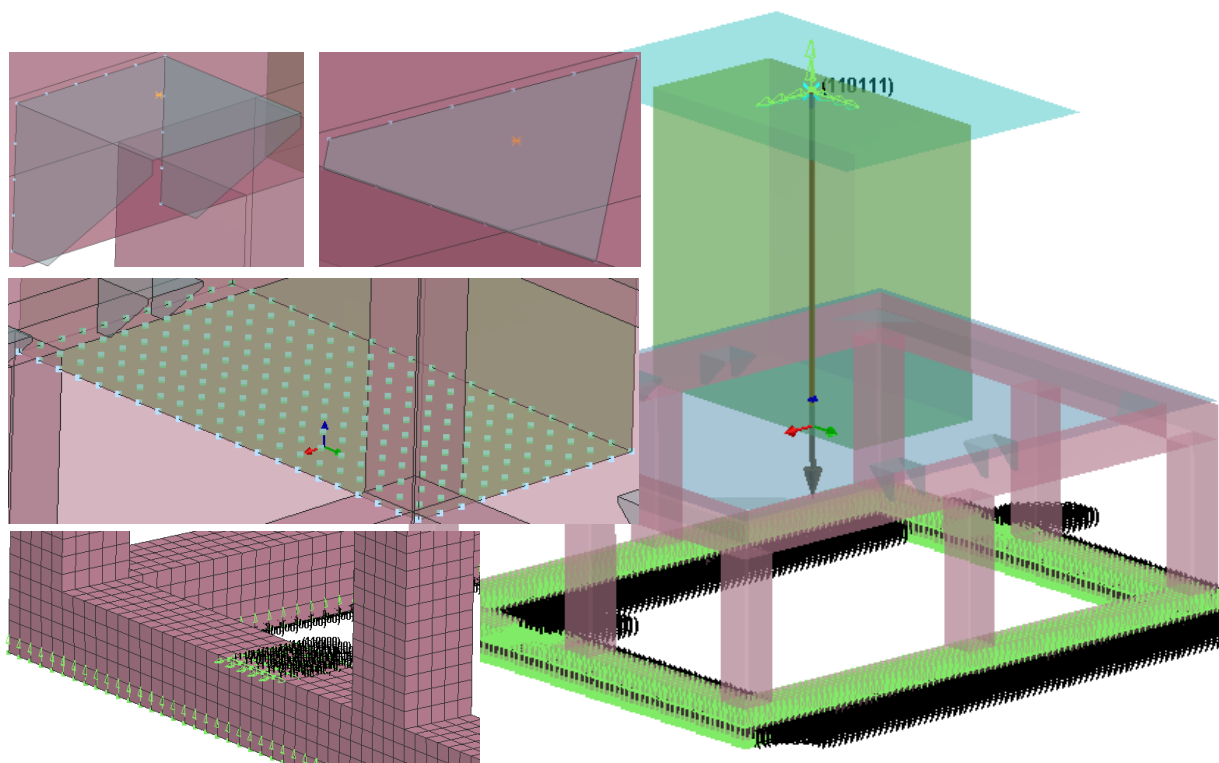
4.4 Okrajové podmínky

Síť celé sestavy se exportuje a počáteční podmínky jsou zadány v softwaru VPS (PAM CRASH). Celá sestava stojí na tuhé podložce. Spodní uzly mají zamezený posuv ve směru Z (svislý směr). Na dvou místech je sestava chycena pomocí upínek k pevné podložce. Zamezí se v těchto místech směr X a Y (vodorovná rovina). Spojení mezi přípravkem a přepážkou je realizováno entitou svarového charakteru, uzly obou částí jsou v daném místě pevně spojeny. Držáky jsou k přípravku přivařeny, takže jsou v modelu krajní uzly držáku pevně spojeny s elementy přípravku. Deformační člen se k přepážce přilepí lepidlem, čemuž odpovídá použitá entita. Stejně tomu je v rámci aramidového defočlenu, resp. mezi jednotlivými segmenty.

Lisovací tuhá deska reprezentující závaží se může pohybovat pouze ve svislém směru. Směry ostatní a všechny rotace jsou zamezeny. Veškerá hmota desky je soustředěna do bodu (ve středu desky). Tomuto bodu se přiřadí hmotnost, počáteční rychlost a gravitační zrychlení. Mezi každou součástí se definuje kontakt. Hmotnost odpovídá hmotnosti válce, který je na sestavu puštěn v dynamické zkušebně a činí 210 kg. Rychlost v místě střetu s deformačním členem by měla být tak velká, aby celková pohlcená energie splňovala požadavky, a tudíž činila 7350J.

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \quad \rightarrow \quad v = \sqrt{\frac{2 \cdot E_k}{m}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 7350}{210}} \doteq 8,37 \text{ m/s}$$

Dva uzlové body, první ve středu ochranné přepážky (plate-point) a druhý na tuhé desce (press-point), jenž symbolizuje tuhý ocelový válec, jsou prohlášeny za výstupní body (TH nodes). Z nich se následně vyhodnocují některé výsledky. Konkrétně průhyb desky, kdy se ochranná deska nesmí prohnut více než o 25 mm. Dále zrychlení, jež je u skutečného testu snímáno z ocelového válce.



Obrázek 44 - Okrajové podmínky

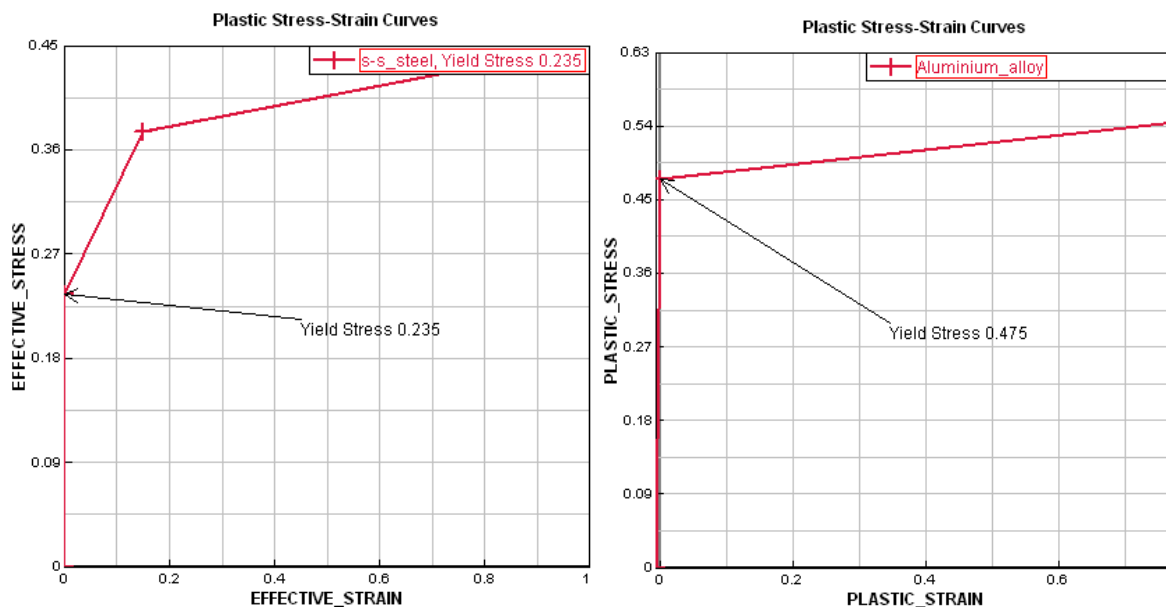
4.5 Nastavení materiálu

Materiálový model pro deformační člen obsahuje mimo jiné i statické tlakové a smykové vlastnosti ve všech směrech, hodnoty porušení při určité deformaci a hodnotu strain rate zohledňující vliv rychlosti deformace. Součásti z oceli, mezi které patří samotný přípravek a přivařené držáky, jsou popsány křivkou napětí, deformace. Křivka charakterizující chování ocelového materiálu vychází z Youngova modulu pružnosti v tahu a dále z konkrétních hodnot napětí a deformace zadaných do tabulky.

Materiálové vlastnosti hliníkové přepážky popisuje taktéž křivka napětí, deformace. Na rozdíl od ocelového materiálu však křivka vychází z Youngova modulu pružnosti v tahu a hodnoty napětí na mezi kluzu a plastického modulu a hodnoty skutečného napětí, kterého materiál dosáhne po určité deformaci při poškození.

	X	Y		X	Y
1	-0.00111905	0	1	-0.00678571	0
2	0	0.235	2	0	0.475
3	0.15	0.375	3	0.776778	0.545
4	1	0.45			

Tabulka 13 - Popis materiálových vlastností – ocel (vlevo) a hliníková slitina (vpravo)

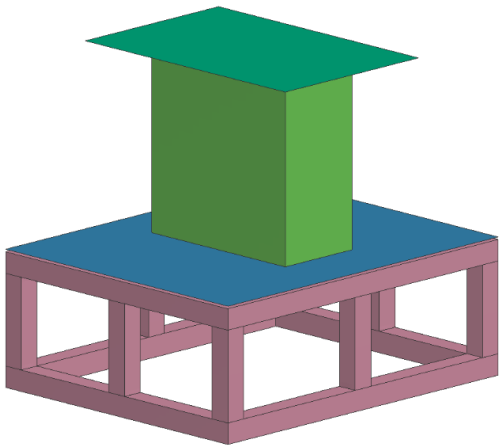
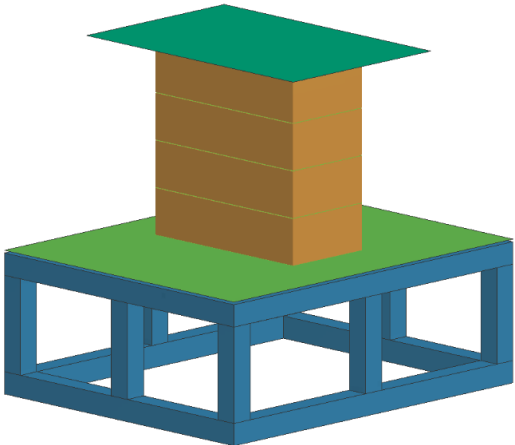
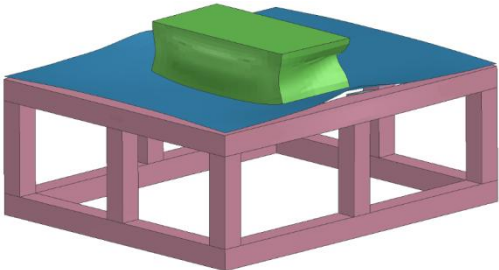
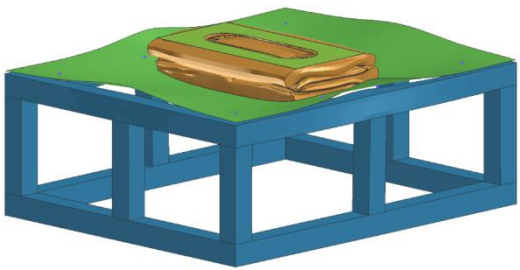
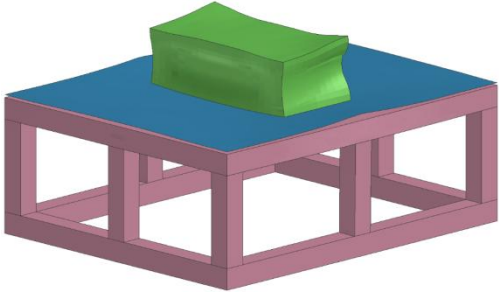
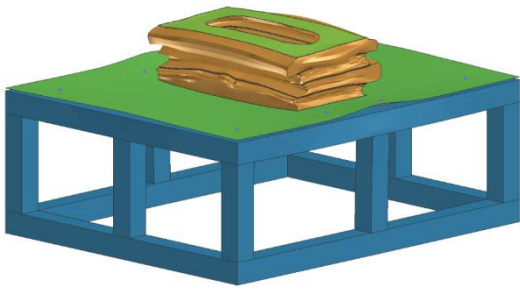
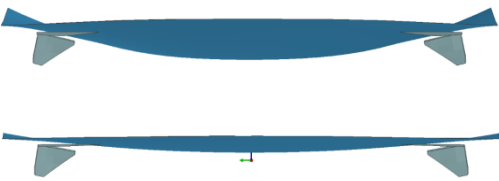
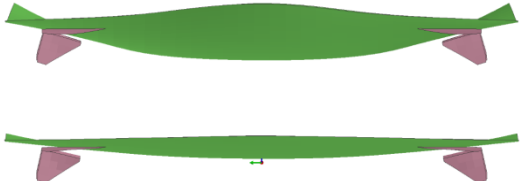


Graf 12 - Materiálové vlastnosti - ocel S235 a EA AW 7075 T6

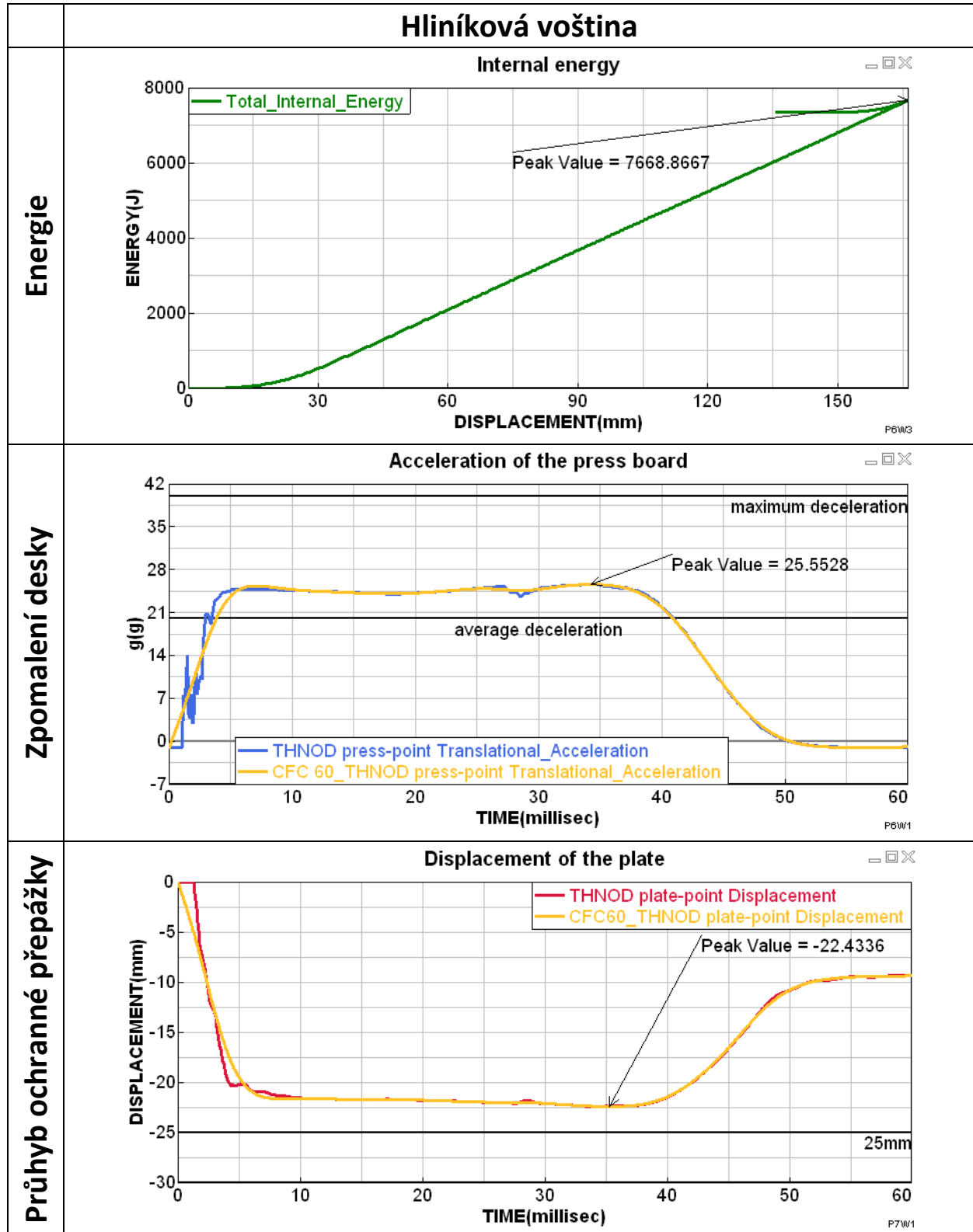
U segmentů aramidového deformačního členu se kromě vlastní voštiny ještě definuje kompozitní materiál krajních vrstev. Výrobce neudává konkrétní použitý materiál, a tak se definují pouze orientační vlastnosti kompozitu. Případné odchylky by dle mého názoru neměly způsobit výrazné zkreslení výsledků, jelikož zatížení působí v ose kolmé k rovině vláken a ty nijak výrazně v tomto směru deformační člen nevyztužují.

4.6 Výsledky

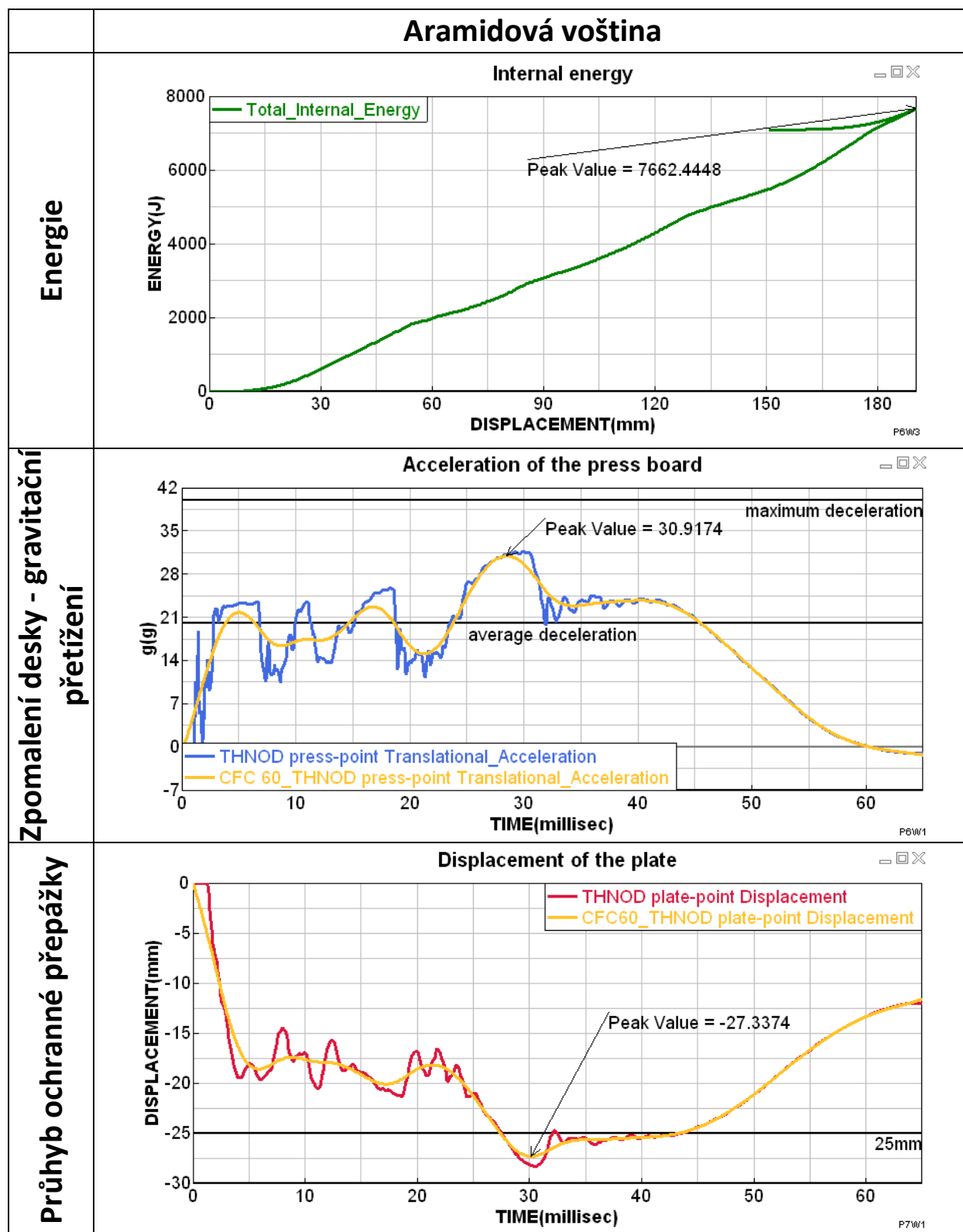
Na následujících obrázcích jsou patrné tři fáze simulace. První z nich je sestava před deformací, druhá je v době maximální deformace a poslední je po odlehčení. Poslední dvojice obrázků vizualizuje průhyb ochranné přepážky a ohyb držáků při maximálním průhybu a po odlehčení. Následující grafy naznačují průběh sledovaných veličin v závislosti na čase.

	Hliníková voština	Aramidová voština
Před deformací		
Maximální deformace		
Po odlehčení		
Deformace přepážky a držáků		

Tabulka 14 - Simulace - průběh deformace



Tabulka 15 - Simulace - průběh sledovaných veličin - materiál hliníkový

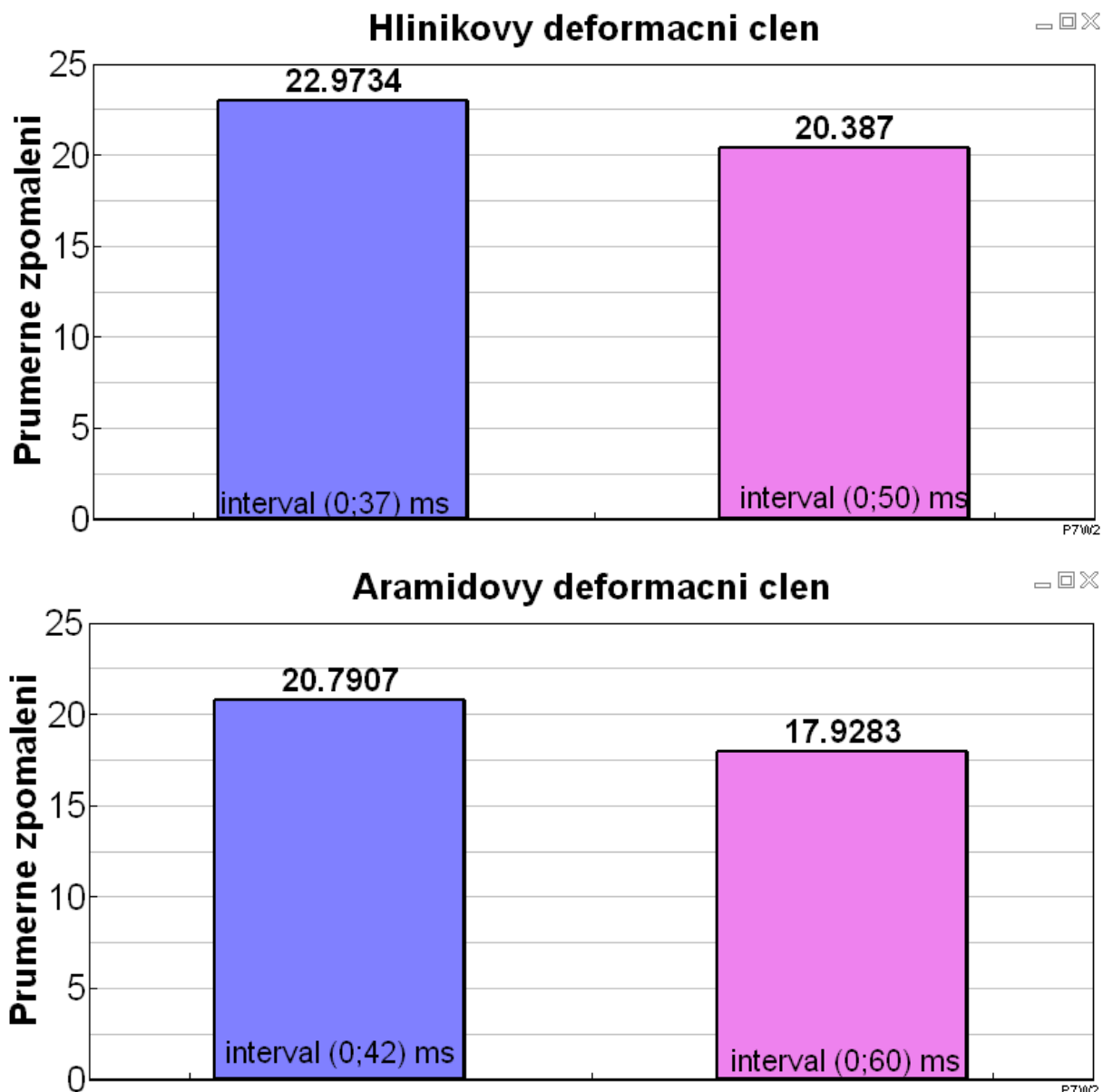


Tabulka 16 - Simulace - průběh sledovaných veličin - materiál aramidový

Celková energie absorbovaná sestavou u dvou simulovaných variant činí 7669 a 7663 J. Pravidla požadují alespoň 7350J a první kritérium obě varianty splňují. Zpomalení sledované na padající desce dle výsledného grafu zrychlení ani v jednom případě nepřesahuje maximální povolenou hodnotu zpomalení 40g. Přičemž se určuje maximální hodnota z odfiltrovaných

dat filtrem CFC 60. Z grafu je patrné, že u první varianty činí maximální hodnota zrychlení 25,6g a u druhé činí 30,9g.

Průměrná hodnota zrychlení, vyhodnocující se z neodfiltrovaných dat, se vypočte ze dvou časových intervalů. Počátek intervalu je vždy stejný, a sice 0 ms. Konec intervalu je buď doba, kdy se opět dostane přetížení na nulovou hodnotu a přestane působit, anebo nulové hodnoty dosáhne rychlost deformačního tělesa. Vypočtené hodnoty průměrného zpomalení odpovídající danému intervalu jsou patrné z následujících čtyř grafů.



Graf 13 - Průměrné zpomalení ocelového válce

Během testu se dále sleduje průhyb bezpečnostní přepážky. Pravidla povolují maximální trvalou deformaci 25mm. Ochranná přepážka se pod hliníkovým deformačním členem prohne o maximálních 22,4mm a následně se vlivem části elastické deformace vrátí. Trvalá deformace činí 9,4mm. Pod aramidovým deformačním členem se ochranná přepážka prohne na maximální hodnotu deformace 27,3mm a trvalá deformace činí 11,8mm.

5. Výroba sestavy deformačního členu pro dynamickou zkoušku

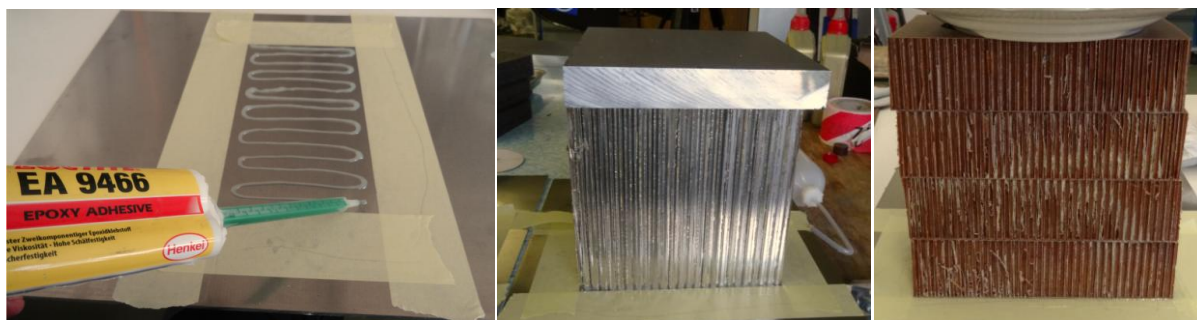
Trojici navržených přípravků dle výkresu zhotovila Plzeňská energetika z jeklů čtvercového profilu 25x25x1,5 mm. Držáčky byly laserem vypáleny z pásového polotovaru, stejného materiálu jako hlavní příčné i podélné nosníky, S235. Držáčky prošly ohraňovacím lisem, kde byly ohnuty do potřebného tvaru a přivařily se k přípravku. Přípravek se na závěr nastříkal černou barvou. Ochranná přepážka se o daných rozměrech objednala a pouze se do ní dle přípravku vyvrtaly díry o průměru 8,4 mm.

Hliníkovou voštinu pro první variantu deformačního členu se podařilo koupit o navržených rozměrech o hmotnosti 0,365 kg. Deska, kterou tvoří aramidová voština o výšce 50 mm, se prodává ve velkých rozměrech. Celá deska stojí značnou částku. Pokud by se koupila celá velká deska, dalo by se z ní vyrábět deformačních členů po mnoho let. Na druhou stranu by se vývoj deformačního členu zastavil a používal by se stále stejný dosud neověřený materiál. Použití případně lepšího materiálu by bylo velmi nákladné a neekonomické. Z těchto důvodů se využilo naskytnuté příležitosti a koupila se část desky od konkurenčního týmu. Z desky se vyřizly jednotlivé segmenty a dle návrhu se upravily. Plný deformační člen z aramidových segmentů váží přibližně 0,416 kg. V případě příčně odlehčeného deformačního členu (varianta 2) se vyvrtaly díry dostatečně dlouhým vrtákem „skrz na skrz“. Hmotnost se snížila pouze o 2 gramy. Vzhledem k úběru materiálu je odlehčení zanedbatelné a pravděpodobně způsobené napadáním částí odvrtávaných děr dovnitř struktury. Vyššímu odlehčení by napomohli větší díry. V tomto případě by snáze odvrtávaný materiál odcházel mimo útroby voštiny. V případě odlehčení podélného (varianta 3) se nejprve z obou stran dle šablony nakreslil obrys otvoru, ten se z obou stran vyřízl přímočarou pilou a všechny segmenty se následně odmastily a slepily. Hmotnost se zredukovala na 0,332 kg.

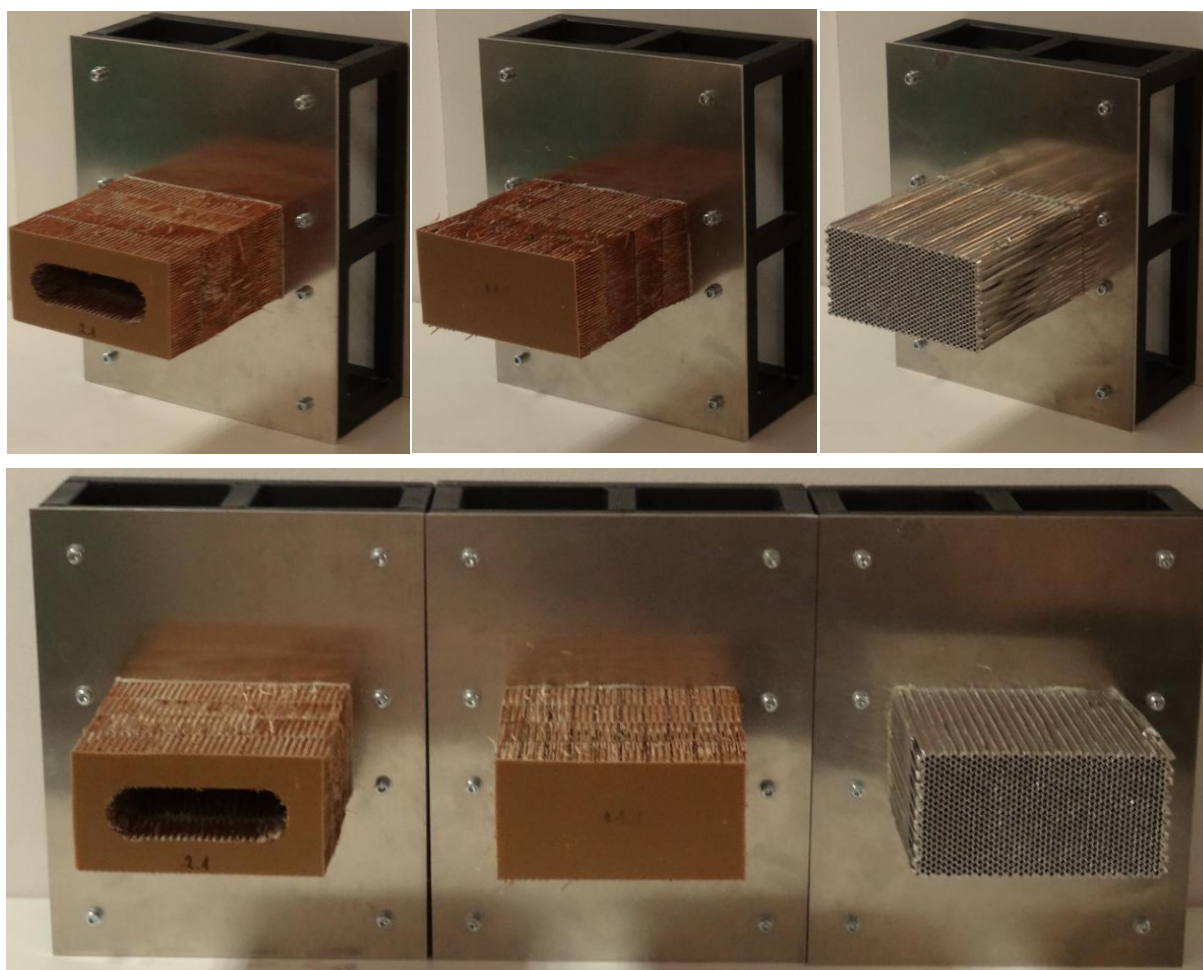


Obrázek 45 - Aramidový deformační člen - lepení

K přípravku se deska přišroubovala pomocí osmi šroubů. Na hliníkovou desku se odměřila poloha deformačního členu, ohraničila se papírovou lepenkou a v místě deformačního členu se odmastil a zdrsnil povrch bezpečnostní přepážky. Dále se nanasla tenká vrstva dvousložkového epoxidového lepidla Loctite EA 9466. Sestava se nechala vytvrdit 24 hodin.



Obrázek 46 - Sestava - lepení



Obrázek 47 - Sestava - deformační členy

6. Dynamická zkouška deformačního členu

Všechny tři varianty, které byly navrženy a dvě simulovány, se podrobily dynamickému, pádovému testu. Test se provedl v laboratoři KTG s.r.o. Tamější zkušebna disponuje pádovým zařízením. Vysoká věž umožňuje pád tělesa na objekt až z šestnácti metrové výšky.

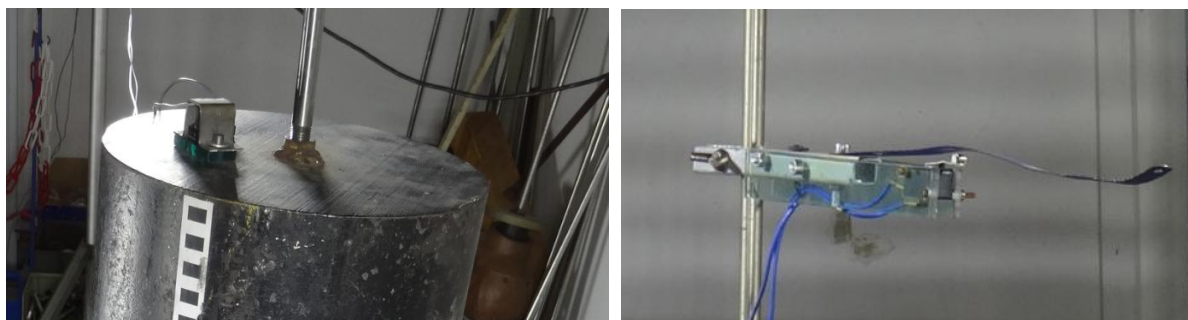
$$v = gt \quad \rightarrow \quad t = \frac{v}{g}$$
$$y = \frac{1}{2} \cdot g \cdot t^2 = \frac{1}{2} \cdot g \cdot \left(\frac{v}{g}\right)^2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{v^2}{g} = \frac{1}{2} \cdot \frac{8,37^2}{9,81} = 3,57 \text{ m}$$

Pro účely deformačního členu postačí výška 3,57 m. Jako deformační objekt se použil ocelový válec o hmotnosti 210 kg. Sestava deformačního členu se pomocí dvou upínek připevnila k relativně tuhé podložce. Kolem sestavy se připravila konstrukce sloužící k omezení pohybu deformujícího válce po pádu.

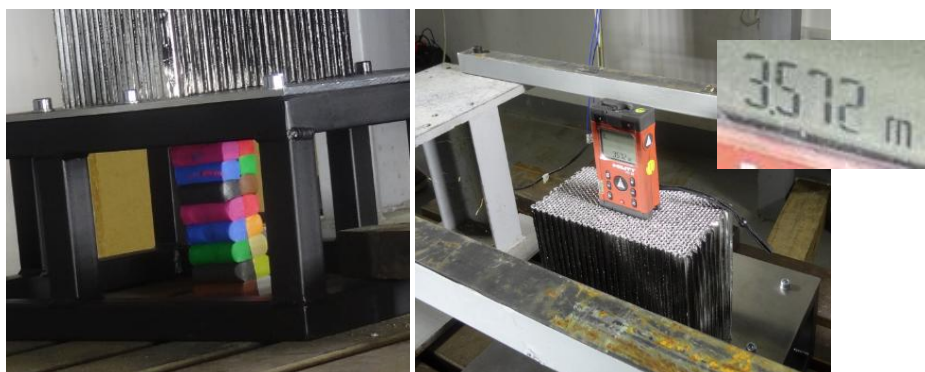


Obrázek 48 - Dynamická zkouška - příprava

Veškeré údaje se zjišťují pomocí vysokorychlostní kamery a dvou nezávislých akcelerometrů. Spolu s kamerou byl použit přístroj zvaný trigger, který kameru těsně před střetem válce s deformačním členem, aktivoval. Triaxial IEPE accelerometer Bruel Kjaer Type 4504A 750g byl použit pro snímání zpomalení válce. Akcelerometry se připevnily na horní plochu válce. Vlastním snímacím prvkem také byla dětská plastelína. Díky ní je možné po testu přibližně změřit maximální deformaci ochranné přepážky, která poslouží jako kontrolní parametr v simulaci. Počáteční výška padajícího válce byla odměřena laserovým měřičem.

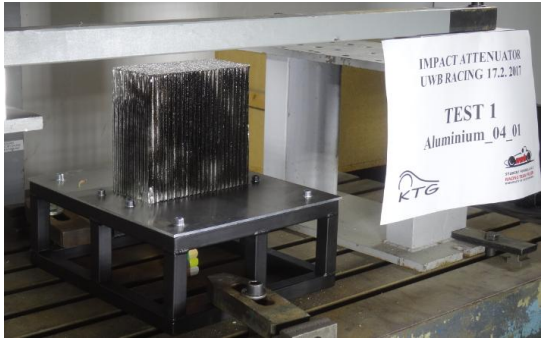
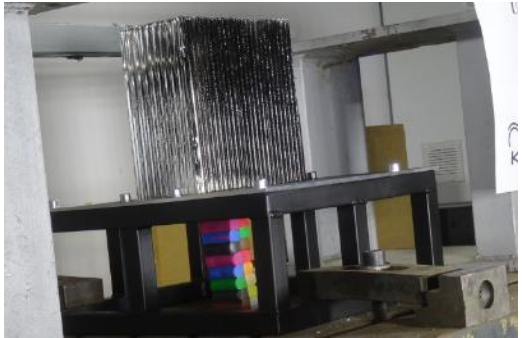


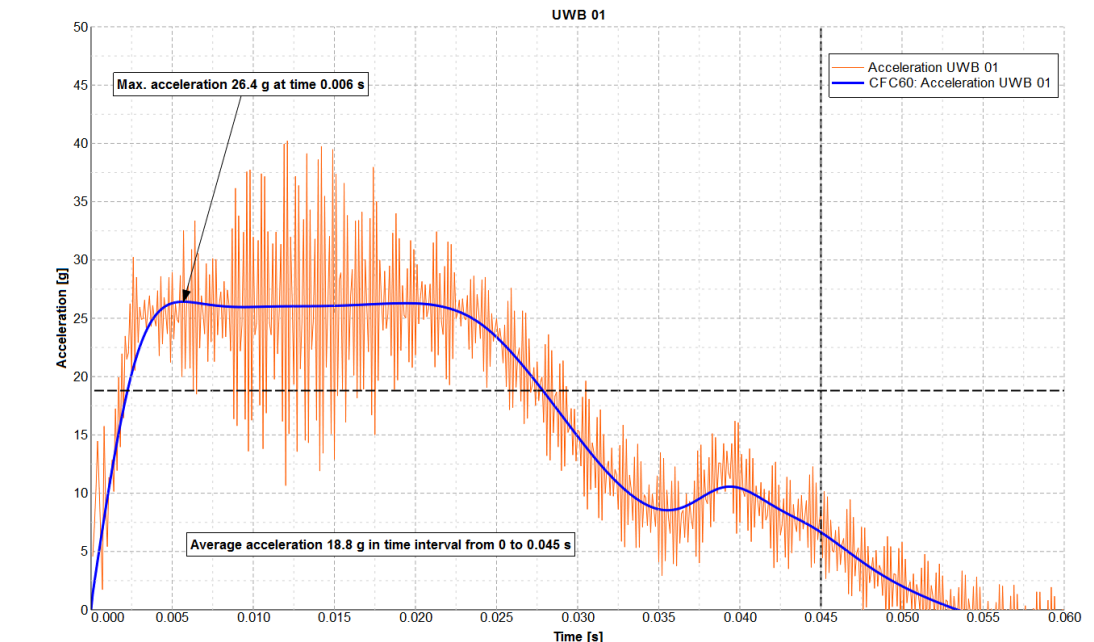


Obrázek 49 - Dynamická zkouška - měřicí prvky - akcelerometr a trigger



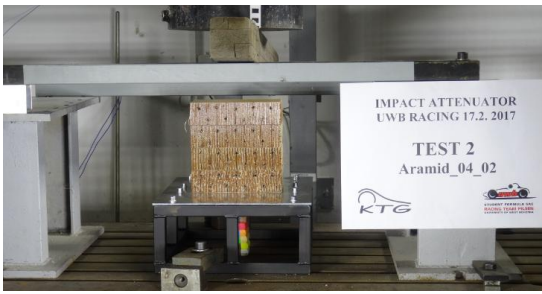



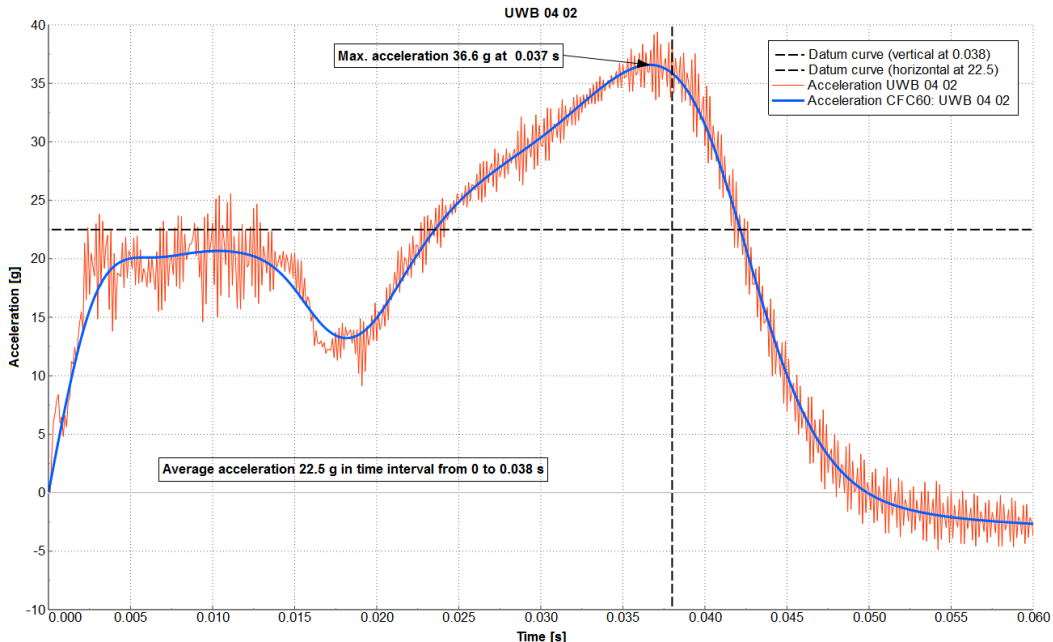
Obrázek 50 - Dynamická zkouška - měřicí prvky - dětská plastelína a laserový měřič vzdálenosti

Hliníkový deformační člen se nasprejoval černou barvou kvůli odlesku na kameře a fotografiích. Po důkladné přípravě vystoupal padající válec do určené výšky, došlo k jeho odjištění a pustil se na sestavu.

V1	Hliníkový deformační člen	
Před deformací		
Po deformaci		
Graf zrychlení (zpomalení)	 <p style="text-align: center;">UWB 01</p> <p>Max. acceleration 26.4 g at time 0.006 s</p> <p>Average acceleration 18.8 g in time interval from 0 to 0.045 s</p> <p>Acceleration [g]</p> <p>Time [s]</p> <p>— Acceleration UWB 01 — CFC60: Acceleration UWB 01</p>	

Tabulka 17 - Experiment - Varianta 1

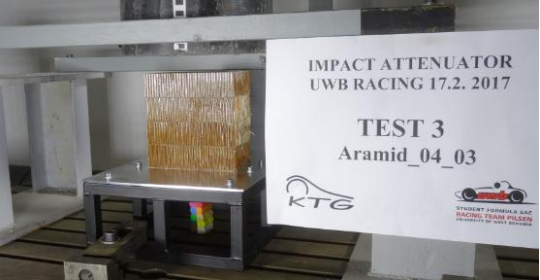
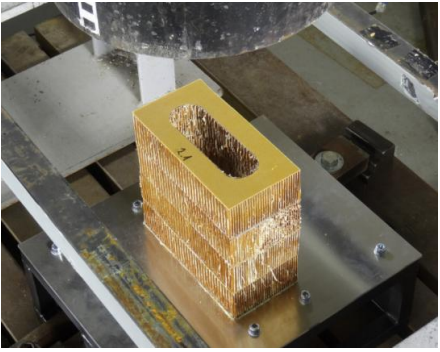


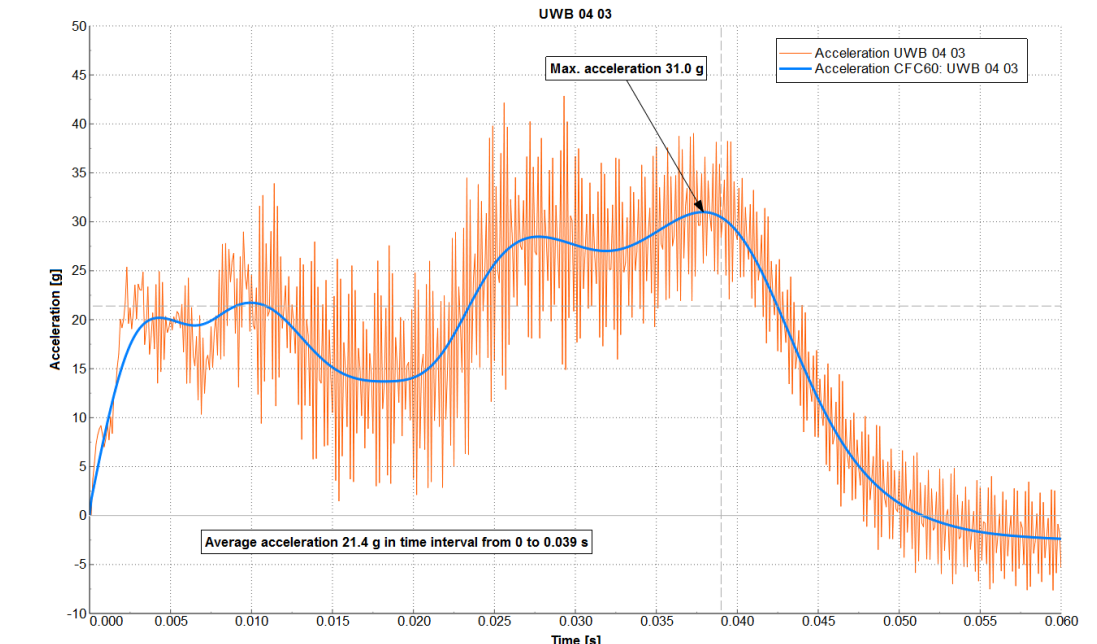
Před pádem tělesa došlo k odpojení triggeru a vysokorychlostní kamera nezachytila deformaci prvního deformačního členu. Po zkoušce lze z vizuálního hlediska konstatovat, že se hliníková voština pravidelně deformovala obdobným způsobem, jako vzorky u statické zkoušky tlakem. Z obrázku je dále v určité části patrné odchylení vrchní zdeformované části od osy směru pádu. S ohledem na průběh zkoušky u dalších variant, kde se podařilo video pořídít, lze předpokládat, že během pádu válce došlo k jeho mírnému natočení. To mohlo být impulsem k odchylení vrchní části zdeformovaného členu od osy směru pádu.

V2	Aramidový deformační člen – s příčným odlehčením	
Před deformací		
Po deformaci		
Graf zrychlení (zpomalení)		

Tabulka 18 - Experiment - Varianta 2

U této varianty se již podařilo zachytit kamerou průběh deformace. Ve chvíli prvního dotyku válce se sestavou je patrné, že horní plocha deformačního členu není rovnoběžná se spodní plochou ocelového válce. Válec se nejprve dotkne defočlenu na pravé straně, tím se člen okamžitě natočí a rovnoběžnost nastává. Natočení je následkem průhybu hliníkové přepážky a mírné deformace vrchního deformačního členu na pravé straně. Následně se začíná deformovat hlavní část – deformační člen. Nejprve se deformuje čtvrtý, myšleno shora, nejspodnější díl. Současně se narušuje struktura prvního segmentu a částečně se také

deformuje. Následuje třetí díl, na němž je patrné započítí deformace nejdříve na pravé straně. Zmíněné odpovídá první vlně patrné z grafu. Pokles přetížení je způsoben narušením tří segmentů a jejich pouhým stlačováním. Jako poslední přichází řada také na díl od shora druhý. Ten zpočátku klade odpor a přetížení narůstá. Všechny segmenty se na závěr stlačují na maximální hodnotu a tento děj doprovází viditelný průhyb ochranné přepážky na maximální hodnotu. Tento jev charakterizuje druhá vlna, nejvyšší špička na grafu. V další fázi válec mění směr pohybu a oddaluje se směrem od sestavy. Jednotlivé segmenty se chvíli vracejí s válcem, což je způsobeno určitým podílem elastické deformace, a následně už pokračuje samotný ocelový válec. V poslední fázi se válec natáčí, dopadá nakloněný znovu na defočen, čímž narušuje vrchní plochu, a odskakuje ke straně.

V3	Aramidový deformační člen – s podélným odlehčením	
Před deformací		
Po deformaci		
Graf zrychlení (zpomalení)		

Tabulka 19 - Experiment - Varianta 3

Posledním testovaným členem byl s nejméně výrazným podélným odlehčením. V době dotyku válce a defočlenu jsou na pohled stykové plochy téměř rovnoběžné. Prvním deformujícím se prvkem je stejně jako u předchozí varianty ochranná přepážka. Poté se začíná bortit první segment defočlenu s největším otvorem. Tato fáze odpovídá prvnímu vrcholu grafu. Zpomalení mírně klesne a opět začne narůstat. Následuje druhý a téměř ve stejnou chvíli také třetí segment přesně tak, jak se při návrhu postupně se zmenšujících otvorů

předpokládalo. Vlivem krátké prodlevy mezi počátkem deformací druhého a třetího segmentu dochází k většímu snížení přetížení. Čtvrtý, poslední segment se začíná bortit jako poslední. Tento segment není odlehčený a to je důvodem většího nárůstu přetížení, odpovídající třetímu vrcholu na grafu. Poslednímu vrcholu křivky odpovídá doba, kdy jsou všechny segmenty stlačeny a kdy se prohýbá přepážka. Ocelový válec smáčkne všechny čtyři segmenty na maximum, následně dochází k odrazu válce a pohybu směrem nahoru. Po krátké prodlevě podruhé dopadne znovu na deformační člen, nyní však dopadá v nakloněné poloze.

	Podmínka	Varianta 1	Varianta 2	Varianta 3
Absorbovaná energie [J]	≥ 7350	7353	7353	7353
Maximální zrychlení [g]	≤ 40	26,4	36,6	31,0
Průměrné zrychlení [g]	≤ 20	18,8	22,5	21,4
Trvalý průhyb [mm]	≤ 25	8	8	9
Max. průhyb [mm]	X	17	19	16

Tabulka 20 - Výsledky dynamické zkoušky

Průměrné zpomalení bylo vyhodnocováno u každé varianty z jiného intervalu času. Interval se uvažuje od počátku nárazu do chvíle, kdy dosáhne rychlost ocelového válce, která je odvozená ze snímaného zrychlení, nulové hodnoty. Na základě těchto intervalů nevyhovují varianty 2 a 3 podmínce průměrného zpomalení. Ostatní podmínky a u hliníkového i podmínka průměrného zpomalení jsou splněny.

Celý report z laboratoře pro každou variantu viz příloha č. 3

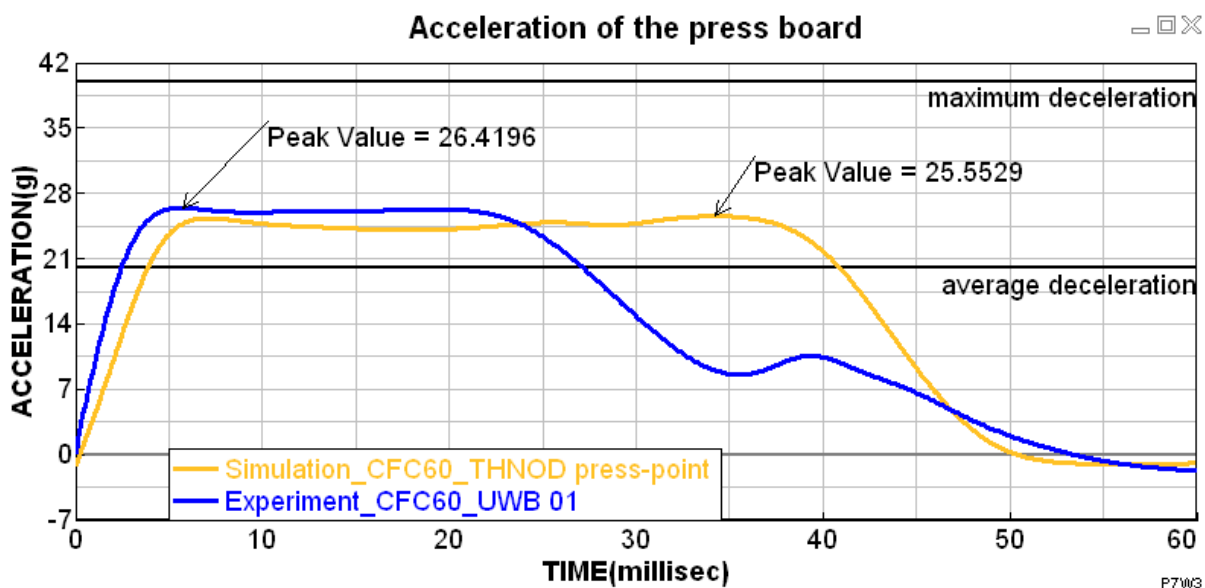
7. Porovnání simulace a experimentu

Výsledky experimentální zkoušky vyhodnotili tamější pracovníci z hodnot naměřených pomocí akcelerometru a záznamu z kamery. Akcelerometr snímá zpomalení ocelového válce, a proto bude právě zpomalení hlavní srovnávanou veličinou. Další sledovanou veličinou bude trvalá deformace ochranné přepážky, která byla po testu spočtena jako rozdíl původní a současné vzdálenosti mezi přepážkou a spodní rovinou přípravku ležícím na podlaze. V neposlední řadě lze sledovat maximální průhyb ochranné přepážky. V simulaci se vykreslí celý průběh průhybu přepážky v závislosti na čase a v experimentu se maximální hodnota přibližně změřila plastelínou.

7.1 Hliníkový deformační člen

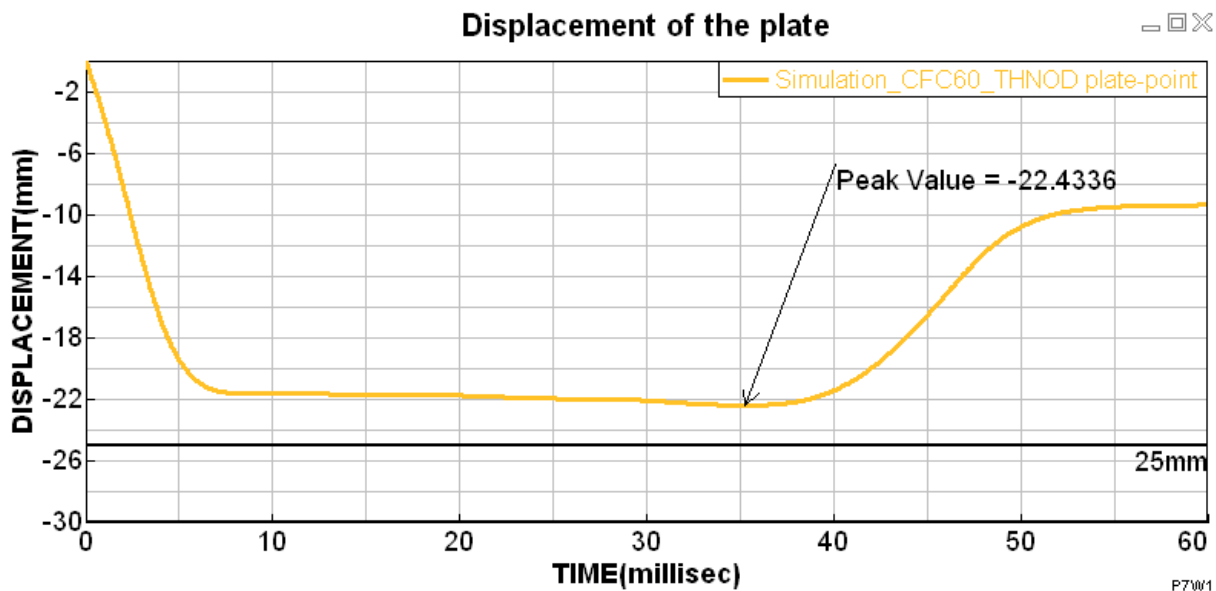
Vzhledem k nepořizení videa u této varianty není možné vizuálně porovnat simulaci a experiment.

Následující graf zobrazuje rozdílný průběh zpomalení ocelového válce mezi experimentem a simulací. Experiment charakterizuje modrá křivka a žlutá křivka charakterizuje průběh zrychlení v simulaci. V první fázi, fázi náběhu zpomalení, je patrná vyšší směrnice. Fáze náběhu odpovídá dle simulace k postupnému prohýbání ochranné přepážky a současně ke stlačení deformačního členu. Kontaktní síla mezi válcem a deformačním členem narůstá až do chvíle, kdy se vyčerpá pevnost voštiny a přichází fáze její deformace. Deformace voštiny probíhá přibližně od 5. ms. Zde se simulace od experimentu výrazně rozchází. U experimentu dochází k poklesu přetížení výrazně dříve. Deformační člen po testu svým tvarem naznačuje, že během deformace došlo v určitou chvíli ke kolapsu struktury, následnému vybočení (smýknutí do strany) a vlivem nejednoznačného osového namáhání došlo k výraznému poklesu přetížení. Po krátkém časovém intervalu se materiál opět vzpříčí a znovu dochází k deformaci. Případně se materiál mohl vyčerpat a poslední lokální špička byla způsobena pojmáním zbytku energie hliníkovou přepážkou.



Graf 14 - Porovnání simulace a experimentu - hliníkový materiál - zrychlení (zpomalení)

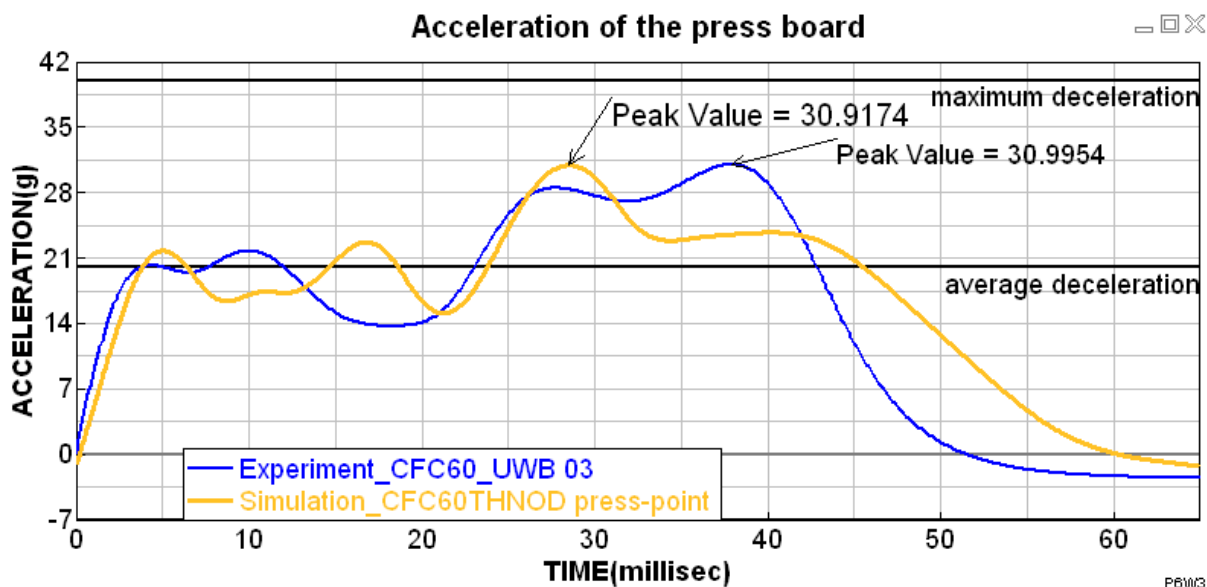
Graf závislosti průhybu ochranné přepážky na čase potvrzuje předchozí tvrzení. V prvních 5 ms se přepážka prohýbá do oblasti své maximální deformace. Po dobu deformace deformačního členu se průhyb nepatrně zvyšuje. Drobné výkmity jsou odfiltrovány. Po odlehčení sestavy deformace přepážky vlivem určitého podílu elastické deformace odeznívá a ustálí se na konečné hodnotě odpovídající podílu deformace plastické. Ustálená hodnota činí 9,4 mm.



Graf 15 - Porovnání simulace a experimentu - hliníkový materiál - průhyb ochranné přepážky

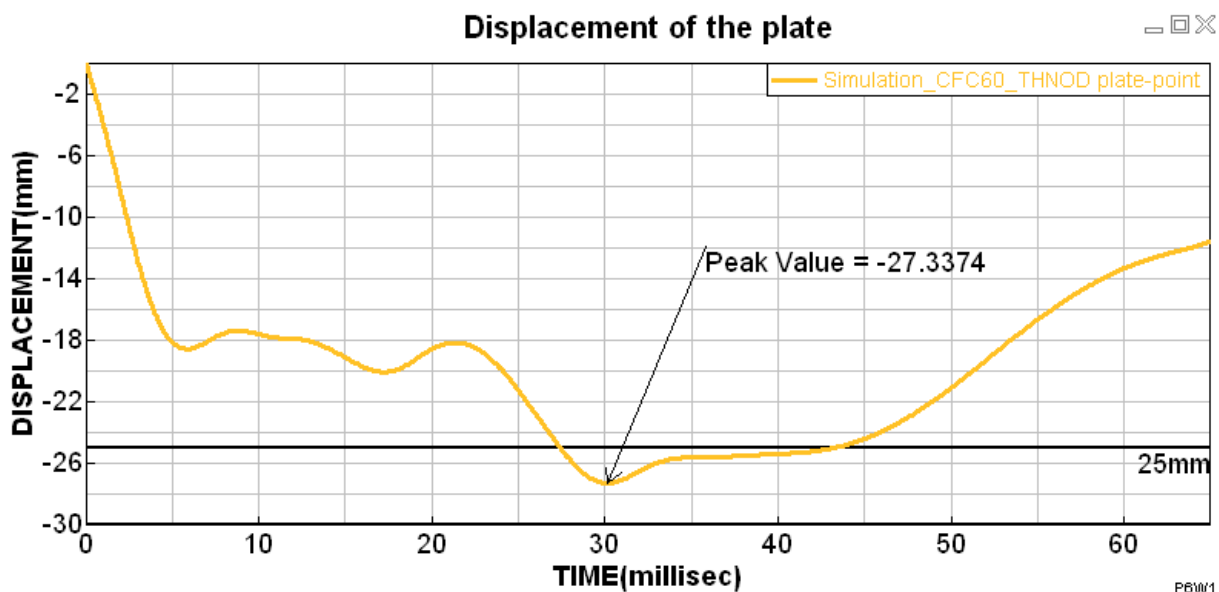
7.2 Aramidový deformační člen

Na následujícím grafu je opět modrou barvou zvýrazněna křivka zpomalení experimentu a žlutá křivka charakterizuje zpomalení simulované zkoušky. První fáze náběhu zpomalení má podobnou směrnici. Náběh stejně jako u předchozího odpovídá prohýbání ochranné přepážky do chvíle, než se začne bortit první segment od shora. Tomuto odpovídá stejně jako u experimentu i simulace. Na první segment oproti experimentu velmi spojitě navazuje i druhý segment. V tuto chvíli dochází k výrazné odchylce mezi simulací a experimentem. Tím, jak druhý segment navazuje na první, nezačne se zvyšovat přetížení a pouze se udržuje na přibližně stejné hodnotě. U experimentu klade druhý segment odpor a před deformací se zvýší přetížení. Během toho, kdy se u experimentu bortí druhý i třetí segment současně, v simulaci dochází k nárůstu přetížení vlivem odporu třetího segmentu. Společně se opět simulace i experiment schází v podobnou chvíli ve fázi, kdy se stlačují tři zborčené segmenty, čtvrtý neodlehčený segment klade odpor proti deformaci. V obou případech se na předposledním vrcholu začne deformovat čtvrtý segment a po stlačení deformačního členu přechází část energie opět do ochranné přepážky. Tato fáze se opět odlišuje, což už je ale způsobeno vlivem předchozích mírně odlišných jevů. Nelze tak závěrečné odchylky objektivně posoudit.



Graf 16 - Porovnání simulace a experimentu - aramidový materiál - zrychlení (zpomalení)

Křivka průhybu ochranné přepážky začíná stejně jako je tomu u hliníkového deformačního členu. Neodlehčený čtvrtý segment klade největší odpor, jak již bylo zmíněno v předchozím odstavci. Tento fakt potvrzuje výrazně zvýšený průhyb ochranné přepážky právě ve chvíli deformace čtvrtého segmentu. Posléze dochází k odlehčení a elastická deformace přepážky se vrací. Trvalá deformace činí 11,8 mm.



Graf 17 - Porovnání simulace a experimentu - aramidový materiál - průhyb ochranné přepážky

7.3 Shrnutí

V následující tabulce jsou porovnané zásadní parametry experimentu a simulace s ohledem na podmínky stanovené pravidly.

	Podmínka	Hliníkový		Aramidový	
		Simulace	Experiment	Simulace	Experiment
Maximální zrychlení [g]	≤ 40	25,6	26,4	30,9	31,0
Průměrné zrychlení [g]	≤ 20	23,0	18,8	20,8	21,4
Trvalý průhyb [mm]	≤ 25	9,4	8	11,8	9
Max. průhyb [mm]	X	22,4	17	27,3	16

Tabulka 21 - Porovnání simulace a experimentu - výsledné hodnoty

Rozdíly mezi simulací a skutečnou zkouškou mohou být způsobeny mnohým. V první řadě by bylo vhodné provést experiment vícekrát. Vyloučily by se tak náhodné jevy, které se mohly projevit pouze u jednoho vzorku a u jiného k tomuto jevu dojít nemuselo. Bohužel není dostatek materiálu na dostatečné množství vzorků. V útrokách voštiny může určitou roli sehrát vzduch, který musí při deformaci uniknout ven. Celková konstrukce sestavy není ideálně symetrická. Padající válec také nemusí být zachycen v přesném středu. Válec se při letu může mírně vychýlit a už působí na sestavu mírně jiným způsobem než v ideálním případě. Obecně lze říci, že v simulaci jsou daleko přísnější okrajové podmínky než ve skutečnosti. Veškeré zmíněné odlišnosti se mohou sečíst a dohromady hrát výraznější roli v odchylkách. Změnou některého atributu a přiblížením simulace experimentu můžeme pouze kompenzovat jiný jev, což by mohlo být zároveň i na škodu. Zpřesnění simulace lze docílit především větším množstvím snímaných, měřených a sledovaných veličin během experimentu a kontrolovat pak simulaci pomocí většího množství známých parametrů.

Závěr

Diplomová práce se zabývá kompletním návrhem deformačního členu pro Formulí Student, vůz UWB04 plzeňského závodního týmu. Celý návrh se řídil několika základními obecnými požadavky. Důraz je kladen především na hmotnost sestavy deformačního členu, dostupnost a cenu za materiál, obtížnost výroby a specifické požadavky kladené organizací FSAE.

Po prozkoumání různých možností, z čeho deformační člen vyrobit, jak ho je možné připevnit a co všechno smí a nesmí obsahovat, se vybraly dva druhy materiálů, které nejlépe splnily představy a stanovené požadavky. Prvním materiálem je hliníková voština s označením PAMG-XR1-5.73/16-P-5052 a druhým materiálem je voština aramidová s označením Cormaster C1-3,2-80. Dodavatel k materiálům poskytuje pouze základní vlastnosti v hlavním směru. Materiálový model použitý v numerické simulaci pro vybrané materiály vyžaduje podrobnější popis mechanický vlastností, a proto bylo nezbytné udělat statické zkoušky vzorků. Nezbytnou součástí smykové zkoušky je přípravek, jehož návrh je inspirován normou ASTM C-273. Statické vlastnosti obdržené z tlakové zkoušky a zkoušky smykem se použily pro definici materiálů a pro kontrolu byly vytvořeny simulace statických zkoušek. Pomocí simulací bylo možné zároveň nalézt síly a deformace odpovídající porušení materiálu. Na základě zjištěných vlastností bylo možné navrhnout varianty samotných deformačních členů. Hliníkový člen je první varianta a na další dvě různě odlehčené varianty je použita aramidová voština. S ohledem na hmotnost, ohybovou tuhost a jednoduchou montáž se navrhla ochranná přepážka společně se způsobem jejího připevnění k rámu. Následoval návrh přípravku a držáků, ke kterým přišroubuje ochranná přepážka s deformačním členem.

Model celé sestavy i zjednodušený model pro simulaci byl vytvořen v softwaru Siemens NX 11. Numerická simulace pádové dynamické zkoušky dvou vybraných variant byla provedena v softwaru VPS (PAM CRASH). Sledovanými veličinami v simulaci jsou parametry, které musí deformační člen při pádové zkoušce splnit. Jedná se o maximální a průměrné zpomalení, maximální průhyb ochranné přepážky a celková energie, kterou sestava absorbuje. Všechny tři varianty deformačních členů byly vyrobeny, spojeny s ochrannou přepážkou a společně s ní přišroubovány k přípravkům. Sestavy se postupně podrobily dynamickému pádovému testu. Ve všech požadavcích vyhověla varianta s hliníkovou voštinou. Zbylé dvě varianty nevyhověly jednomu požadavku, a sice nejvyššímu průměrnému zpomalení, jež nesmí přesáhnout přetížení 20g. Ostatní parametry splnily i dvě varianty s aramidovým deformačním členem.

Vůz nesoucí název UWB04 bude disponovat deformačním členem z hliníkové voštiny. Deformační člen o rozměrech 200x200x100mm váží přibližně 400g, absorbuje energii o velikosti 7353J, maximální zpomalení dosahuje hodnoty 26,4g a průměrné zpomalení dosahuje hodnoty 18,8g. Trvalý průhyb ochranné přepážky je 8mm. Člen je přilepen k hliníkové ochranné přepážce a společně s ní přišroubován k rámu vozidla pomocí osmi šroubů. Deformační člen bude schovaný pod kapotou, která dodá autu tvář.

Použitá literatura

- [1] ESI GROUP. *VPS 2016 Solver reference manual*. ESI Group, 2016.
- [2] VLK, F. *Stavba motorových vozidel*. Brno: Nakladatelství Vlk, 2016.
- [3] MALEN, D. E. *Fundamentals of Automobile Body Structure Design*. Hardbound: SAE International, 2011.
- [4] HOSNEDL, S., KRÁTKÝ, J. *Příručka strojího inženýra 1*. Praha: Computer press, 1999.
- [5] LEINVEBER, J., VÁVRA, P. *Strojnické tabulky*. Úvaly: Albra, 2003.
- [6] YONG, T., MINGJI, CH. *Strain Rate Effect on Mechanical Behavior of Metallic Honeycombs Under Out-of-Plane Dynamic Compression*.
https://www.researchgate.net/publication/273109924_Strain_Rate_Effect_on_Mechanical_Behavior_of_Metallic_Honeycombs_Under_Out-of-Plane_Dynamic_Compression#pf2. Journal of Applied Mechanics, 2015.
- [7] BORIA, S., *Behaviour of an Impact Attenuator for Formula SAE Car under Dynamic Loading*. Int. J. Vehicle Structures & Systems, 2010.
- [8] SAE International. *2017 – 2018 Formula SAE Rules*.
<http://www.fsaeonline.com/content/2017-18%20FSAE%20Rules%209.2.16a.pdf>
- [9] <http://auto.idnes.cz/>
- [10] <http://www.autobeky.cz>
- [11] <https://www.cad.cz/strojirenstvi>
- [12] <http://davidlaw.com>
- [13] <https://www.kasa.cz>
- [14] <http://autoperiskop.cz>
- [15] <http://f1news.autoroad.cz>
- [16] <http://www.racerpartswholesale.com>
- [17] <http://srtech.cz>
- [18] <http://www.formulaelectric.be>
- [19] <http://www.fyzika007.cz/mechanika/mechanicka-prace>
- [20] <http://hexalu.com/hexalu>
- [21] <https://www.asb.sk>

Seznam obrázků

Obrázek 1 - Prvky aktivní bezpečnosti.....	4
Obrázek 2 - Prvky pasivní bezpečnosti.....	4
Obrázek 3 - Bezpečnostní prvky F1.....	5
Obrázek 4 - Podmínka použití výztuhy.....	9
Obrázek 5 - 3D model pro simulaci dynamické zkoušky.....	10
Obrázek 6 - Deformovaný stav sestavy.....	11
Obrázek 7 - Deformační členy TU Brno racing.....	12
Obrázek 8 - Deformační člen – CTU CarTech.....	12
Obrázek 9 - Vývoj deformačních členů UWB Racing team Pilsen.....	13
Obrázek 10 - Integrovaný deformační člen - strukturální nos.....	13
Obrázek 11 - Deformační členy z plechů.....	14
Obrázek 12 - Hliníková pěna.....	14
Obrázek 13 - Hliníková voština.....	15
Obrázek 14 - Aramidová voština.....	15
Obrázek 15 - Zwick/Roell Z250, Struktura voštiny.....	16
Obrázek 16 - Obecný průběh napětí - označení veličin.....	21
Obrázek 17 - Struktura materiálu vzorků pro všechny směry smykové zkoušky.....	22
Obrázek 18 - Vzorky pro smykovou zkoušku.....	22
Obrázek 19 - Přípravek dle normy ASTM C-273.....	23
Obrázek 20 - Model přípravku pro smykovou zkoušku.....	23
Obrázek 21 - Výroba přípravku pro smykovou zkoušku.....	24
Obrázek 22 - Příprava přípravku pro smykovou zkoušku.....	25
Obrázek 23 - Obecný průběh smykového napětí - označení veličin.....	28
Obrázek 24 - Modely vzorků.....	29
Obrázek 25 - Vztah pro práci (energii).....	32
Obrázek 26 - Návrh deformačního členu - materiál hliníkový - Varianta 1.....	32
Obrázek 27 - Návrh deformačního členu – materiál aramidový - Varianta 2.....	34
Obrázek 28 - Návrh deformačního členu – materiál aramidový - Varianta 3.....	34
Obrázek 29 - Přední část rámu, rozměry a profil přední části rámu.....	37
Obrázek 30 - Vzdálenost osy díry od hrany rámu.....	38
Obrázek 31 - Přípravek - rozmístění držáků.....	38
Obrázek 32 - Přípravek - držáky.....	39
Obrázek 33 - Přípravek.....	39
Obrázek 34 - Sestava pro dynamickou zkoušku - tři varianty.....	39
Obrázek 35 - Strain rate - Cowper-Symonds model.....	41
Obrázek 36 - Strain rate - popis více křivkami napětí-deformace.....	41
Obrázek 37 - Dva přístupy k modelování deformačního členu, model sestavy.....	42
Obrázek 38 - Segment aramidového deformačního členu.....	43
Obrázek 39 - Síť - přípravek.....	43
Obrázek 40 - Síť - držáky.....	43
Obrázek 41 - Síť - sestava.....	44
Obrázek 42 - Síť - segment aramidového deformačního členu.....	44
Obrázek 43 - Síť - detail.....	45
Obrázek 44 - Okrajové podmínky.....	46
Obrázek 45 - Aramidový deformační člen - lepení.....	52
Obrázek 46 - Sestava - lepení.....	53
Obrázek 47 - Sestava - deformační členy.....	53
Obrázek 48 - Dynamická zkouška - příprava.....	54
Obrázek 49 - Dynamická zkouška - měřicí prvky - akcelerometr a trigger.....	55
Obrázek 50 - Dynamická zkouška - měřicí prvky - dětská plastelína a laserový měřič vzdálenosti.....	55

Seznam tabulek

Tabulka 1 - Průběh tlakové zkoušky – materiál hliníkový	17
Tabulka 2 - Tabulka 1 - Průběh tlakové zkoušky – materiál aramidový	19
Tabulka 3 - Vypočtené hodnoty - směr T - materiál hliníkový	21
Tabulka 4 - Průběh smykové zkoušky - materiál hliníkový	26
Tabulka 5 - Průběh smykové zkoušky - materiál aramidový	27
Tabulka 6 - Vypočtené hodnoty - směr T - materiál hliníkový	28
Tabulka 7 - Výsledné materiálové vlastnosti - Hliník	29
Tabulka 8 - Výsledné materiálové vlastnosti - Aramid	29
Tabulka 9 - Výsledné napěťové charakteristiky vzorků - Hliník	30
Tabulka 10 - Výsledné napěťové charakteristiky vzorků - Aramid	31
Tabulka 11 - Ochranná přepážka - mechanické vlastnosti	36
Tabulka 12 - Ochranná přepážka - hmotnost jednotlivých prvků	36
Tabulka 13 - Popis materiálových vlastností – ocel (vlevo) a hliníková slitina (vpravo)	46
Tabulka 14 - Simulace - průběh deformace	48
Tabulka 15 - Simulace - průběh sledovaných veličin - materiál hliníkový	49
Tabulka 16 - Simulace - průběh sledovaných veličin - materiál aramidový	50
Tabulka 17 - Experiment - Varianta 1	56
Tabulka 18 - Experiment - Varianta 2	57
Tabulka 19 - Experiment - Varianta 3	59
Tabulka 20 - Výsledky dynamické zkoušky	60
Tabulka 21 - Porovnání simulace a experimentu - výsledné hodnoty	64

Seznam grafů

Graf 1 - Napěťové charakteristiky materiálu Impaxx foam	9
Graf 2 - Napěťové char. materiálu Impaxx, PUR a PP	9
Graf 3 - Materiálové vlastnosti - pěna	10
Graf 4 - Materiálové vlastnosti - přepážka, rám	10
Graf 5 - Průběh energií součástí sestavy	11
Graf 6 - Průběh zrychlení desky lisu a průhybu výztuhy rámu	11
Graf 7 - Průběh napětí vzorků v různých směrech - materiál hliníkový	18
Graf 8 - Průběh napětí vzorků v různých směrech - materiál aramidový	20
Graf 9 - Doba vytvrzení lepidla v závislosti na teplotě okolí	24
Graf 10 – Průběh smykových napětí jednotlivých vzorků - materiál aramidový	26
Graf 11 - Průběh smykových napětí jednotlivých vzorků - materiál aramidový	27
Graf 12 - Materiálové vlastnosti - ocel S235 a EA AW 7075 T6	47
Graf 13 - Průměrné zpomalení ocelového válce	51
Graf 14 - Porovnání simulace a experimentu - hliníkový materiál - zrychlení (zpomalení)	61
Graf 15 - Porovnání simulace a experimentu - hliníkový materiál - průhyb ochranné přepážky	62
Graf 16 - Porovnání simulace a experimentu - aramidový materiál - zrychlení (zpomalení)	63
Graf 17 - Porovnání simulace a experimentu - aramidový materiál - průhyb ochranné přepážky	63

Seznam příloh

Příloha č. 1 - ASTM C-273
Příloha č. 2 - Technický list lepidla Loctite EA 9466
Příloha č. 3 - Technický report z laboratoře - Experiment
Příloha č. 4 – Data report deformačního členu

PŘÍLOHA č. 1

ASTM C-273



Standard Test Method for Shear Properties of Sandwich Core Materials¹

This standard is issued under the fixed designation C 273; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon (ϵ) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

This standard has been approved for use by agencies of the Department of Defense.

^{ε1} NOTE—In 5.3, the value 6 000 000 lb-in.²/in. was editorially corrected to 600 000 lb-in.²/in. in July 2000.

1. Scope

1.1 This test method covers the determination of shear properties of sandwich construction core materials associated with shear distortion of planes parallel to the facings. It covers the determination of shear strength parallel to the plane of the sandwich, and the shear modulus associated with strains in a plane normal to the facings. The test may be conducted on core materials bonded directly to the loading plates or the sandwich facings bonded to the plates.

1.2 The values stated in SI units are to be regarded as the standard. The inch-pound units given may be approximate.

1.3 *This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.*

2. Referenced Documents

2.1 ASTM Standards:

C 393 Test Method for Flexural Properties of Flat Sandwich Constructions²

C 394 Test Method for Shear Fatigue of Sandwich Core Materials²

E 4 Practices for Force Verification of Testing Machines³

3. Significance and Use

3.1 The core shear properties are fundamental properties that are used in the design of sandwich panels. This test method provides information on the load-deflection behavior of sandwich constructions or cores when loaded in shear parallel to the plane of the facings. From a complete load-deflection curve, it is possible to compute core shear stress at any load (such as the

shear stress at proportional limit, at yield, or at maximum load) and to compute an effective core shear modulus.

3.2 The test does not produce pure shear, but the specimen length is prescribed so that secondary stresses have a minimum effect. Approximate shear properties can also be obtained from a sandwich flexure test (see Test Method C 393).

3.3 This test method provides a standard method of obtaining sandwich core shear data for quality control, acceptance specification testing, sandwich design, and research and development.

4. Apparatus

4.1 *Test Machine*, capable of maintaining a controlled loading rate and indicating the load with an accuracy of $\pm 1\%$ of the indicated value. The accuracy of the test machine shall be verified in accordance with Practices E 4.

4.2 *Deflectometer, compressometer, or extensometer*, capable of measuring the displacement with a precision of at least $\pm 1\%$.

4.3 *Micrometer, gage, or caliper*, capable of measuring accurately to 0.025 mm (0.001 in.).

5. Test Specimens

5.1 The test specimen shall have a thickness equal to the thickness of the sandwich, a width not less than 50 mm (2 in.), and a length not less than twelve times the thickness, except as agreed upon by the purchaser and the seller.

5.2 Measure the thickness to the nearest 0.025 mm (0.001 in.) and the length and width to the nearest 0.25 mm (0.01 in.). Weigh the specimen to the nearest 0.1 g and calculate the specimen density.

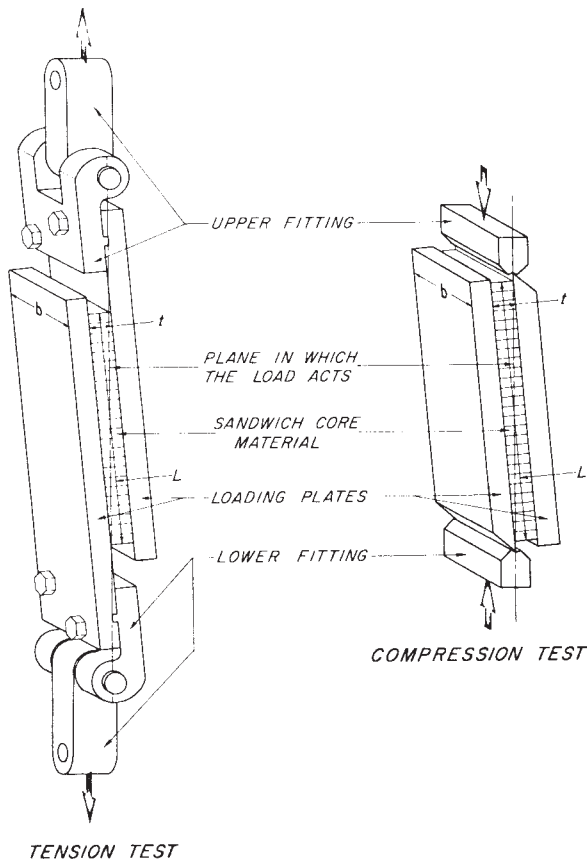
5.3 The test specimen shall be rigidly supported by means of steel plates bonded to the facings (Note 1) as shown in Fig. 1. The thickness of the plates may be varied in accordance with the strength of the sandwich, but the plate length shall be such that the line of action of the direct tensile or compressive force shall pass through the diagonally opposite corners of the sandwich as shown in Fig. 1. A correct line of load action may also be obtained by modifying the core length to thickness ratio provided the requirements in 5.1 are fulfilled. It has been

¹ This test method is under the jurisdiction of ASTM Committee D30 on Composite Materials and is the direct responsibility of Subcommittee D30.09 on Sandwich Construction.

Current edition approved Jan. 10, 2000. Published March 2000. Originally published as C 273 – 51T. Last previous edition C 273 – 94.

² *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 15.03.

³ *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 03.01.



TENSION TEST
FIG. 1 Plate Shear Specimens, Load Line of Action

found that loading plates having a bending stiffness per unit width, $D = EI/b$, not less than $2.67 \text{ MN} \cdot \text{mm}^2/\text{mm}$ width per millimetre of core thickness ($600\,000 \text{ lb-in.}^2/\text{in.}$ per inch of core thickness) have performed satisfactorily.

5.4 If the core material shows directional characteristics with respect to shear strength, separate tests shall be made to obtain shear stresses in each of the principal directions.

NOTE 1—To ensure a core shear failure on some honeycomb cores, two plies of adhesive must be used to bond the honeycomb to the steel plates. This provides deeper adhesive fillets on the honeycomb cell walls.

6. Conditioning

6.1 When the physical properties of the component materials are affected by moisture, bring the test specimens to constant weight ($\pm 1\%$) before testing, preferably in a conditioning room with temperature and humidity control, and make the shear tests, preferably, in a room under the same conditions. A temperature of $23 \pm 3^\circ\text{C}$ ($73 \pm 5^\circ\text{F}$) and a relative humidity of $50 \pm 5\%$ are recommended.

7. Procedure

7.1 Apply the load to the ends of the rigid plates in compression or tension through a spherical bearing block or a universal joint so as to distribute the load uniformly across the width of the specimen (Fig. 2 and Fig. 3). The tensile shear plates can be attached with bolts or pins to the loading fixture. Apply the load at a constant rate of movement of the testing machine cross-head at such a rate that the maximum load will occur within 3 to 6 min (Note 2).

NOTE 2—A suggested rate of cross-head movement is 0.50 mm/min (0.020 in./min).

7.2 The failure mode desired is a 100 % shear failure of the core. Specimens that exhibit cohesive failures of the core-to-plate adhesive or adhesion failures to the core or plates should be rejected. The thickness of the adhesive bond to honeycomb core (adhesive-filled depth into the honeycomb core cells) may affect the core shear strength and modulus values depending on the core thickness.

7.3 Data for load-deflection curves may be used to determine the effective shear modulus of the core material. Measure the relative displacement between the steel plates by means of transducers, compressometers or extensometers. The displacement apparatus can be on the specimen side or on the back, and it shall be as close to the center as possible.

8. Calculation

8.1 Calculate the shear stress as follows:

$$\tau = \frac{P}{Lb} \tag{1}$$

where:

- τ = core shear stress, MPa (psi);
- P = load on specimen, N (lb);
- L = length of specimen, mm (in.); and
- b = width of specimen, mm (in.).

8.2 Obtain the ultimate shear strength using Eq 1 when P equals the maximum load and the shear yield strength where P equals the yield load. For core materials that yield more than 2 % strain, use the 2 % offset method for the yield strength.

8.3 Calculate the shear modulus as follows:

$$G = \frac{St}{Lb} \tag{2}$$

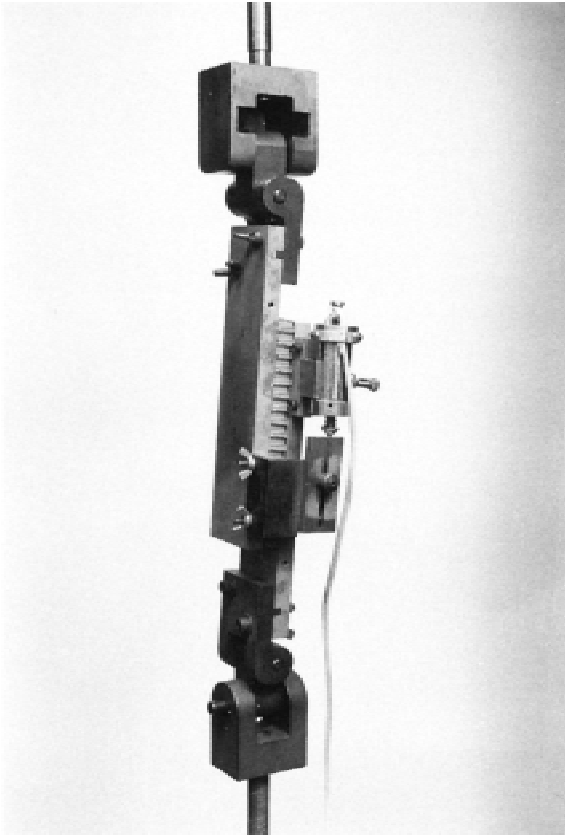
where:

- G = core shear modulus, MPa (psi);
- S = $\Delta P/\Delta u$, slope of initial portion of load-deflection curve, N/mm (lb/in.);
- u = displacement of loading plates; and
- t = thickness of core, mm (in.).

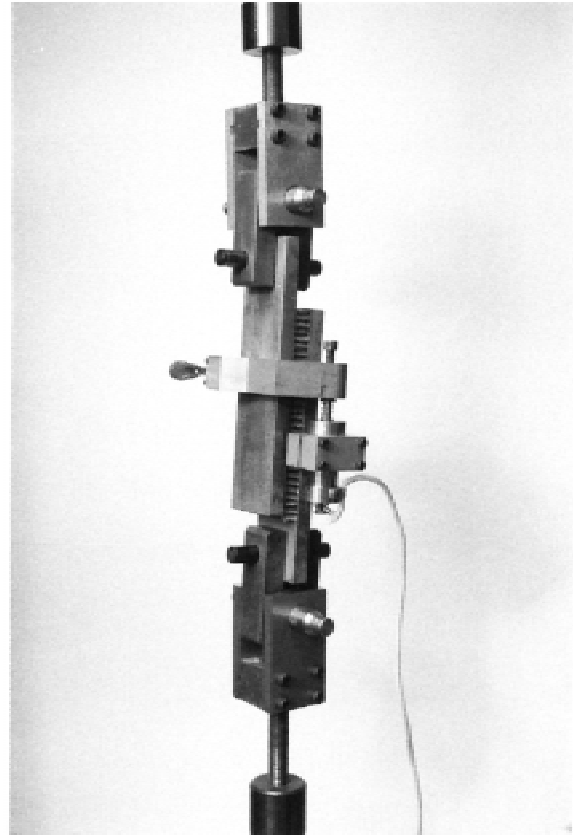
9. Report

9.1 The report shall include the following:

- 9.1.1 Mode of testing; tension or compression,
- 9.1.2 Description of test specimens; core material, facings if used,
- 9.1.3 Dimensions of the test specimens, core orientation,
- 9.1.4 Method of bonding specimen to plates; adhesive, cure cycle, and pressure,
- 9.1.5 Specimens conditioning, if any,
- 9.1.6 Test temperature and specimens time at temperature,
- 9.1.7 Test machine cross-head loading rate,
- 9.1.8 Shear strength; individual values and average,
- 9.1.9 Shear modulus; individual values and average,
- 9.1.10 Load-deflection curves, if required, and
- 9.1.11 Description of failure mode; whether core, adhesive, or bond failure occurred.



(a) Bolted Specimen



(b) Pinned Specimen

FIG. 2 Tensile Plate Shear Tests

10. Precision and Bias

10.1 *Precision*—The precision of the procedure in Test Method C 273 for measuring sandwich core material shear properties is not available.

10.2 *Bias*—Since there is no accepted reference material suitable for determining the bias for the procedures in this test method, bias has not been determined.

11. Keywords

11.1 sandwich core; shear; shear modulus; shear strength

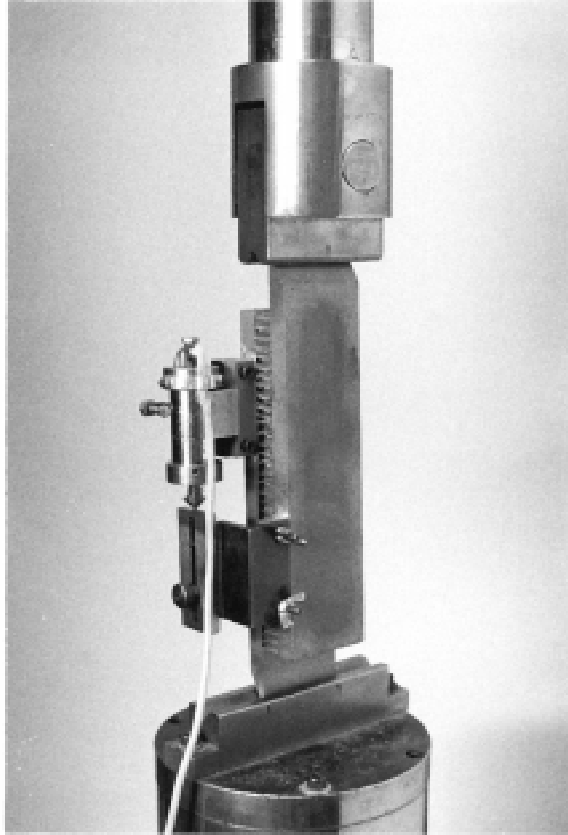


FIG. 3 Compressive Plate Shear Test

ASTM International takes no position respecting the validity of any patent rights asserted in connection with any item mentioned in this standard. Users of this standard are expressly advised that determination of the validity of any such patent rights, and the risk of infringement of such rights, are entirely their own responsibility.

This standard is subject to revision at any time by the responsible technical committee and must be reviewed every five years and if not revised, either reapproved or withdrawn. Your comments are invited either for revision of this standard or for additional standards and should be addressed to ASTM International Headquarters. Your comments will receive careful consideration at a meeting of the responsible technical committee, which you may attend. If you feel that your comments have not received a fair hearing you should make your views known to the ASTM Committee on Standards, at the address shown below.

This standard is copyrighted by ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States. Individual reprints (single or multiple copies) of this standard may be obtained by contacting ASTM at the above address or at 610-832-9585 (phone), 610-832-9555 (fax), or service@astm.org (e-mail); or through the ASTM website (www.astm.org).

PŘÍLOHA č. 2

Technický list lepidla Loctite EA 9466

LOCTITE® EA 9466™

Původní název LOCTITE® Hysol® 9466™
září 2014

Popis výrobku

LOCTITE® EA 9466™ má následující vlastnosti:

Technologie	Epoxid
Chemický typ	Epoxid
Vzhled (Pryskyřice)	Bílá matná pasta
Vzhled (Tvrdidlo)	Bílá průhledná kapalina
Vzhled (Smíchaný)	Našedlá matná pasta
Složky	Dvousložkový
Viskozita	Střední
Mísicí poměr objemový pryskyřice : tvrdidlo	2 : 1
Mísicí poměr hmotnostní pryskyřice : tvrdidlo	100 : 50
Vytvrzení	Po zamíchání při pokojové teplotě
Aplikace	Lepení

LOCTITE® EA 9466™ je houževnaté průmyslové epoxidové lepidlo s prodlouženou dobou zpracovatelnosti. Pokud jsou jeho dvě složky promíchány, epoxid vytvrzuje při pokojové teplotě na houževnatou, našedlou hmotu, která má vysokou odolnost vůči loupání a velkou pevnost ve smyku. Plně vytvrzený epoxid je odolný vůči širokému spektru chemikálií a rozpouštědel a slouží rovněž jako výborný elektrický izolátor. LOCTITE® EA 9466™ poskytuje vynikající pevnost lepeného spoje na široké škále plastů a kovů. Typické aplikace zahrnují běžné průmyslové lepení, kde se požaduje prodloužená doba zpracovatelnosti pro správné nastavení či přestavení součástí během sestavování.

TYPICKÉ VLASTNOSTI NEVYTVRZENÉHO MATERIÁLU

Pryskyřice:

Měrná hmotnost při 25 °C	1,0
Bod vzplanutí - viz Bezpečnostní list	
Viskozita, Brookfield - RVT, 25 °C, mPa·s (cP):	
Vřeteno 6, rychlost 20 ot/min.	15 000 až 50 000

Tvrdidlo:

Měrná hmotnost při 25 °C	1,0
Bod vzplanutí - viz Bezpečnostní list	
Viskozita, Brookfield - RVT, 25 °C, mPa·s (cP):	
Vřeteno 5, rychlost 50 ot/min.	25 000 až 60 000

Smíchaný produkt:

Doba zpracovatelnosti, minut	60
------------------------------	----

PROVOZNÍ VLASTNOSTI PŘI VYTVRZOVÁNÍ

Doba fixace

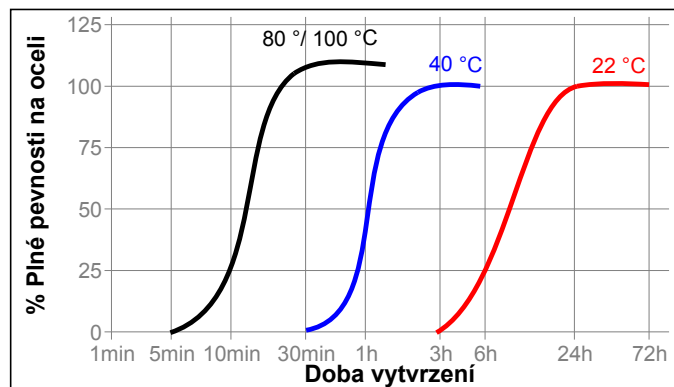
Doba fixace je definována jako čas potřebný k získání pevnosti ve smyku 0.1 N/mm².

Doba fixace, ISO 4587, minut:

Ocel (otryskaná) 180

Rychlost vytvrzení dle času a teploty

Rychlost vytvrzení závisí na okolní teplotě, zvýšení teploty je možné využít k urychlení vytvrzení. Graf níže ukazuje závislost pevnosti ve smyku na čase při různých teplotách na zkušebních vzorcích z otryskané oceli, zkušeno v souladu s ISO 4587.



TYPICKÉ VLASTNOSTI VYTVRZENÉHO MATERIÁLU

Vytvrzeno po dobu 7 dní 22 °C, 1,2 mm silný film

Fyzikální vlastnosti:

Teplota skelného přechodu, ASTM E 1640, °C	62
Tvrdost Shore, ISO 868, Tvrdoměr typu D	60
Prodloužení, ISO 527-3, %	3
Pevnost v tahu ASTM D 882	N/mm ² 32 (psi) (4 640)
Modul pružnosti v tahu, ISO 527-3	N/mm ² 1 718 (psi) (249 110)

Elektrické vlastnosti:

Dielektrická pevnost, ASTM D 149, kV/mm	30
---	----

TYPICKÉ VLASTNOSTI VYTVRZENÉHO MATERIÁLU**Adhezní vlastnosti**

Vytvrzeno po dobu 5 dní 22 °C

Pevnost ve smyku, ISO 4587:

Ocel (otryskaná)	N/mm ²	37,0
	(psi)	(5 365)
Hliník (obroušený)	N/mm ²	26,0
	(psi)	(3 770)
Hliník (eloxovaný)	N/mm ²	17,9
	(psi)	(2 595)
Ocel s galvanickou úpravou (Žárově zinkovaná)	N/mm ²	8,5
	(psi)	(1 230)
Nerezová ocel	N/mm ²	23,0
	(psi)	(3 335)
Polykarbonát	N/mm ²	5,3
	(psi)	(765)
Nylon	N/mm ²	1,6
	(psi)	(230)
Dřevo (Jedle)	N/mm ²	11,3
	(psi)	(1 635)
Sklolaminát	N/mm ²	5,0
	(psi)	(725)
ABS	N/mm ²	4,7
	(psi)	(680)

180° Pevnost v loupání, ISO 8510-2:

Ocel (otryskaná)	N/mm	8,0
	(lb/in)	(45,5)

Pevnost v tahu, ISO 6922:

Ocelový čep (otryskaná) na Sodné sklo	N/mm ²	43,2
	(psi)	(6 260)

Pevnost při nárazu ASTM D 950, J/m² :

Ocel (otryskaná)	5,8
------------------	-----

TYPICKÁ ODOLNOST VŮČI PROSTŘEDÍ

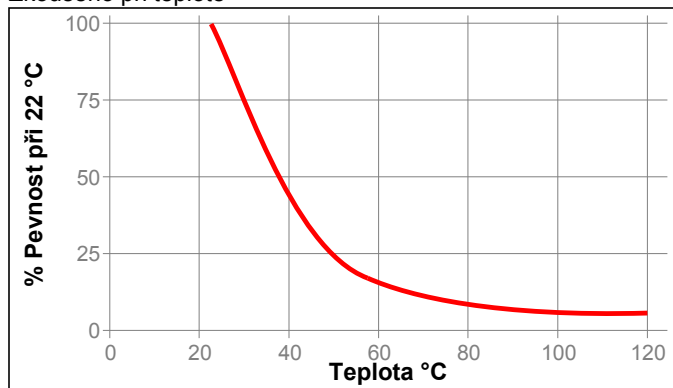
Vytvrzeno po dobu 5 dní 22 °C

Pevnost ve smyku, ISO 4587:

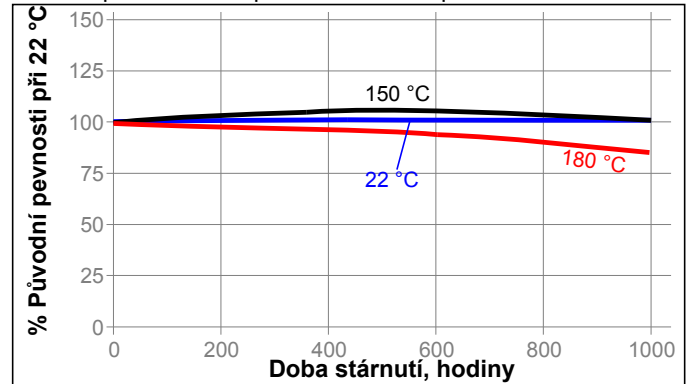
Ocel (otryskaná)

Pevnost za tepla

Zkoušeno při teplotě

**Stárnutí za tepla**

Stárnutí při uvedené teplotě a zkušeno při 22 °C

**Odolnost proti chemikáliím a rozpouštědlům**

Stárnutí při uvedených podmínkách a zkušeno při 22 °C.

Prostředí	°C	% původní pevnosti	
		500 h	1000 h
Motorový olej (10W-30)	87	135	145
Bezolovnatý benzín	22	95	125
Voda/glykol 50/50	87	75	75
Slaná mlha	22	---	80
98% RV	40	85	90
Kondenzující vlhkost	49	---	90
Voda	22	---	90
Aceton	22	75	90
Isopropanol	22	90	100

Pevnost v tahu, ISO 6922, % původní pevnosti:

Ocelový čep (otryskaná) na Sodné sklo:

Prostředí	°C	% původní pevnosti	
		500 h	1000 h
98% RV	40	90	90

VŠEOBECNÉ INFORMACE

Informace pro bezpečné zacházení s tímto produktem najdete v Bezpečnostním listě (BL).

Tento produkt se nedoporučuje používat v čistě kyslíkových nebo na kyslík bohatých systémech a neměl by se používat k těsnění chlóru či jiných silně oxidačních materiálů.

Tam kde se používají vodní roztoky pro čištění povrchů před lepením je důležité zkontrolovat kompatibilitu mycího roztoku a produktu. V některých případech mohou vodní roztoky nepříznivě ovlivnit vytvrzování a vlastnosti produktu.

Pokyny pro použití

1. Pro co nejlepší výsledek lepení by měly být povrchy čisté a odmaštěné.
2. Pro vysokopevnostní konstrukční spoje je třeba odstranit znečištění z lepených povrchů, jako je například lak, zoxidovaná vrstva, oleje, prach, separační činidla a další možná znečištění.
3. **Balení v dvojkartuši:** Při použití vložte jednoduše dvojkartuši do aplikační pistole a dotlačte pistole do

výchozí polohy mírným stisknutím spouště. Potom sejměte kryt trysky a vytlačte malé množství produktu, abyste se přesvědčili, že z obou stran vytéká produkt volně a rovnoměrně. Pokud je požadováno automatické míchání produktu, nasadte na trysku statický mixer a začněte dávkovat lepidlo. Pro ruční míchání vytlačte požadované množství produktu a řádně jej promíchejte. Míchejte ještě asi 15 sekund po té, co získá rovnoměrnou barvu.

Balení ve větších nádobách: Promíchejte řádně obě složky v přesném objemovém nebo hmotnostním poměru, jak je uvedeno v části Popis produktu. Míchejte energicky, přibližně ještě 15 sekund po té, co produkt získá rovnoměrnou barvu.

4. Nikdy nemíchejte množství větší než 4 kg, protože může dojít ke vzniku nadměrného tepla. Mícháním menšího množství omezíte vznik nadměrného tepla.
5. Naneste lepidlo co nejrychleji po rozmíchání na jeden z lepených povrchů. Pro dosažení maximální síly naneste lepidlo rovnoměrně na oba povrchy. Součásti by měly být spojeny okamžitě po nanesení rozmíchaného lepidla.
6. Uchovejte spojené součásti v klidu během vytvrzování produktu. Nechte spoj řádně vytvrdnout nejméně 24 hodin než ho vystavíte provoznímu zatížení.
7. Přetok nevytvrzeného produktu může být otřen pomocí organických rozpouštědel (např. Acetonem).
8. Po použití a před ztvrdnutím produktu by mělo být míchací a nanášecí zařízení řádně umyto horkou mýdlovou vodou.

Neslouží pro materiálové specifikace

Technické údaje zde uvedené jsou pouze informativní. Potřebujete-li pomoc nebo radu ve věci technických podmínek tohoto produktu, obraťte se prosím na Vaše místní oddělení kvality.

Skladování

Produkt skladujte v neotevřených originálních nádobách na suchém místě. Informace o skladování produktu jsou uvedeny na etiketě nádob.

Optimální podmínky skladování:

8 °C až 21 °C. Skladování pod 8 °C nebo nad 28 °C může nepříznivě ovlivnit vlastnosti produktu. Materiál odebraný z nádoby může být během používání kontaminován. Proto jej nikdy nevracejte do originálního obalu. Společnost Henkel nemůže nést odpovědnost za produkt, který byl kontaminován nebo skladován za podmínek jiných, než výše uvedených. Pokud jsou potřebné další informace, kontaktujte Vaše místní technické nebo zákaznické oddělení Henkel Loctite.

Převody

$(^{\circ}\text{C} \times 1.8) + 32 = ^{\circ}\text{F}$
 $\text{kV/mm} \times 25.4 = \text{V/mil}$
 $\text{mm} / 25.4 = \text{inches}$
 $\mu\text{m} / 25.4 = \text{mil}$
 $\text{N} \times 0.225 = \text{lb}$
 $\text{N/mm} \times 5.71 = \text{lb/in}$
 $\text{N/mm}^2 \times 145 = \text{psi}$
 $\text{MPa} \times 145 = \text{psi}$
 $\text{N}\cdot\text{m} \times 8.851 = \text{lb}\cdot\text{in}$
 $\text{N}\cdot\text{m} \times 0.738 = \text{lb}\cdot\text{ft}$
 $\text{N}\cdot\text{mm} \times 0.142 = \text{oz}\cdot\text{in}$
 $\text{mPa}\cdot\text{s} = \text{cP}$

Poznámka: Informace obsažené v tomto technickém listu (TL) včetně doporučení pro použití a aplikaci produktu jsou založeny na našich znalostech o produktu a zkušenostech s ním k datu tohoto TL. Produkt může mít řadu různých aplikací a ve Vašem prostředí se může jednat o aplikace a pracovní podmínky, které jsou mimo naši kontrolu. Společnost Henkel tedy neručí za vhodnost svého produktu pro výrobní procesy a podmínky, za kterých je používáte, ani negarantuje dosažení Vámi zamýšlených výsledků. Doporučujeme, abyste předem provedli zkoušky k potvrzení vhodnosti našeho produktu pro Vaši konkrétní aplikaci.

Veškerá odpovědnost za informace v technickém listu či za libovolná jiná písemná či ústní doporučení týkající se dotčeného produktu se vylučuje, s výjimkou situací, kdy byla výslovně sjednána, kdy naše nedbalost způsobila smrt či zranění, a s výjimkou odpovědnosti, která povinně vyplývá z platných zákonů o odpovědnosti za výrobky.

V případě, že produkty dodává Henkel Belgium NV, Henkel Electronic Materials NV, Henkel Nederland BV, Henkel Technologies France SAS a Henkel France SA, vezměte na vědomí také následující skutečnost: Bude-li společnost Henkel z libovolných právních důvodů přesto pohnána k odpovědnosti, její odpovědnost v žádném případě nepřekročí hodnotu dotčené dodávky.

Pokud produkty dodává Henkel Colombiana, S.A.S., platí toto prohlášení o vyloučení odpovědnosti: Informace obsažené v tomto technickém listu (TL) včetně doporučení pro použití a aplikaci produktu jsou založeny na našich znalostech o produktu a zkušenostech s ním k datu tohoto TL. Společnost Henkel neručí za vhodnost svého produktu pro výrobní procesy a podmínky, za kterých je používáte, ani pro zamýšlené aplikace a výsledky. Doporučujeme, abyste předem provedli zkoušky k potvrzení vhodnosti našeho produktu.

Veškerá odpovědnost za informace v technickém listu či za libovolná jiná písemná či ústní doporučení týkající se dotčeného produktu se vylučuje, s výjimkou situací, kdy byla výslovně sjednána, kdy naše nedbalost způsobila smrt či zranění, a s výjimkou odpovědnosti, která povinně vyplývá z platných zákonů o odpovědnosti za výrobky.

V případě, že jsou produkty dodávány Henkel Corporation, Resin Technology Group, Inc nebo Henkel Canada Corporation, se používá následující odmítnutí.

Veškeré údaje zde uvedené slouží pouze pro informaci a jsou považovány za hodnověrné. Nemůžeme přebírat zodpovědnost za výsledky dosažené jinými laboratorními, nad jejichž postupy nemáme kontrolu. Je plně na zodpovědnosti uživatele posoudit vhodnost jakéhokoli zde uvedeného postupu pro vlastní účely a je také na jeho zodpovědnosti, zda přijme vhodná preventivní opatření pro ochranu majetku a osob proti všem rizikům, která mohou být spojena s používáním produktů a manipulací s nimi.

V tomto duchu se společnost Henkel zvláště zřiká přímých i vyplývajících záruk, včetně záruk obchodovatelnosti a vhodnosti pro daný účel, vznikajících z prodeje nebo používání jejich produktů. Společnost Henkel zvláště odmítá jakoukoli zodpovědnost za následné nebo náhodné škody jakéhokoli druhu, včetně náhrady škod.

Tato diskuze o různých postupech a složeních neznámá, že tyto nejsou patentovány společností Henkel nebo jinými subjekty. Každému

budoucímu uživateli doporučujeme, aby si před sériovým použitím otestoval, zda je pro něj navrhovaná aplikace vhodná. Tento produkt může být zahrnut v patentech USA nebo jiných zemí.

Ochranná známka

Pokud není uvedeno jinak, všechny ochranné známky v tomto dokumentu jsou ochranné známky společnosti Henkel ve Spojených státech a kdekoli jinde. ® značí ochrannou známku zaregistrovanou na Úřadě obchodního vlastnictví Spojených států amerických. (U.S. Patent and Trademark Office)

Reference 1.2

PŘÍLOHA č. 3

Technický report z laboratoře - Experiment

Technical Report No.: 0zz-17
Test method: Rules of FSAE
Manufacturer / Order party: UWB Racing Team Pilsen
Product under test: Impact Attenuator UWB04_01

1st1.1.1 TECHNICAL REPORT

No. 0zz-17

Test according to

Rules of FSAE: para. T2.20 Impact Attenuator Data Requirement

Test Methods: Rules of FSAE Version 1.1: para. T2.20 of 2017

Objectives: Base for safety check

I. Technical data

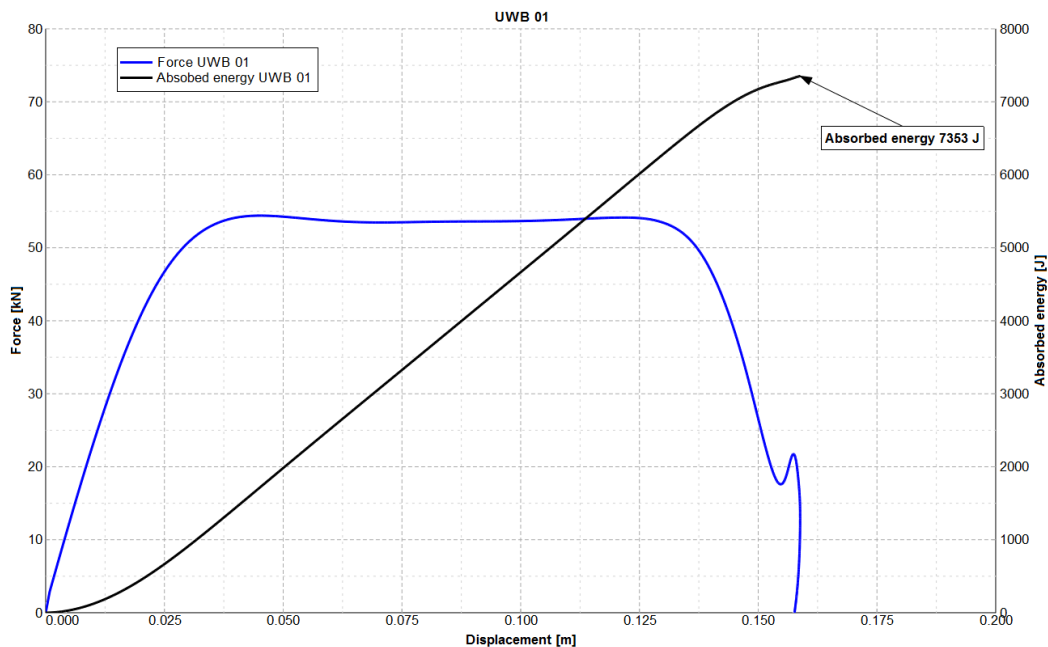
- 0.1.1. Test ordered by: UWB Racing Team Pilsen,
Faculty of Mechanical Engineering,
University of West Bohemia,
Univerzitní 8,
306 14 Plzeň,
Czech Republic
- 0.1.2. Manufacturer: UWB Racing Team Pilsen,
Faculty of Mechanical Engineering,
University of West Bohemia,
Univerzitní 8,
306 14 Plzeň,
Czech Republic
- 0.2. Product under test: Impact Attenuator of Formula UWB04
- 0.3. Test required: On demand

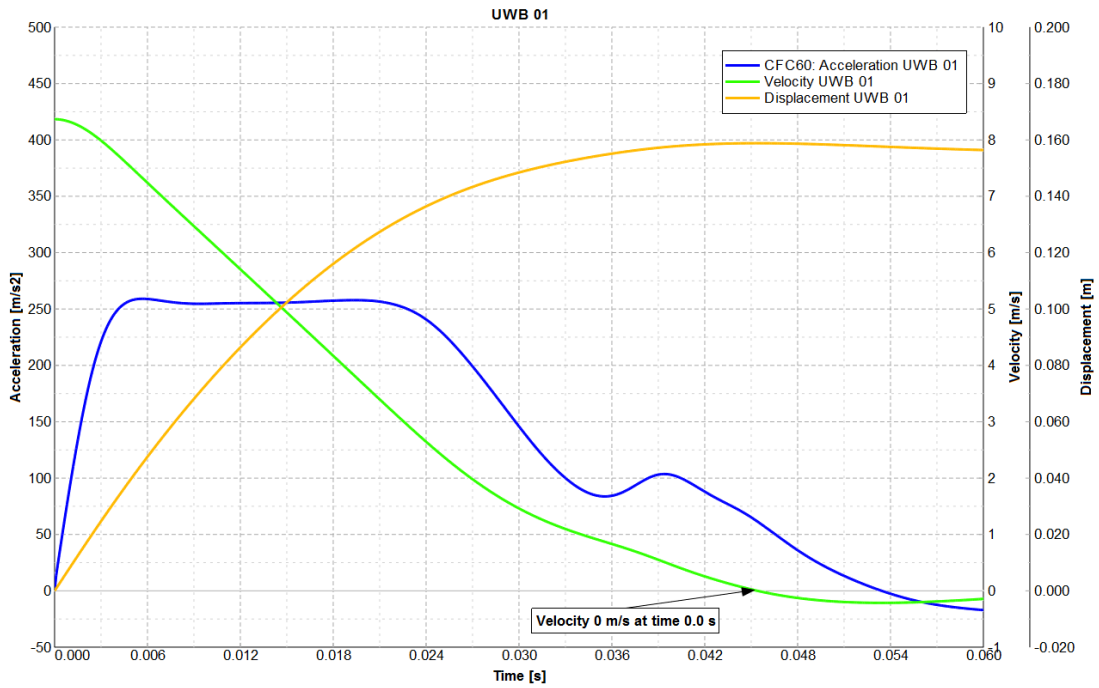
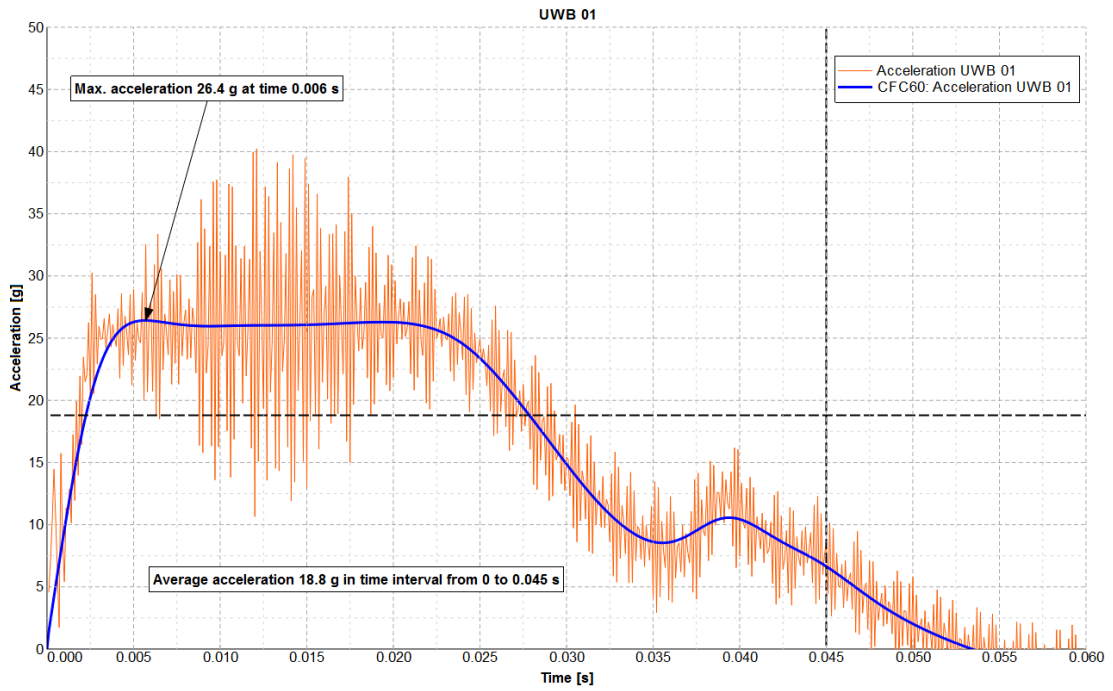
II. Test Report

1. Test conditions

- 1.1. Test object: Impact Attenuator UWB04_01 of Formula UWB04, dimensions: 205 mm long, 105 mm high and 200 mm wide, length is oriented along the fore axis of the frame. It consists of one layers of aluminum honeycombs 5.7-3/16-P-5052
Impact attenuator is attached to the 4 mm solid aluminium plate.
Anti-intrusion plate is attached with four 8mm metric grade bolts to a structurally representative section of the intended chassis that extends of 100 mm away from the front bulkhead.
- 1.2. Test method: Steel cylindrical body of 210 kg was dropped into impact attenuator with a velocity of body of 8,37 meters/second, deceleration was recorded frequency 10000 samples/second.
- 1.3. Measuring and testing instruments: Steel cylindrical body of 210 kg, length measures Drop device KTG of maximal high of 16 meters
Triaxial IEPE accelerometer Bruel Kjaer Type 4504A 750g
Amplifier Dewetron DEWE 43 + IEPE adapter MSI-BR-ACC-S1 with DEWESoft v. 7.1.1 for recording and META v. 15.2.2 for analyse
- 1.4. Test site: Laboratory of glasses and climatotechnology KTG

2. Test results





Permanently deflect of anti-intrusion plate: 8 mm

3. Samples submitted to test on: 17 February 2017

4. Date of test: 17 February 2017

III. Attachments

No Attachments

Results presented above have been measured/found in the laboratory of KTG, s.r.o. and relate only to items tested. Measuring and test equipment and test site meet the requirements of the applicable legislation. This report must never be reproduced incomplete without a written permission of the testing laboratory.

IV. Final assessment

Peak of maximal deceleration:	26,4	g	for	CFC60	filtering
Average deceleration:				18,8	g
Total absorbed energy:		7		353	J
Permanently deflect of anti-intrusion plate: 8 mm					

This technical report consists of page No 1 to 3.

Prague 5 March 2017

Ing. Miloslav Kotal
Report Author

Technical Report No.: 0xx-17
Test method: Rules of FSAE
Manufacturer / Order party: UWB Racing Team Pilsen
Product under test: Impact Attenuator UWB04_02

1st1.1.2 TECHNICAL REPORT

No. 0xx-17

Test according to

Rules of FSAE: para. T2.20 Impact Attenuator Data Requirement

Test Methods: Rules of FSAE Version 1.1: para. T2.20 of 2017

Objectives: Base for safety check

I. Technical data

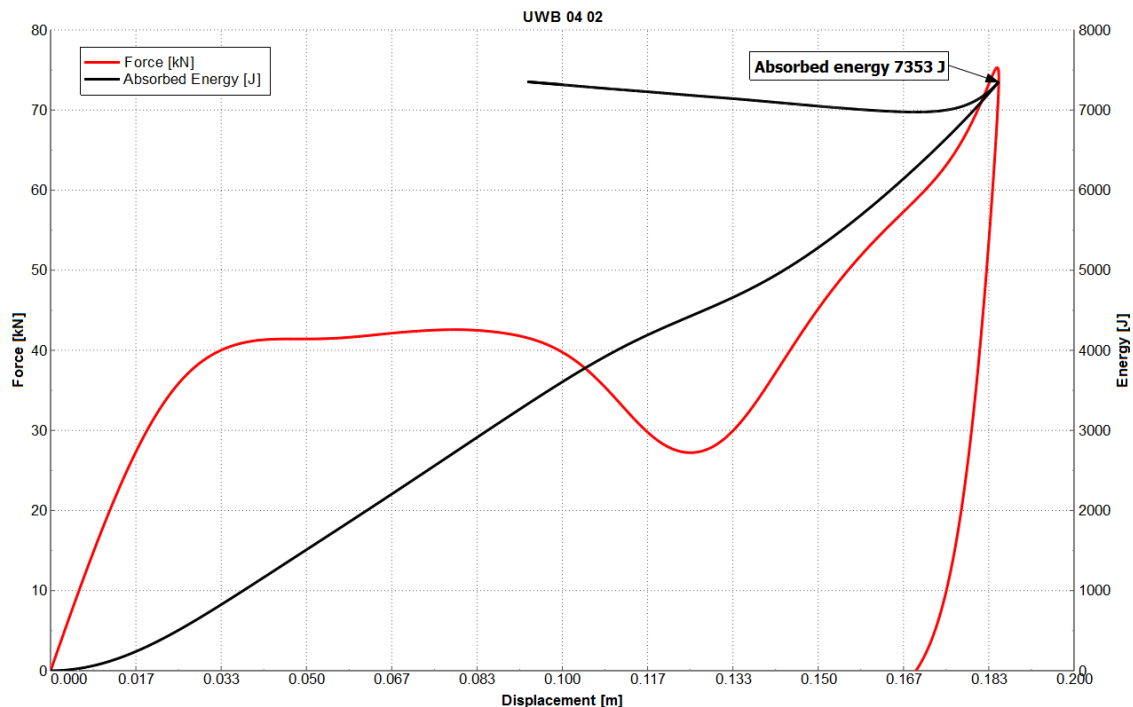
- 0.1.1. Test ordered by: UWB Racing Team Pilsen,
Faculty of Mechanical Engineering,
University of West Bohemia,
Univerzitní 8,
306 14 Plzeň,
Czech Republic
- 0.1.2. Manufacturer: UWB Racing Team Pilsen,
Faculty of Mechanical Engineering,
University of West Bohemia,
Univerzitní 8,
306 14 Plzeň,
Czech Republic
- 0.2. Product under test: Impact Attenuator of Formula UWB04
- 0.3. Test required: On demand

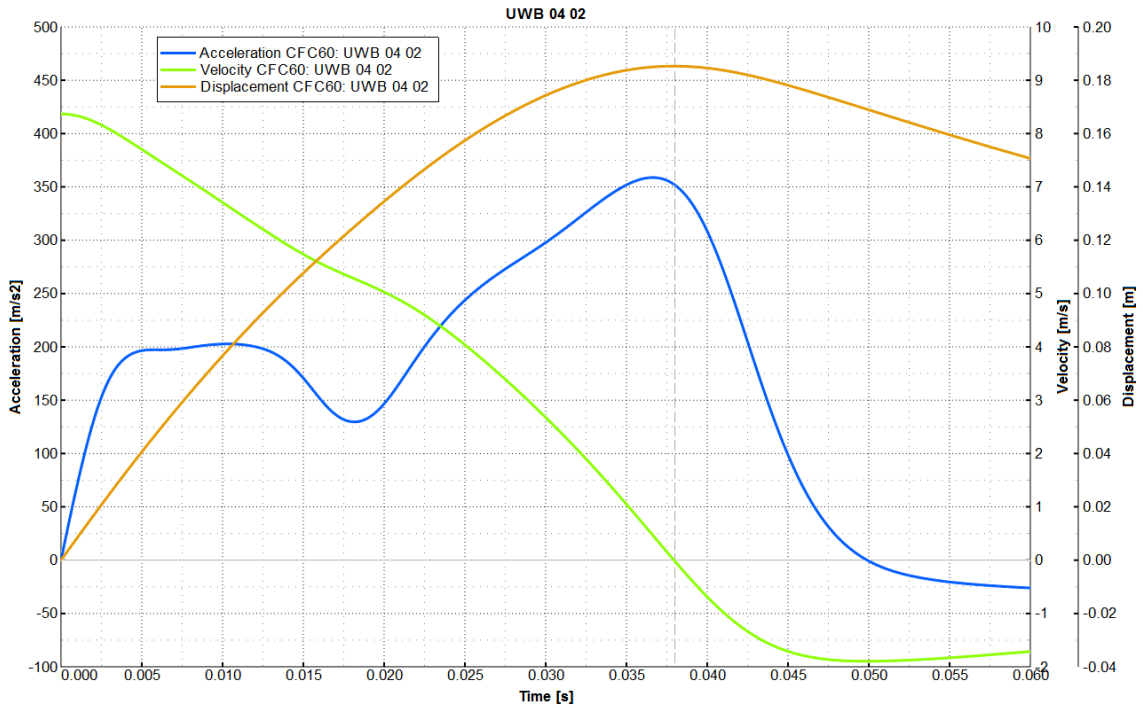
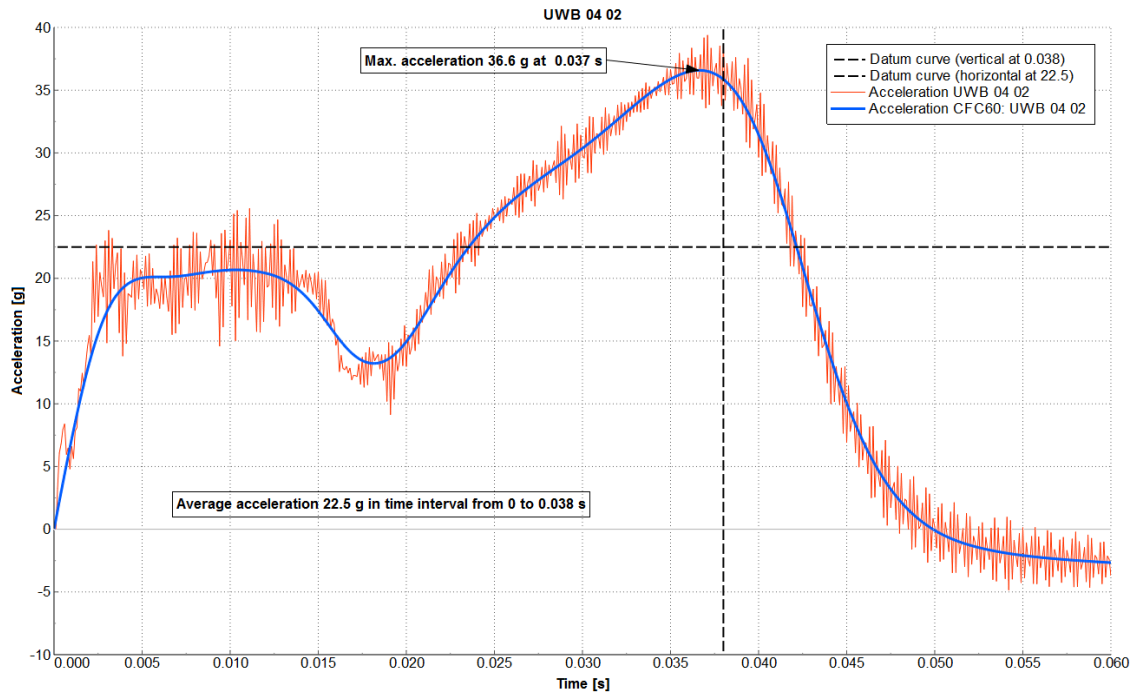
II. Test Report

1. Test conditions

- 1.1. Test object: Impact Attenuator UWB04_02 of Formula UWB04, dimensions: 205 mm long, 105 mm high and 200 mm wide, length is oriented along the fore axis of the frame. It consists of one layers aramid honeycombs C1-3, 2-80 Cormaster. Impact attenuator is attached to the 4 mm solid aluminium plate. Anti-intrusion plate is attached with four 8mm metric grade bolts to a structurally representative section of the intended chassis that extends of 100 mm away from the front bulkhead.
- 1.2. Test method: Steel cylindrical body of 211 kg was dropped into impact attenuator with a velocity of body of 8,37 meters/second, deceleration was recorded frequency 10000 samples/second.
- 1.3. Measuring and testing instruments: Steel cylindrical body of 210 kg, length measures Drop device KTG of maximal high of 16 meters Triaxial IEPE accelerometer Bruel Kjaer Type 4504A 750g Conditioning aplifier Bruel Kjaer Nexus Type 2693 14 bit A/D converter National Instruments NI USB6009
- 1.4. Test site: Laboratory of glasses and climatotechnology KTG

2. Test results





Permanently deflect of anti-intrusion plate: 8 mm

3. Samples submitted to test on: 17 February 2017

4. Date of test: 17 February 2017

III. Attachments

No Attachments

Results presented above have been measured/found in the laboratory of KTG, s.r.o. and relate only to items tested. Measuring and test equipment and test site meet the requirements of the applicable legislation. This report must never be reproduced incomplete without a written permission of the testing laboratory.

IV. Final assessment

Peak of maximal deceleration:	36,6	g	for	CFC60	filtering
Average deceleration:				22,5	g
Total absorbed energy:		7		353	J
Permanently deflect of anti-intrusion plate: 8 mm					

This technical report consists of page No 1 to 3.

Prague 5 March 2017

Ing. Miloslav Kotal
Report Author

Technical Report No.: 0yy-17
Test method: Rules of FSAE
Manufacturer / Order party: UWB Racing Team Pilsen
Product under test: Impact Attenuator UWB04_03

1st1.1.3 TECHNICAL REPORT

No. 0yy-17

Test according to

Rules of FSAE: para. T2.20 Impact Attenuator Data Requirement

Test Methods: Rules of FSAE Version 1.1: para. T2.20 of 2017

Objectives: Base for safety check

I. Technical data

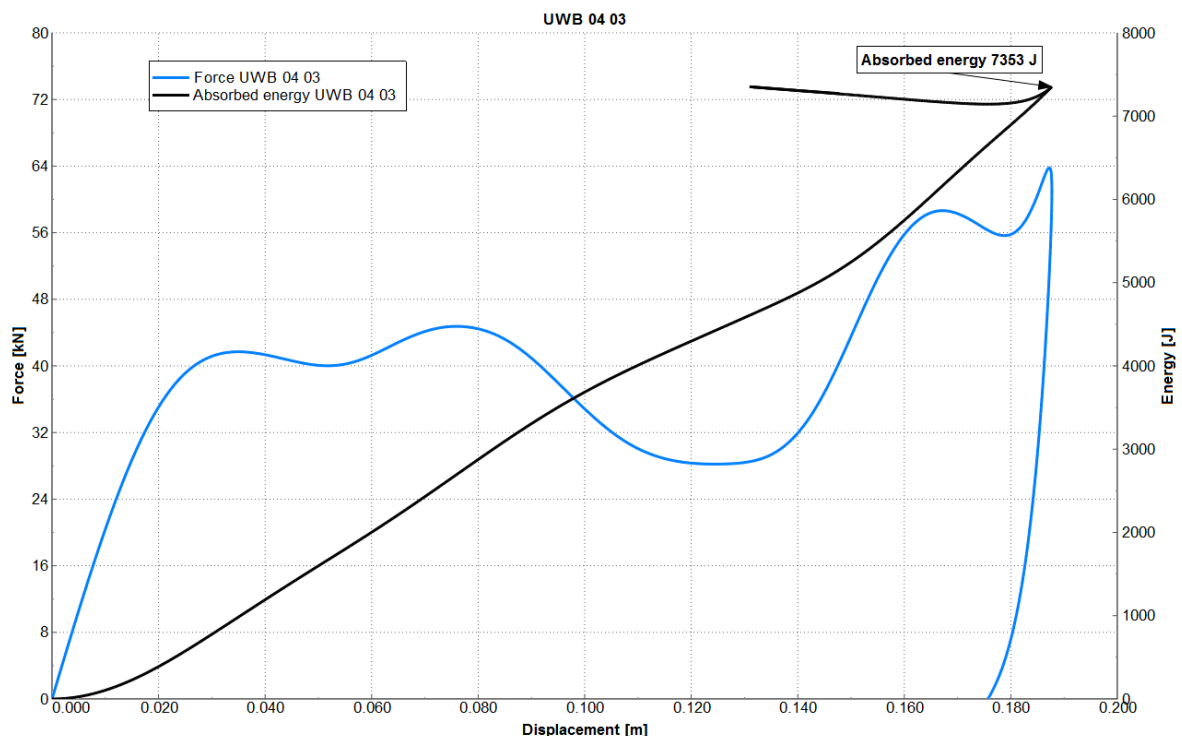
- 0.1.1. Test ordered by: UWB Racing Team Pilsen,
Faculty of Mechanical Engineering,
University of West Bohemia,
Univerzitní 8,
306 14 Plzeň,
Czech Republic
- 0.1.2. Manufacturer: UWB Racing Team Pilsen,
Faculty of Mechanical Engineering,
University of West Bohemia,
Univerzitní 8,
306 14 Plzeň,
Czech Republic
- 0.2. Product under test: Impact Attenuator of Formula UWB04
- 0.3. Test required: On demand

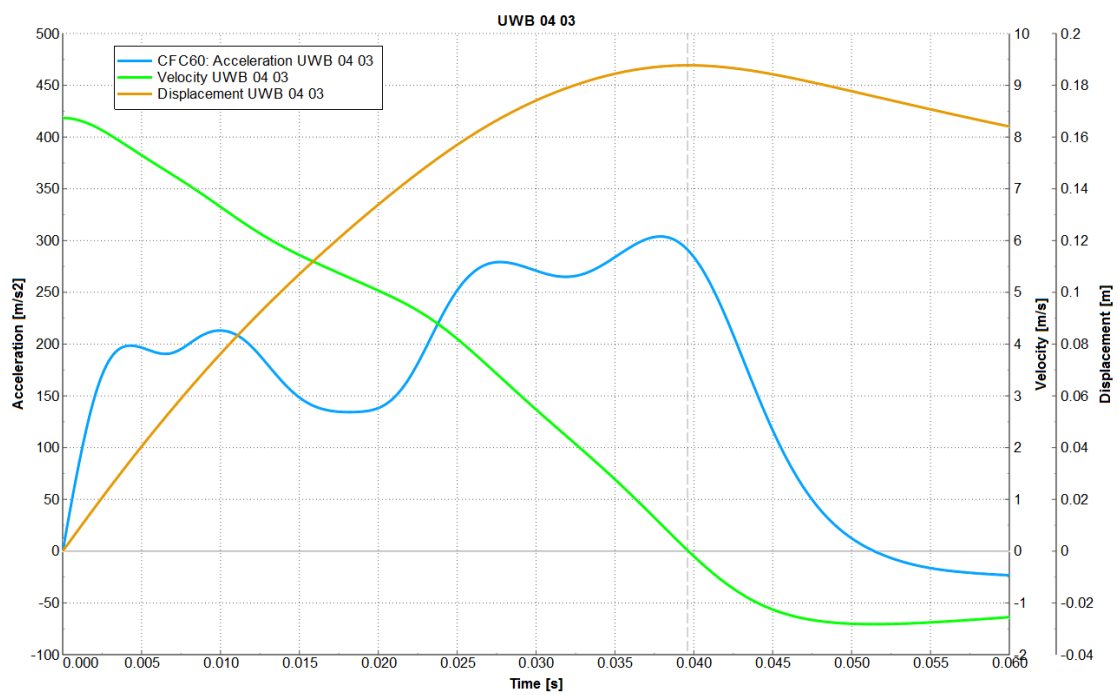
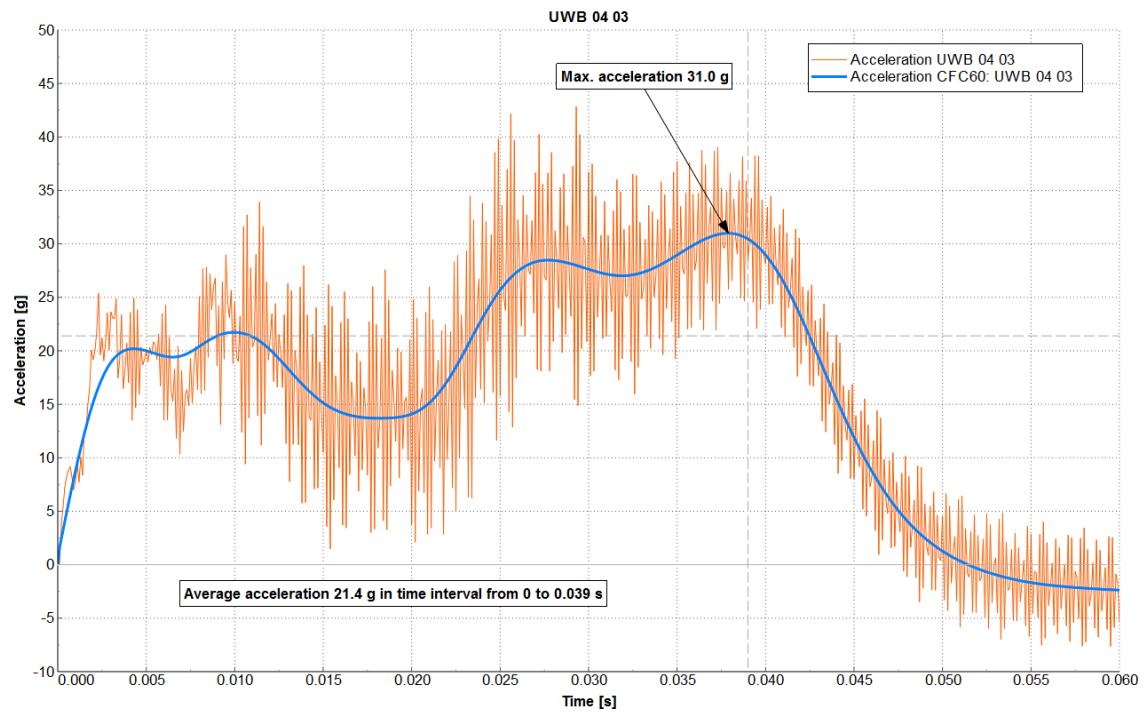
II. Test Report

1. Test conditions

- 1.1. Test object: Impact Attenuator UWB04_02 of Formula UWB04, dimensions: 205 mm long, 105 mm high and 200 mm wide, length is oriented along the fore axis of the frame. It consists of one layers of aramid honeycombs C1-3, 2-80 Cormaster. Impact attenuator is attached to the 4 mm solid aluminium plate. Anti-intrusion plate is attached with four 8mm metric grade bolts to a structurally representative section of the intended chassis that extends of 100 mm away from the front bulkhead.
- 1.2. Test method: Steel cylindrical body of 211 kg was dropped into impact attenuator with a velocity of body of 8,37 meters/second, deceleration was recorded frequency 10000 samples/second.
- 1.3. Measuring and testing instruments: Steel cylindrical body of 210 kg, length measures Drop device KTG of maximal high of 16 meters Triaxial IEPE accelerometer Bruel Kjaer Type 4504A 750g Conditioning aplifier Bruel Kjaer Nexus Type 2693 14 bit A/D converter National Instruments NI USB6009
- 1.4. Test site: Laboratory of glasses and climatotechnology KTG

2. Test results





Permanently deflect of anti-intrusion plate: 9 mm

3. Samples submitted to test on: 17 February 2017

4. Date of test: 17 February 2017

III. Attachments

No Attachments

Results presented above have been measured/found in the laboratory of KTG, s.r.o. and relate only to items tested. Measuring and test equipment and test site meet the requirements of the applicable legislation. This report must never be reproduced incomplete without a written permission of the testing laboratory.

IV. Final assessment

Peak of maximal deceleration:	31,0	g	for	CFC60	filtering
Average deceleration:				21,4	g
Total absorbed energy:		7		353	J
Permanently deflect of anti-intrusion plate: 9 mm					

This technical report consists of page No 1 to 3.

Prague 5 March 2017

Ing. Miloslav Kotal
Report Author

PŘÍLOHA č. 4

Data report deformačního členu

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: University of West Bohemia
 Team Contact: Michal Skovajsa
 Faculty Advisor: Martin Hynek

Car Number(s) & Event(s): 60
 E-mail Address: michal.skovajsa@gmail.com
 E-mail Address: hynek@kks.zcu.cz

Material(s) Used	Aluminium Honeycomb
Description of form/shape	Rectangle 200 mm x 100 mm x 200 mm
IA to Anti-Intrusion Plate mounting method	Loctite EA 9466 epoxid
Anti-Intrusion Plate to Front Bulkhead mounting method	8x8mm Grade 8.8 bolts
Peak deceleration (≤ 40 g's)	26,4 g
Average deceleration (≤ 20 g's)	18,8 g

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

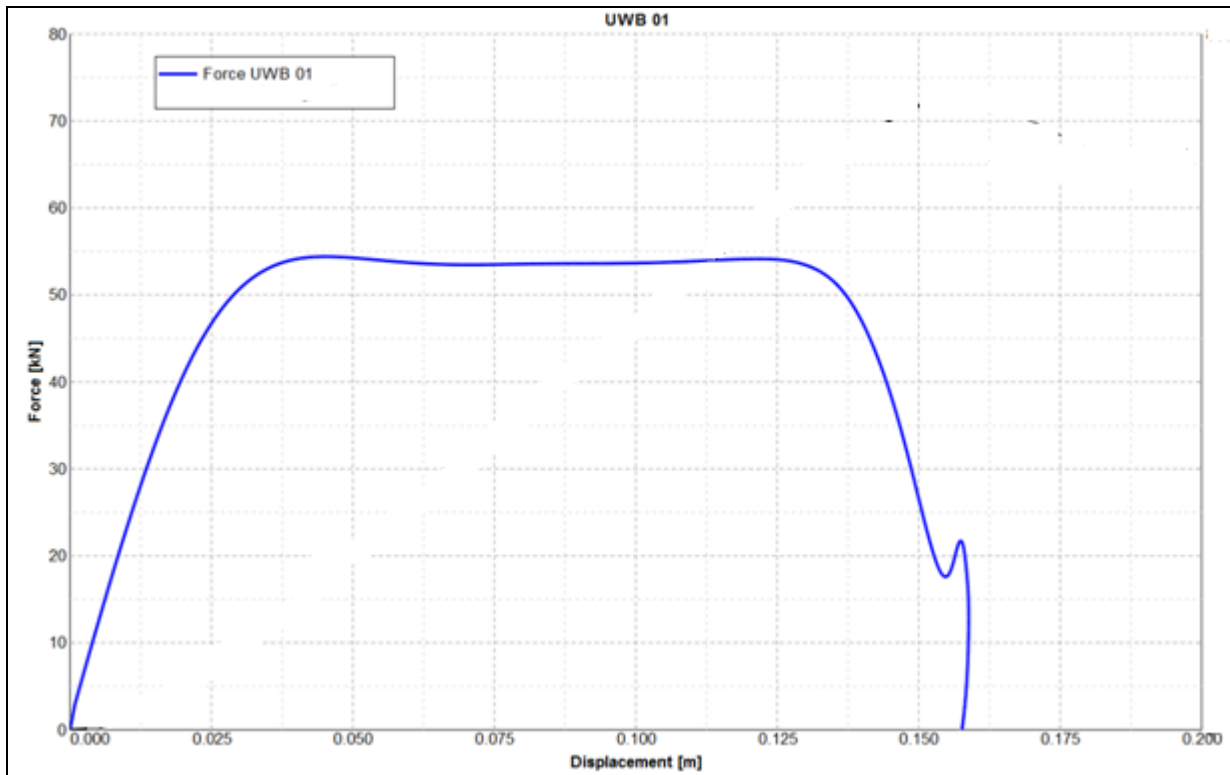


Figure 1: Force-Displacement Curve (dynamic tests must show displacement during collision and after the point $v=0$ and until force becomes = 0)

**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: University of West Bohemia

Car Number(s) & Event(s): 60

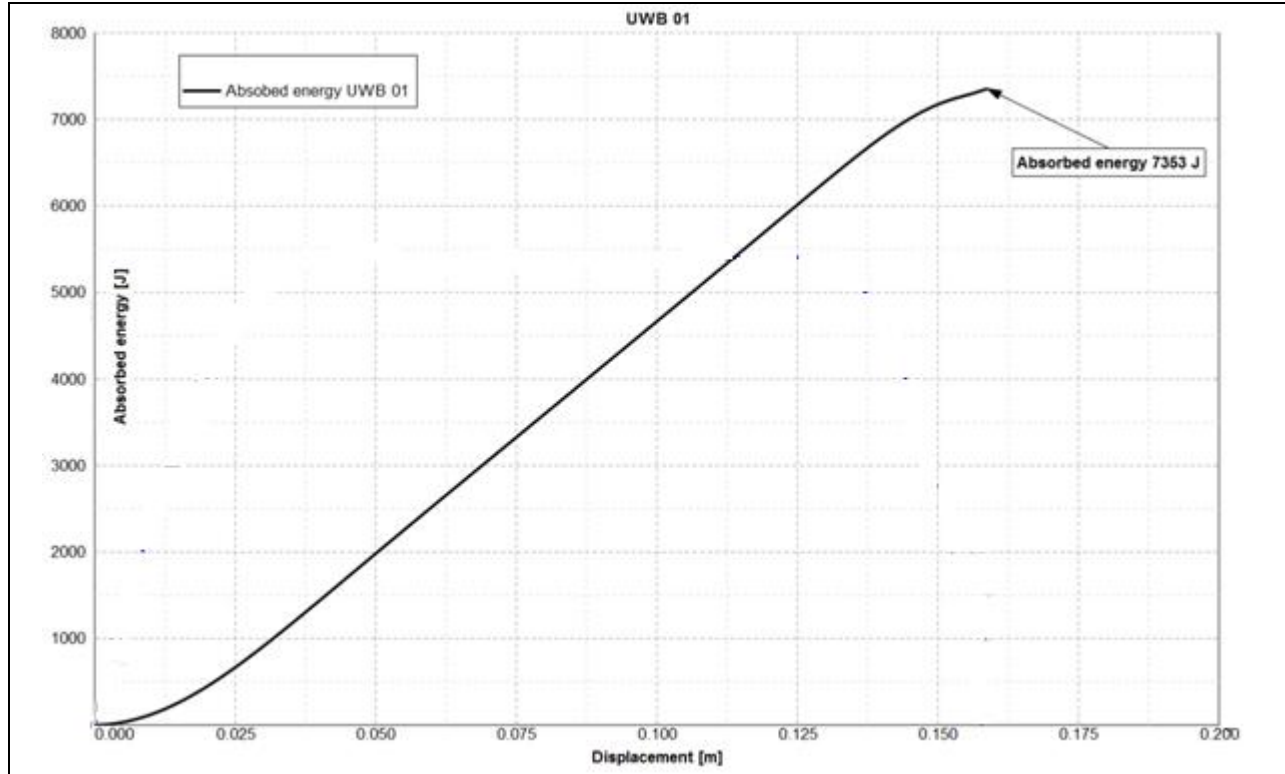


Figure 2: Energy-Displacement Curve (dynamic tests must show displacement during collision and after v=0)



Figure 3: Attenuator as Constructed

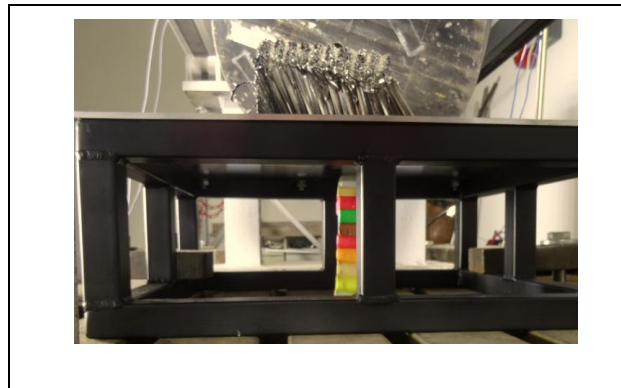


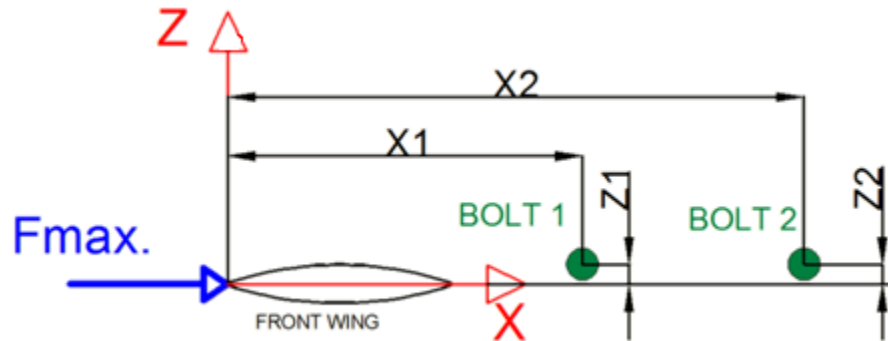
Figure 4: Attenuator after Impact

Energy Absorbed (J): Must be ≥ 7350 J	7 353 J	Vehicle includes front wing in front of front bulkhead?	Yes
IA Max. Crushed Displacement (mm):	156 mm	Wing structure included in test?	No
IA Post Crush Displacement - demonstrating any return (mm):	3 mm	Test Type: (e.g. barrier test, drop test, quasi-static crush)	Drop test
Anti-Intrusion Plate Deformation (mm)	8 mm (permanently deflect) 17 mm (during test)	Test Site: (must be from approved test site list on website for dynamic tests)	KTG, s.r.o.

University Name: University of West Bohemia

Car Number(s) & Event(s): 60

Calculation T3.22.3:



Coefficient of strength for 8.8: $\alpha_v = 0,6 [-]$
 Proportional load factor $\gamma_{M2} = 1,25 [-]$
 Ultimate strength $R_m = 800 [MPa]$
 Cross section of bolt $A_b = 28,26 [mm^2]$ (for every bolt)

$$\text{Maximal load a bolt to cut } R_f = \alpha_v * R_m * \frac{A_b}{\gamma_{M2}} = 10851,84 N$$

Really load expressed from the maximum load on impact and diagram of wing mount.

$$F1 = 190709 [N]$$

$$F2 = 208064 [N]$$

From maximum load a bolt to cut and really load on impact will be express coefficient of cut for every bolt which must be less than 1.

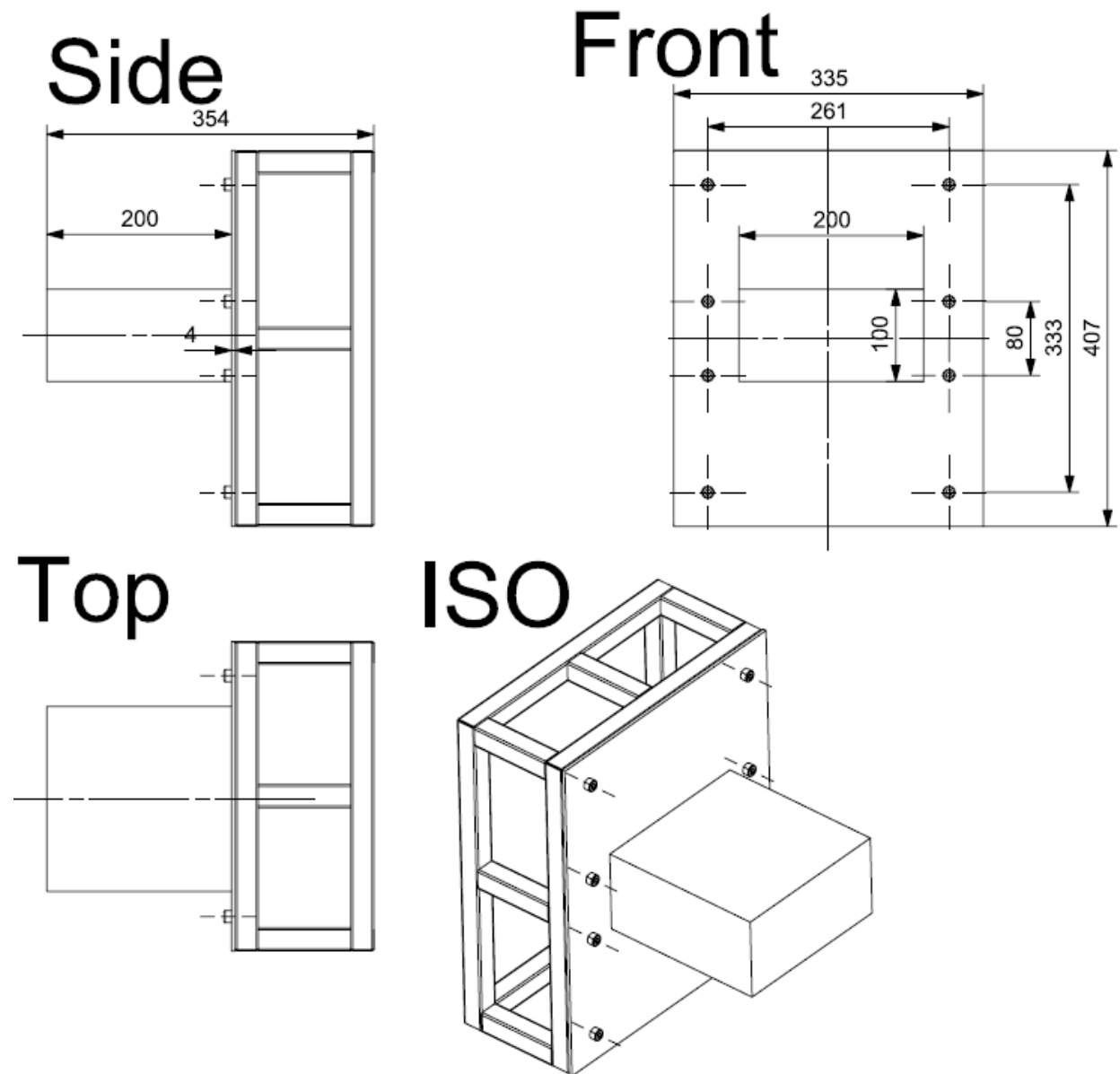
$$C1 = \frac{R_f}{F1} = 0,057 [-]$$

$$C2 = \frac{R_f}{F2} = 0,052 [-]$$

This result proves that the force to shear the fasteners does not exceed 120 kN. Maximum force which can the fasteners resist is less than half of 120 kN.

University Name: University of West Bohemia

Car Number(s) & Event(s): 60



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

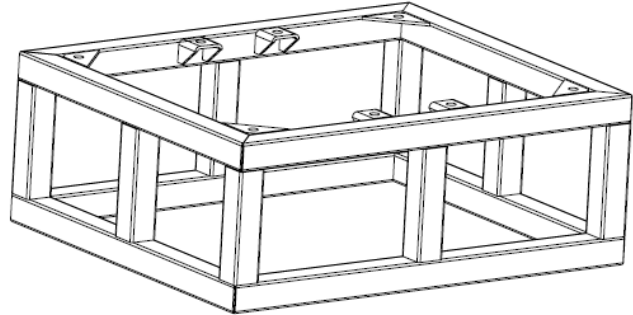
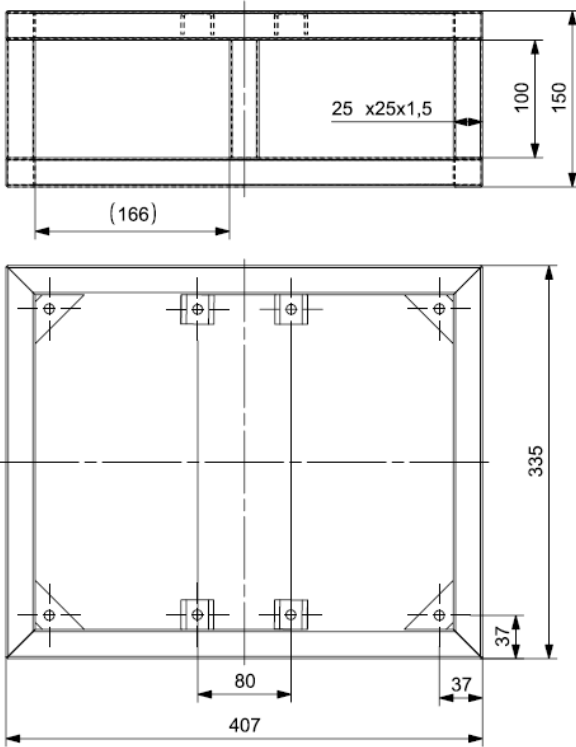
Width (lateral direction): 200 mm (≥ 200 mm)

Height (vertical direction): 100 mm (≥ 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.



Design report:

We have chosen aluminium honeycomb for design of impact Attenuator.

Advantages

- Light material
- The lowest dimensions
- Easy to build
- Cheaper than aramid honeycomb and impact attenuator from carbon fibres

We have made drop test in dynamic testing KTG in Prag.

Our first IA was designed by steel, second was designed from 50 mm high aluminium honeycomb which was bigger and heavier. We have made IA from aluminium honeycomb, that we have reduced the weight of the impact attenuator of 358 g.

Testing instruments:

Steel cylindrical body of 210 kg, length measures
 Drop device KTG of maximal high of 16 meters
 Triaxial IEPE accelerometer Bruel Kjaer Type 4504A 750g
 Amplifier Dewetron DEWE 43 + IEPE adapter MSI-BR-ACC-S1 with DEWESoft v. 7.1.1 for recording and META v. 15.2.2 for analyse
 Laboratory of glasses and climatotechnology KTG

Initial height of cylindrical body 210kg:

$$E_{300} = \frac{1}{2} * m * v^2$$

$$E_{300} = \frac{1}{2} * 300 * 7^2 = 7350 [J]$$

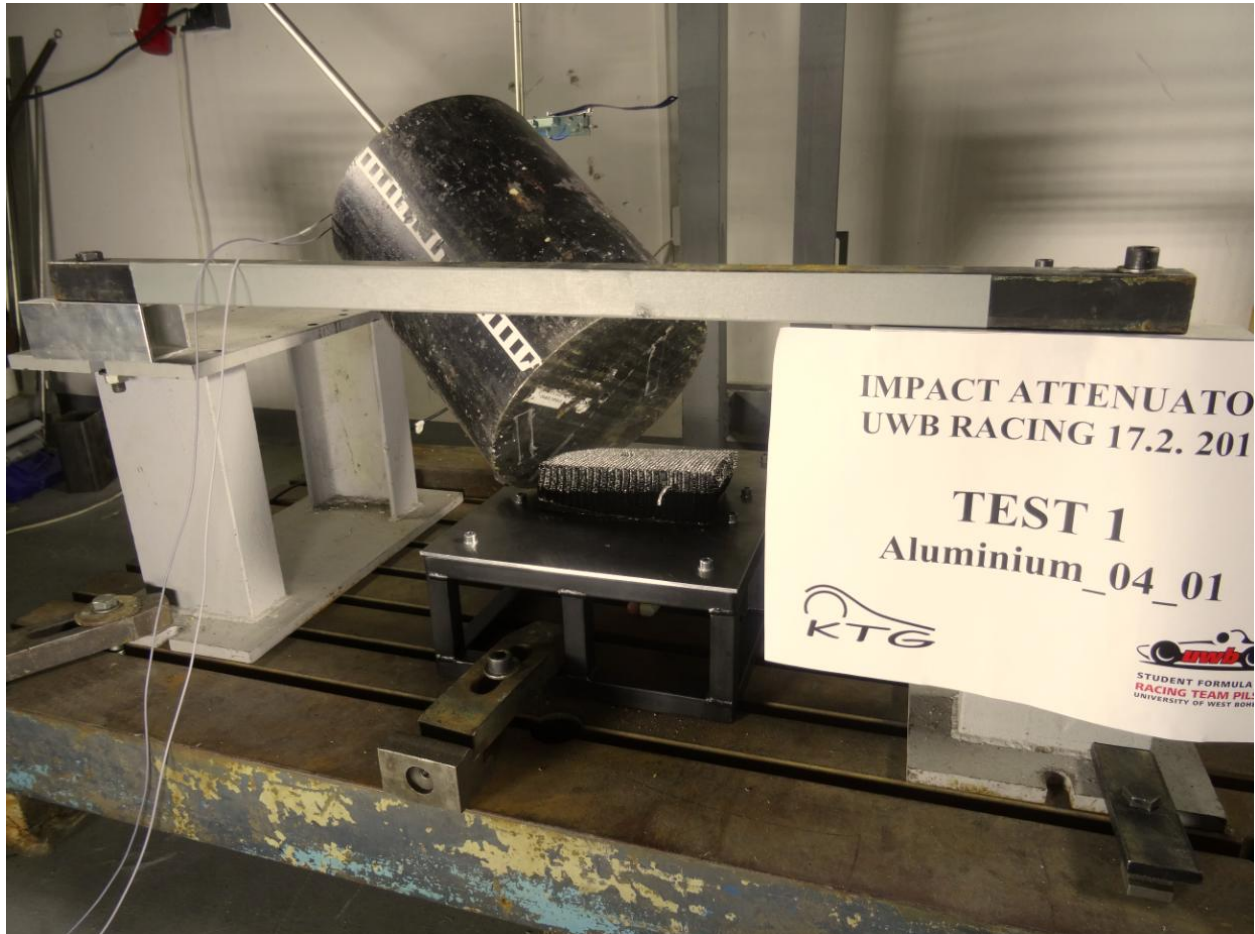
$$v_{211} = \sqrt{\frac{2 * E_{300}}{210}} = 8,37 [m/s]$$

$$v = \sqrt{2 * g * h} \rightarrow h = \frac{v^2}{2 * g} = \frac{8,37^2}{2 * 9,81} = 3,57 [m]$$

Impact Attenuator before test:



Impact Attenuator after test:

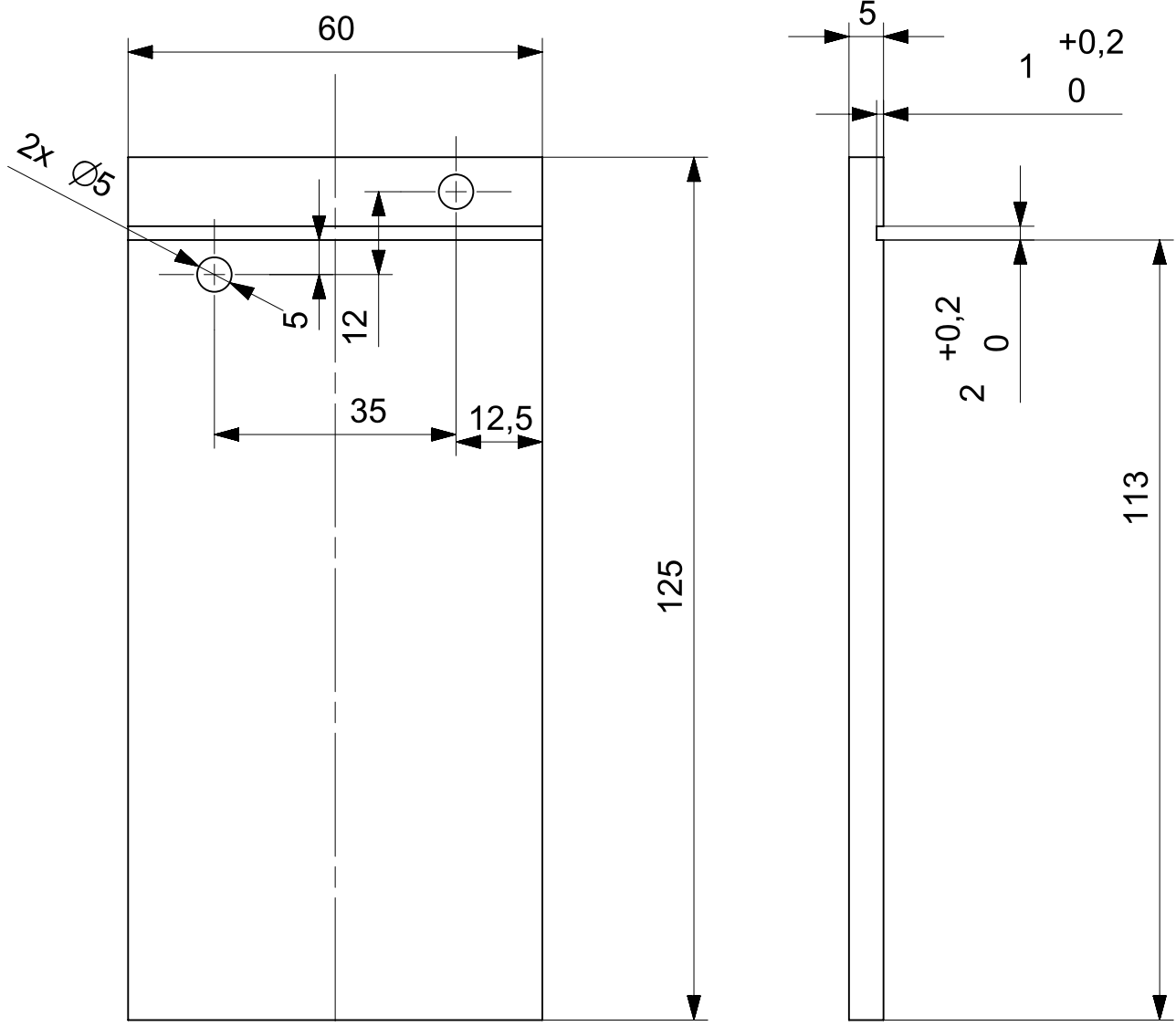



4


3



2


1



 Ra6,3

8		PLO 60x5-1100	S235		0,290		KKS-DP-000	1
Pocet ks.	Nazev - rozmer	Polotovar	Material	T.O.	C.hmot.	Hr.hmot.	Cislo vykresu sestavy	Poz.
Quant.	Title - size	Blank	Material	C.W.	Weight	R. weight	Assembly drawing no.	Pos.

CAD 1	Datum / Date	Jmeno / Name			  <p>Vsechna prava vyhrazena / All rights reserved</p>
Kreslil / Drawn by	13.12.2016	KOCOUREK MARTIN			
Prezkousel / Checked by					
Schvalil / Approved by					
Index zmeny	Popis zmeny / change description	Schval. / APP	Datum / Date	Podpis / Signature	Poznámka / Note:

 <p>ISO 128</p>	Tolerance / Tolerovani	Soubor-model / ASM-file	Projekt / Project:	Meritko / Scale
	ISO 8015 ISO 2768mK	vykres-desticka		
		Soubor-vykres / DRW-file	C.sestavy / Assembly No.	1:1
		vykres-desticka		
Nazev / Title	DESKA		Rev.	Cislo vykresu / Drawing No.
				KKS-DP-001
			List / sheet no.	Format
			1	A4
			Pocet listu / sheets	
			1	

4

3

2

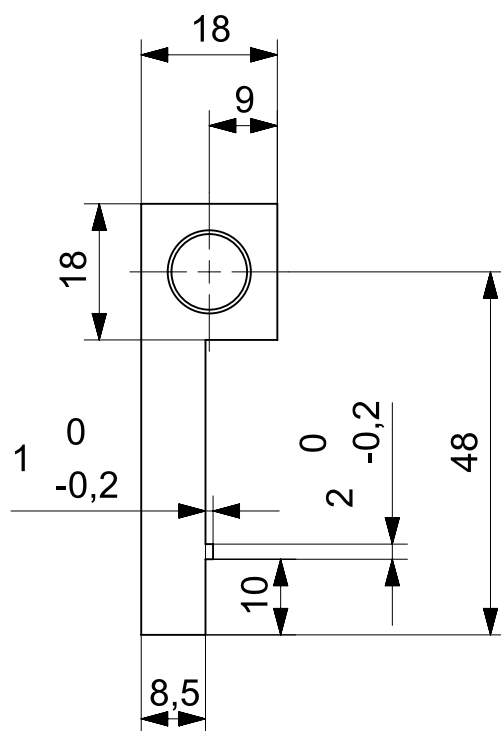
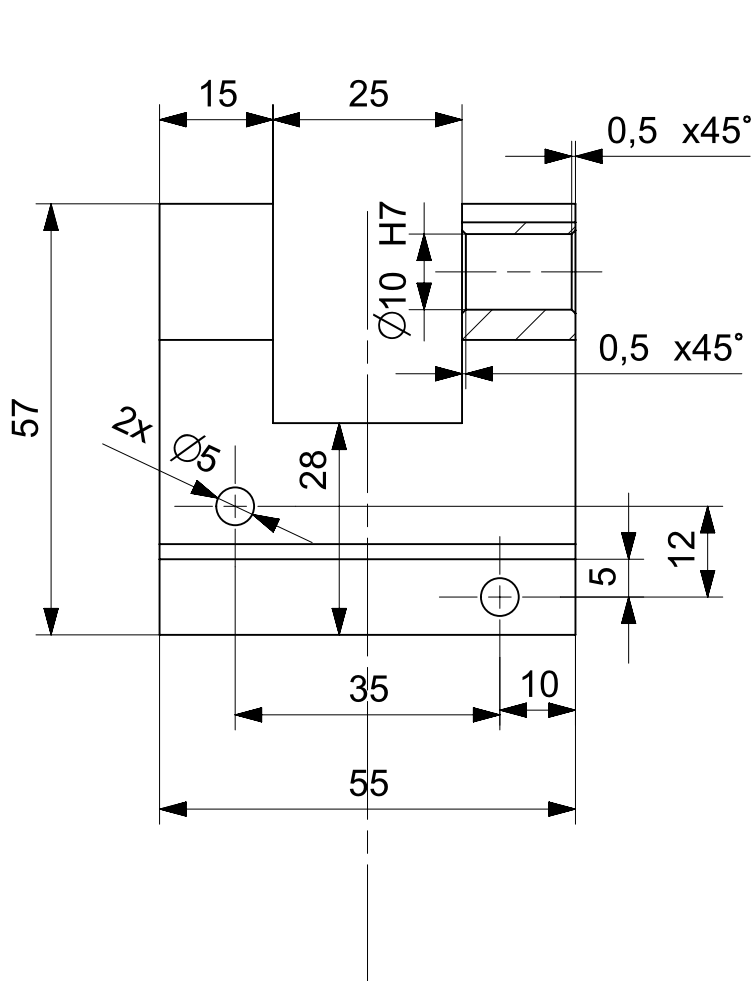
1

4

3



2


1



Ra6,3

2	<input checked="" type="checkbox"/>	PLO 60x20-120	S235		0,180		KKS-DP-000	2
Pocet ks.	Nazev - rozmer	Polotovar	Material	T.O.	C.hmot.	Hr.hmot.	Cislo vykresu sestavy	Poz.
Quant.	Title - size	Blank	Material	C.W.	Weight	R. weight	Assembly drawing no.	Pos.

CAD 1	Datum / Date	Jmeno / Name			  <small>Vsechna prava vyhrazena / All rights reserved</small>			
Kreslil / Drawn by	13.12.2016	KOCOUREK MARTIN						
Prezkousel / Checked by								
Schvalil / Approved by								
Index zmeny	Popis zmeny / change description	Schval. / APP	Datum / Date	Podpis / Signature	Poznamka / Note:			

 Tolerance / Tolerovani ISO 8015 ISO 2768mK	Soubor-model / ASM-file vykres-uchyt	Projekt / Project:	Meritko / Scale 1:1
	Soubor-vykres / DRW-file vykres-uchyt	C.sestavy / Assembly No.	
Nazev / Title UCHYT		Rev.	Cislo vykresu / Drawing No. KKS-DP-002
		List / sheet no. 1	Pocet listu / sheets 1

4

3

2

1

4

3

2

1

A

135

A

24

Ø10 H7

0,5 x45°

24

0,5 x45°

15

A-A

Ra6,3

2



HR 25x280

S235

0,590

KKS-DP-000

3

Pocet ks.

Nazev - rozmer

Polotovar

Material

T.O.

C.hmot.

Hr.hmot.

Cislo vykresu sestavy

Poz.

Quant.

Title - size

Blank

Material

C.W.

Weight

R. weight

Assembly drawing no.

Pos.

CAD 1

Datum / Date

Jmeno / Name

Kreslil /
Drawn by

13.12.2016

KOCOUREK MARTIN

Prezkousel /
Checked bySchvalil /
Approved byUNIVERSITY
OF WEST BOHEMIA

Vsechna prava vyhrazena / All rights reserved

Index zmeny

Popis zmeny / change description

Schval. / APP

Datum / Date

Podpis / Signature

Poznámka / Note:

Tolerance /
Tolerovani

Soubor-model / ASM-file

vykres-upinka

Projekt /
Project:

Meritko / Scale

ISO 128

ISO 8015
ISO 2768mK

Soubor-vykres / DRW-file

vykres-upinka

C.sestavy /
Assembly No.

1:1

Nazev / Title

Rev.

Cislo vykresu / Drawing No.

Format

UPINKA

KKS-DP-003

A4

List / sheet no.

1

Pocet listu / sheets

1

4

3

2

1

4

3

2

1

D

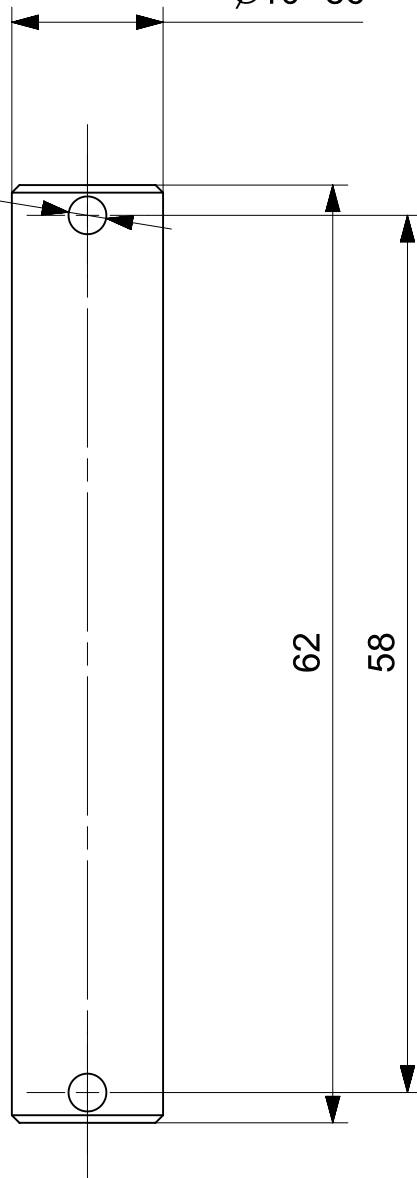
D

C

C



B


B

2x $\varnothing 2,5$ $\varnothing 10 \text{ e6}$ 

Ra6,3

2	<input checked="" type="checkbox"/>	KR $\varnothing 12 \times 140$	S235		0,037		KKS-DP-000	4
Pocet ks.	Nazev - rozmer	Polotovar	Material	T.O.	C.hmot.	Hr.hmot.	Cislo vykresu sestavy	Poz.
Quant.	Title - size	Blank	Material	C.W.	Weight	R. weight	Assembly drawing no.	Pos.

CAD 1	Datum / Date	Jmeno / Name			  <small>Vsechna prava vyhrazena / All rights reserved</small>
Kreslil / Drawn by	13.12.2016	KOCOUREK MARTIN			
Prezkousel / Checked by					
Schvalil / Approved by					
Index zmeny	Popis zmeny / change description	Schval. / APP	Datum / Date	Podpis / Signature	Poznamka / Note:

 Tolerance / Tolerovani ISO 8015 ISO 2768mK	Soubor-model / ASM-file vykres-cep	Projekt / Project:	Meritko / Scale 2:1
	Soubor-vykres / DRW-file vykres-cep	C.sestavy / Assembly No.	
Nazev / Title CEP		Rev.	Cislo vykresu / Drawing No. KKS-DP-004
		List / sheet no. 1	Pocet listu / sheets 1
		Format A4	

4

3

2

1

A

A

4

3

2

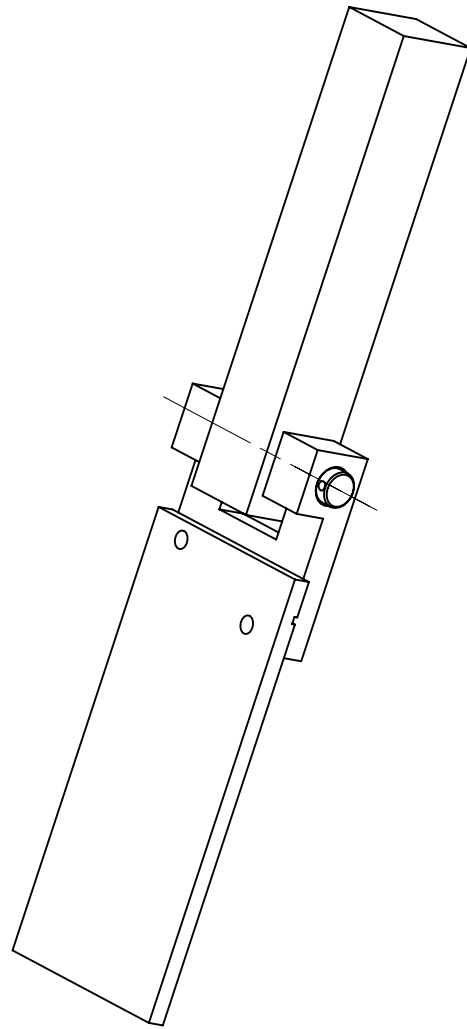
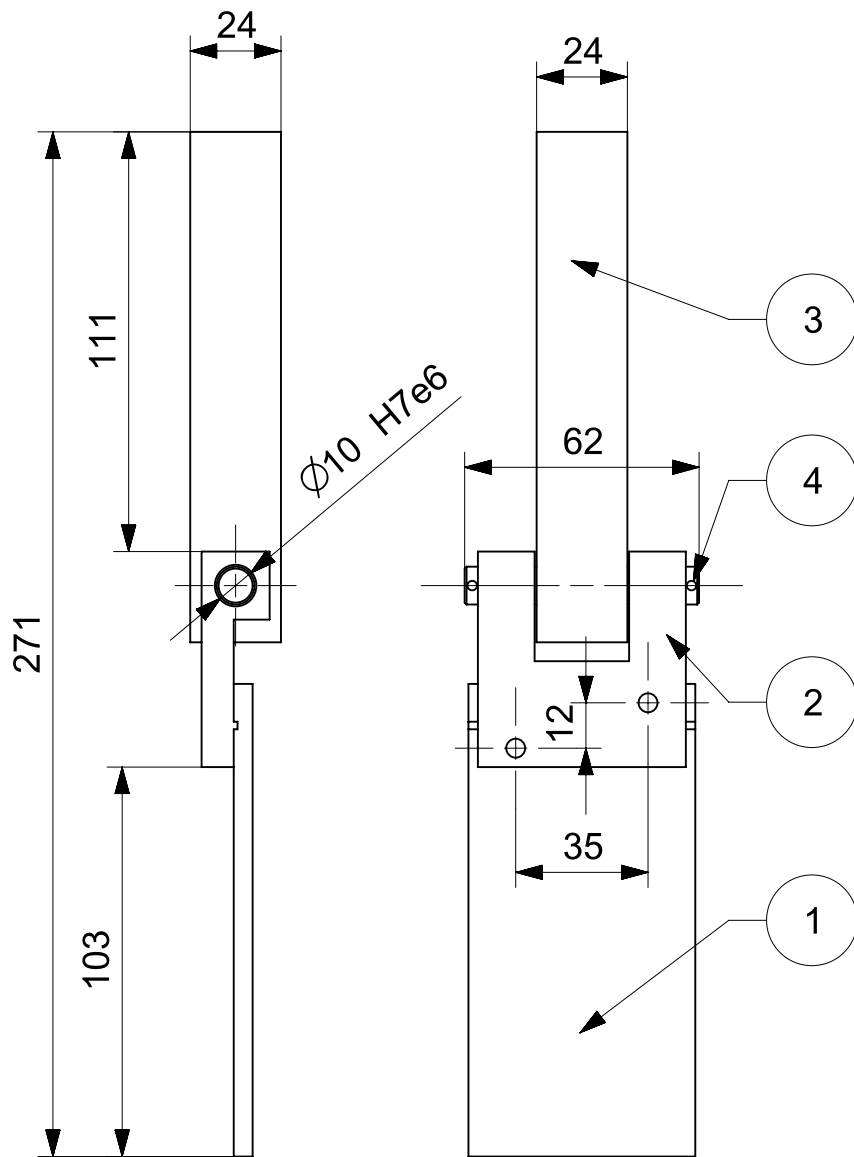
1

D

D

C

C



B

B

4	CEP	KR \varnothing 12x140	S235	0,04	2
3	UPINKA	HR 25x280	S235	0,59	2
2	UCHYT	PLO 60x2-120	S235	0,18	2
1	DESKA	PLO 60x5-1100	S235	0,29	8
Poz.	Nazev	Polotovar	Material	Hmotnost	Pocet ks.
Pos.	Title	Blank	Material	Weight	Quant.

A

A

CAD 1	Datum / Date		Jmeno / Name		
Kreslil / Drawn by	13.12.2016		KOCOUREK MARTIN		
Prezkousel / Checked by					
Schválil / Approved by					
Index zmeny	Popis zmeny / change description	Schval. / APP	Datum / Date	Podpis / Signature	



UNIVERSITY
OF WEST BOHEMIA



Vsechna prava vyhrazena / All rights reserved

Poznámka / Note:

 ISO 128 Tolerance / Tolerovani ISO 8015 ISO 2768mK	Soubor-model / ASM-file	sestavaa
	Soubor-vykres / DRW-file	sestavaa

Projekt / Project:	Meritko / Scale
C.sestavy / Assembly No. 000	1:2
C.hmot.sestavy 1,1	

Nazev / Title
PRIPRAVEK - VZORKY

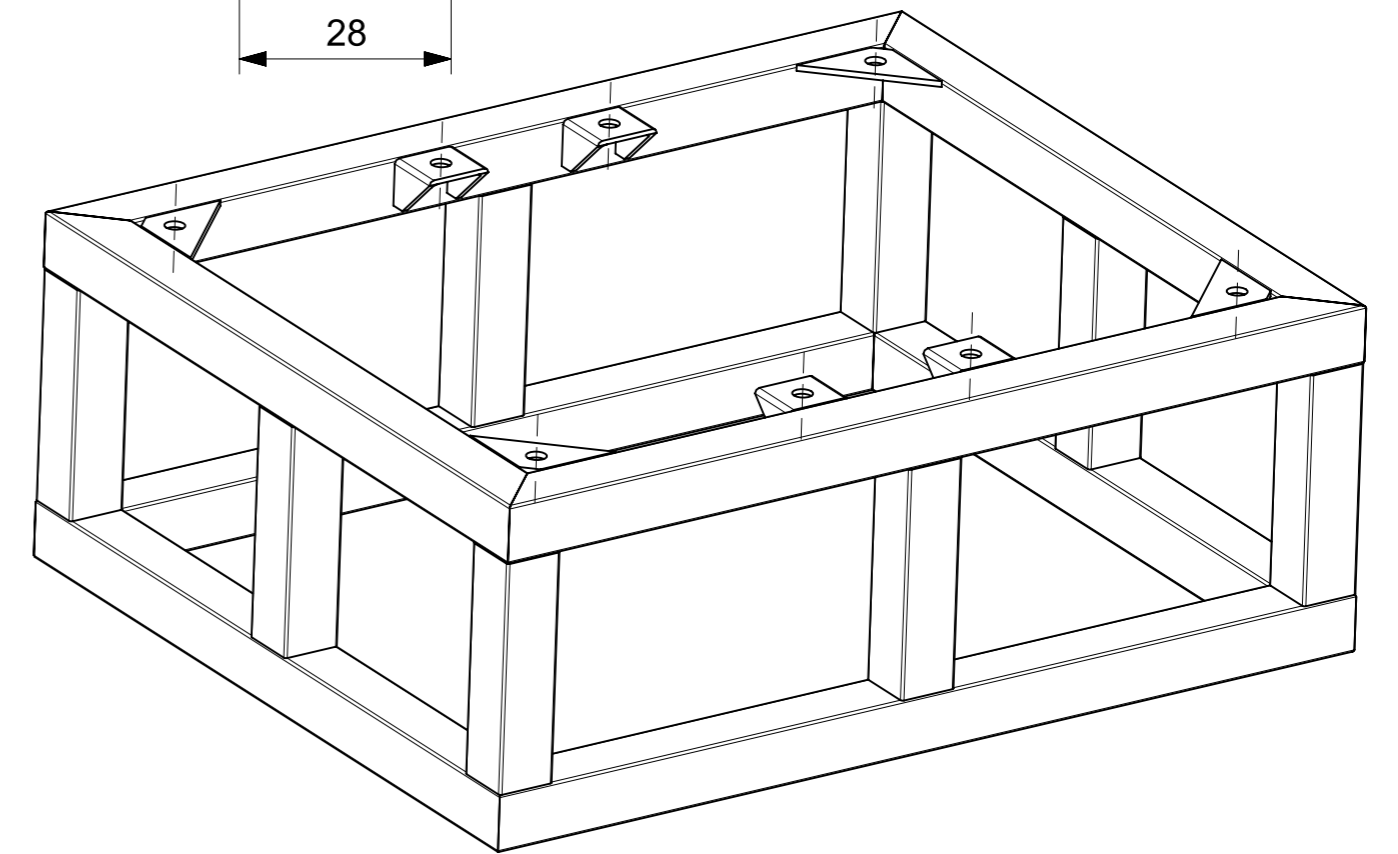
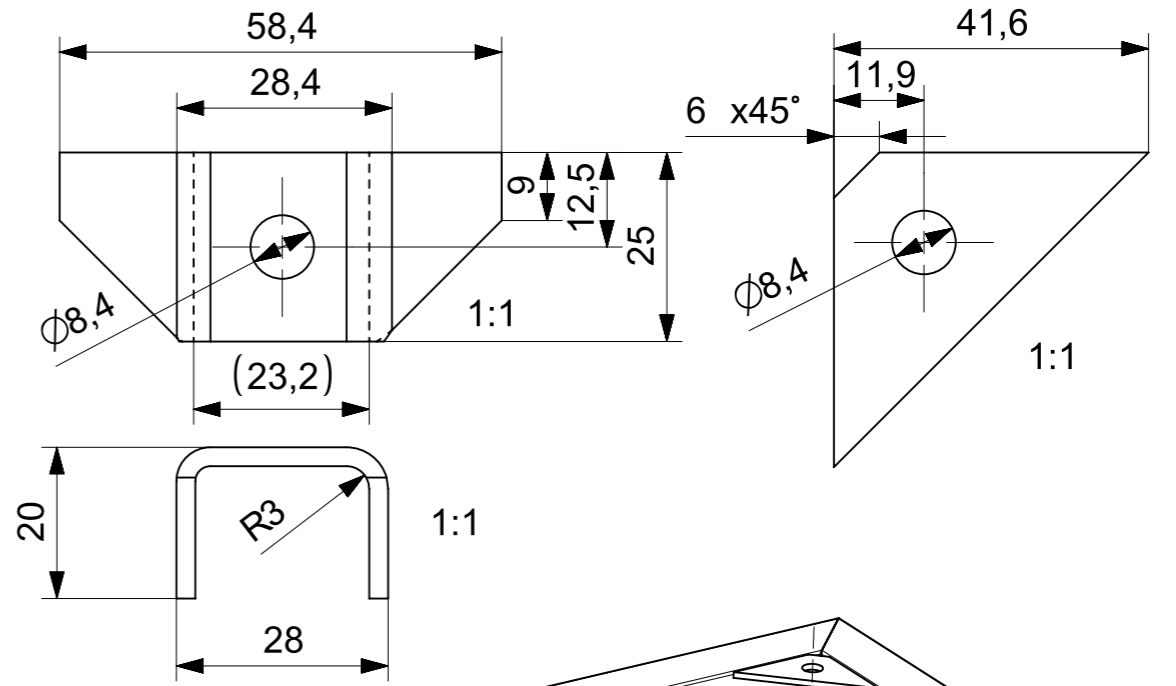
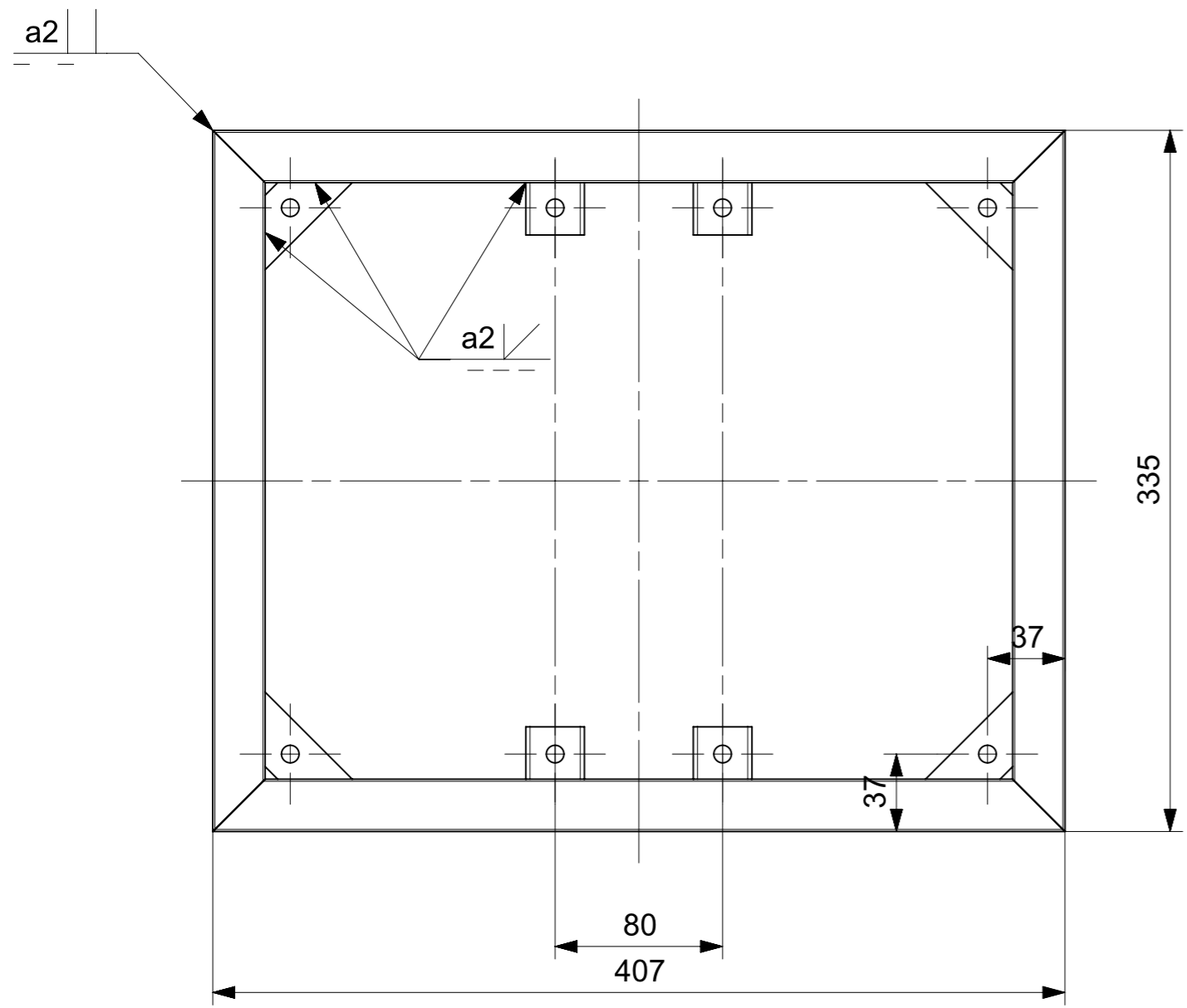
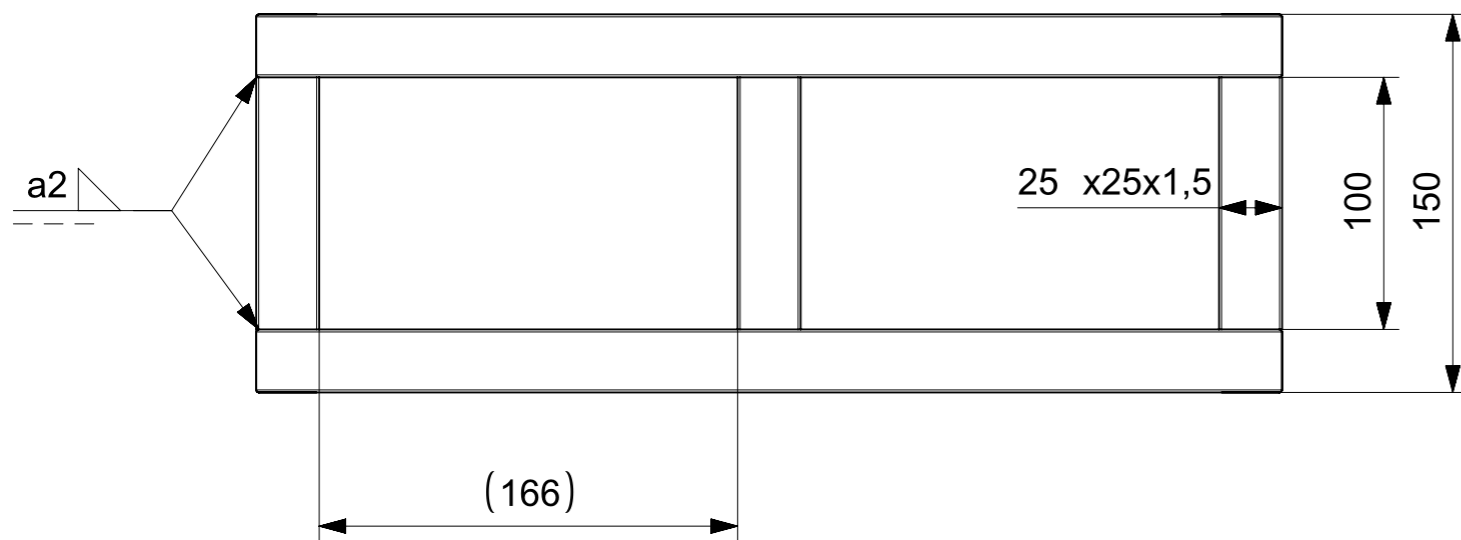
Rev. Císlo vykresu / Drawing No.
KKS-DP-000
Format
A4
List / sheet no. 1 Pocet listu / sheets 1

4

3

2

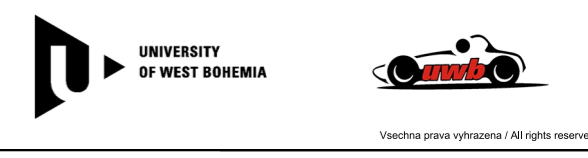
1



Všechny jekly 25x25x1,5
Držáky - výpalky - plech 2,5

Svařováno metodou TIG

Poz.	Nazev	Polotovár	Material	Hmotnost	Pocet ks.
Pos.	Title	Blank	Material	Weight	Quant.
CAD 1		Datum / Date		Jmeno / Name	
Kreslil / Drawn by		5.2.2017		KOCOUREK MARTIN	
Prezkoušel / Checked by					
Schválil / Approved by					
Index zmeny	Popis zmeny / change description	Schval. / APP	Datum / Date	Podpis / Signature	Poznámka / Note:
Tolerance / Tolerovani ISO 128 ISO 8015 ISO 2768mK		Soubor-model / ASM-file		Projekt / Project:	
		pripriavek_IA		C.sestavy / Assembly No. 100	
		Soubor-vykres / DRW-file		C.hmot.sestavy	
		pripriavek_IA		Meritko / Scale 1:3	
Nazev / Title			Rev.		Cislo vykresu / Drawing No.
PRIPRAVEK-DEFOCLEN					KKS-DP-100
			List / sheet no. 1		Pocet listu / sheets 1
					Format A3



Vsechna prava vyhrazena / All rights reserved