



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

VÝVOJ ABSORBÉRU RÁZOVÉ ENERGIE S VYUŽITÍM KOVOVÉHO 3D TISKU

DEVELOPMENT OF THE IMPACT ENERGY ABSORBER MADE BY METAL 3D PRINTING

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Vít Kraicinger

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Radek Vrána, Ph.D.

BRNO 2020

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav konstruování
Student:	Vít Kraicinger
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce:	Ing. Radek Vrána, Ph.D.
Akademický rok:	2019/20

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Vývoj absorberu rázové energie s využitím kovového 3D tisku

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Jedním z důležitých požadavků na závodní automobily týmů formule student je bezpečnost řidiče. Každý závodní automobil proto musí být vybaven speciální deformační zónou (absorbérem), která odolá definovanému rázovému zatížení a tím ochrání řidiče při možném nárazu vozidla. S postupným vývojem v oblasti kovového 3D tisku je možné pro tyto aplikace využít mikro–prutové struktury vyrobené aditivním způsobem z kovového materiálu. To umožní snížit hmotnost současného absorberu a lépe řídit průběh deformace absorberu.

Typ práce: rešeršní

Cíle bakalářské práce:

Hlavním cílem bakalářské práce je rešerše v oblasti deformačních zón karosérie automobilu se zaměřením na možnosti využití technologie Selective Laser Melting (SLM) a návrh deformační zóny (absorbéru) pro závodní automobil formule student. Získané výsledky by měly umožnit navrhnout experimenty pro získání potřebných parametrů a vytvořit předběžnou představu o výsledných parametrech absorbéru, tj. předběžné rozměry, vhodný tvar struktury atd.

Dílčí cíle bakalářské práce:

- rešerše v oblasti pasivní bezpečnosti pasažérů při nárazu automobilu,
- rešerše v oblasti využití strukturovaného materiálu pro absorpci energie se zaměřením na technologii SLM,
- analýza získaných výsledků a návrh experimentů pro získání potřebných parametrů v budoucnu,
- zjednodušený návrh absorbéru na základě získaných parametrů z rešerše,
- 3D CAD model absorbéru.

Požadované výstupy: průvodní zpráva, fotografická dokumentace, digitální data.

Rozsah práce: cca 27 000 znaků (15 – 20 stran textu bez obrázků).

Časový plán, struktura práce a šablona průvodní zprávy jsou závazné:

<http://ustavkonstruovani.cz/texty/bakalarske-studium-ukonceni/>

Seznam doporučené literatury:

VRANA, Radek, Ondrej CERVINEK, Pavel MANAS, Daniel KOUTNY a David PALOUŠEK. Dynamic Loading of Lattice Structure Made by Selective Laser Melting-Numerical Model with Substitution of Geometrical Imperfections. *Materials* [online]. 2018, 11(11). DOI: 10.3390/ma11112129. ISSN 1996-1944.

VRANA, Radek, Daniel KOUTNY, David PALOUSEK a Tomas ZIKMUND. Impact Resistance of Lattice Structure Made by Selective Laser Melting from AISi12 Alloy. *MM Science Journal* [online]. 2015, 2015(04), 852-855. DOI: 10.17973/MMSJ.2015_12_201547. ISSN 18031269.

VRANA, Radek, Daniel KOUTNY a David PALOUSEK. Impact Resistance of Different Types of Lattice Structures manufactured by SLM. *MM Science Journal* [online]. 2016, 2016(06), 1579-1585. DOI: 10.17973/MMSJ.2016_12_2016186. ISSN 18031269.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2019/20

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

V dnešní době se pro absorpci energie využívají především různě profilované díly. Pro speciální případy jsou navrženy přesné komponenty, jako je tomu u Formule Student, kde se používá deformační člen se strukturou honeycomb. Tato bakalářská práce je zaměřena na návrh absorberu nárazové energie vyrobeného pomocí technologie SLM a mikro-prutových struktur. Pro samotný návrh byl vytvořen ucelený přehled současného poznání v oblasti deformačních zón, absorberu energie a výzkumů zabývajících se absorpcí energie. Na základě rešerše byl vybrán nejvhodnější materiál pro výrobu AlSi10Mg. Následně byl určen vhodný typ mřížky (BCC) a veškeré parametry mikro-prutové struktury. Pro zvolené parametry byly vymodelovány dva absorbery energie s rozdílným průměrem prutu (0,4 mm a 0,8 mm) a rozdílnou velikostí mřížky (4 mm a 8 mm). V závěru práce jsou dva zjednodušené výpočty, které ukazují předpovídané výsledné hodnoty navržených absorberů a tuhost vrstev mikro-prutové struktury s proměnnou hustotou.

KLÍČOVÁ SLOVA

Formula Student, absorber energie, mikro-prutová struktura, Selective Laser Melting, deformační člen

ABSTRACT

Today, variously profiled parts are mainly used for energy absorption. For special cases, precise components are designed, as in the case of Formula Student, where a deformation article with a honeycomb structure is used. This bachelor thesis is focused on the design of an impact energy absorber made by SLM technology and lattice structures. For the design itself, a comprehensive overview of current knowledge in the field of deformation zones, energy absorbers and researches dealing with energy absorption was created. Based on the study, the most suitable material to produce AlSi10Mg was selected. Subsequently, the appropriate type of grid (BCC) and all parameters of the lattice structure were determined. Two energy absorbers with different struts diameters (0.4 mm and 0.8 mm) and different grid sizes (4 mm and 8 mm) were modeled for the selected parameters. At the end of the work are two simplified calculations that show the predicted final values of the proposed absorbers and the stiffness of the layers of the lattice structure with graded density.

KEYWORDS

Formula Student, energy absorber, lattice structure, Selective Laser Melting, deformation article

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KRAICINGER, Vít. *Vývoj absorberu rázové energie s využitím kovového 3D tisku* [online]. Brno, 2020 [cit. 2020-06-17]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/125733>.
Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování. Vedoucí práce Radek Vrána.

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Radku Vránovi, Ph.D. za odborné vedení, ochotu a přínosné rady. Také bych rád poděkoval týmu TU Brno Racing za poskytnutí potřebných informací a rad. Dále bych chtěl poděkovat své rodině, přítelkyni a blízkým přátelům za jejich podporu a trpělivost.

PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE

Prohlašuji, že bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně, pod odborným vedením Ing. Radka Vrány, Ph.D. Současně prohlašuji, že všechny zdroje obrazových a textových informací, ze kterých jsem čerpal, jsou řádně citovány v seznamu použitých zdrojů.

.....

Podpis autora

OBSAH

1	ÚVOD	13
2	ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE	15
2.1	ANALÝZA PROBLÉMU	15
2.2	Cíl práce	16
3	PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ	17
3.1	Limitní hodnoty při nárazu	17
3.2	Nárazové zkoušky pasivní bezpečnosti	19
3.2.1	Nejčastější typy nárazových zkoušek	19
3.3	Deformační zóny	21
3.3.1	Deformační zóna u Formula Student	22
3.3.2	Absorbéry nárazové energie	23
3.4	Absorbér nárazové energie Formula Student	25
3.4.1	Používané typy deformačních členů	27
3.5	Technologie Selective Laser Melting (SLM)	29
3.5.1	Materiály pro aditivní výrobu	30
3.5.2	Využití strukturovaných materiálů pro absorpci energie	31
3.5.3	Výzkumy v oblasti mikro-prutových struktur	32
4	DISKUZE	38
4.1	Okrajové podmínky pro návrh absorbéru	38
4.2	Porovnání materiálů pro aditivní výrobu SLM	39
4.3	Porovnání rozložení hustoty a základních typů mřížek	41
4.4	Testování absorbéru nárazové energie	43
4.5	Výpočet tuhosti vrstev s proměnnou hustotou	44
4.6	Výsledný návrh absorbéru energie	45
5	ZÁVĚR	49
6	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	50
7	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN	53
8	SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ	55

9	SEZNAM TABULEK	57
10	SEZNAM PŘÍLOH	58

1 ÚVOD

V současné době je velkým tématem v automobilovém průmyslu bezpečnost vozů a cestujících. K tlumení velké nárazové energie se používají absorbéry a deformační zóny vozu. Absorbéry jsou nejčastěji plechové prvky (trubky, jehlany), které se během nárazu řízeně deformují a tím se snižuje kinetická energie vozu. Změnou tvaru, použitého materiálu nebo vyvrtání děr, lze řídit deformaci [1].

Stejný problém se musí řešit i v projektu Formula Student. Formula Student (FS) je prestižní evropská soutěž univerzitních týmů. Jeden z hlavních cílů soutěže je naučit mladé konstruktéry pracovat v týmech na reálných problémech. Každý tým musí každý rok navrhnout a následně postavit nový monopost. Následně se konají závody, kde proti sobě týmy soutěží ve statických i dynamických disciplínách. V dynamických disciplínách hraje velkou roli váha monopostu, a proto se ty nejlepší týmy snaží ušetřit téměř každý gram na autě a snaží se každou součást co nejlépe odlehčit. Závody mají ovšem spoustu pravidel, především na bezpečnost vozu a ochranu řidiče. Jedním z hlavních prvků bezpečnosti vozu je deformační člen umístěný v přední části vozu [2]. Deformační člen musí splňovat spoustu parametrů dané pravidly, mezi které patří absorbovaná energie, průměrné a maximální zpomalení [3]. Deformační člen má také dané nejmenší možné rozměry, a proto jeho váhu především určuje hustota, materiál a způsob výroby.



obr. 1-1 Formulový vůz týmu TU Brno Racing, Dragon 9 [2]

Často jsou také využívány různé kombinace absorbéru, díky porézním materiálům, tvořené pravidelně se opakující strukturou (kovové pěny). Hliníkové pěny jsou velmi pórovité, a proto i lehké. V pórech se vyskytuje plyn, který tvoří pružný člen při nárazu. Běžný deformační člen se vyplní pěnovým materiálem, a tím získá lepší absorpční vlastnosti. Méně často se vyskytují absorbéry hydraulické nebo pneumatické [1].

Využitím alternativní metody Selective Laser Melting (SLM) a mikro-prutových struktur, by bylo možné tvořit kombinované deformační členy a jiné součásti vozů. Technologie umožňuje výrobu členů z různých materiálů. Díky SLM technologii je možné přesně určit tvar strukturovaného materiálu, a tím i lépe řídit samotnou deformaci a absorpci energie.



obr. 1-2 Použití mikro-prutové struktury vyrobené metodou SLM [4]

Motivací pro práci bylo snížení hmotnosti absorbéru energie formulového vozu. Vzhledem k velkému množství omezení, díky pravidlům, se dá váha ušetřit buď změnou materiálu, geometrie, anebo jeho způsobem výroby. Metoda SLM umožňuje výrobu velmi složitých a specifických struktur, jako jsou mikro-prutové struktury. Z tohoto důvodu byla zvolena výroba z mikro-prutových struktur pomocí SLM metody. Struktura musí mít nejen velmi dobré absorpční vlastnosti, které vyžadují pravidla soutěže, ale i co nejnižší hmotnost.

2 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

2.1 ANALÝZA PROBLÉMU

Pro možný návrh účinného absorbéru nárazové energie vyrobeného metodou SLM ať už pro potřeby osobního automobilu, nebo pro vůz Formula Student, je nutné zjistit maximální možná zatížení, která lidské tělo vydrží. Maximální zatížení na člověka, minimální množství absorbované energie, zrychlení působící během testu a minimální rozměry jsou okrajové podmínky pro návrh absorbéru.

V dnešní době se pro lepší absorpci energie používá výplň z kovové pěny. Ovšem vnitřní struktura těchto prvků je částečně nahodilá a řízení absorpce je obtížné. Pro lépe řízenou absorpci energie je možné využít technologii SLM a místo dutých jehlanů a trubek použít výplň z mikro-prutových struktur. Absorbéry vyrobené SLM technologií, vyplněné mikro-prutovou strukturou by získaly mnohem lepší vlastnosti.

Mikro-prutové struktury je velmi obtížné navrhout. Při vytváření nové struktury je zde mnoho důležitých parametrů, jako jsou tvar mřížky, velikost prutů nebo i samotný materiál vyráběného dílu, které přímo ovlivňují výsledné vlastnosti struktury. Pro správný a co nejlepší návrh samotného absorbéru, je potřeba najít současné výzkumy z oblasti mikro-prutových struktur. Následně analyzovat získaná data, především mechanické vlastnosti a využít je pro vymodelování deformačního členu.

Pro efektivní fungování absorbéru musí být vybrán materiál, který má vhodnou kombinaci mechanických vlastností. V dnešní době je umožněno vyrábět díly z mnoha různých materiálů, jako jsou slitiny hliníku (AlSi10Mg) nebo slitiny titanu (Ti6Al4V). Je nutné vybrat materiál, který má velmi dobré absorpční vlastnosti, ale zároveň poměrně dobrou tuhost, aby se mohl deformační člen řízeně deformovat. Na základě rešerše a po zanalyzování dat z výzkumů bude vybrán nejvíce vhodný typ mřížky, všechny potřebné parametry a materiál s nejvhodnější kombinací mechanických vlastností (tuhosti a absorbované energie) pro samotný návrh absorbéru nárazové energie.

2.2 Cíl práce

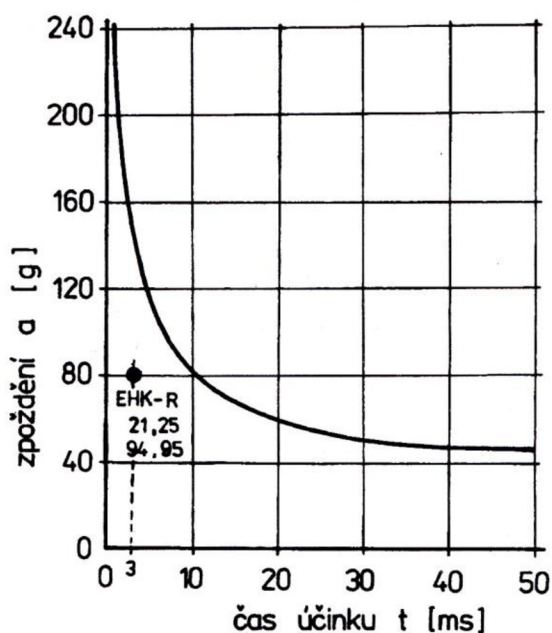
Hlavním cílem práce je vypracovat přehled současného stavu poznání v oblasti bezpečnostních prvků automobilů a vozů Formula Student se zaměřením na možnost využití technologie SLM. Po zpracování výsledků by měly být určeny parametry (přibližné rozměry, tvar struktury, průměr prutu atd.) pro návrh absorbéru nárazové energie a způsobu jeho testování. Dále by měly být určeny přibližné výsledky navrženého deformačního členu. Dílčí cíle bakalářské práce:

- rešerše v oblasti bezpečnosti pasažérů při nárazu automobilu (maximální možné hodnoty)
- porovnání deformačních zón automobilu a formulového vozu
- ucelený přehled nejdůležitějších pravidel pro návrh deformačního členu
- rešerše v oblasti současných výzkumů s využitím SLM pro absorpci energie
- porovnání nejvhodnějších parametrů pro návrh absorbéru
- návrh nového absorbéru na základě získaných dat
- 3D CAD model navrženého deformačního členu

3 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

3.1 Limitní hodnoty při nárazu

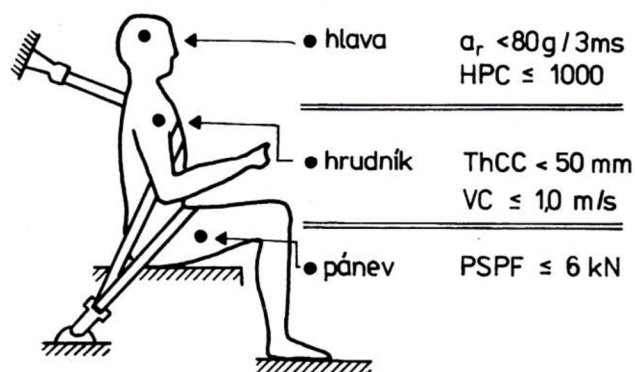
Pro návrh a konstrukci absorbéru energie jsou velmi důležité limitní hodnoty zrychlení, toutle problematikou se zabývá biomechanika. Biomechanika je vědní obor, který zkoumá mechanickou odolnost lidského těla a popisuje mechanismus poranění během nárazu. Pomocí pokusů a experimentů sleduje řadu faktorů, jako jsou špičkové zpomalení a zrychlení, střední zrychlení, změnu hodnot zrychlení v závislosti na čase, lokalizaci sil působících na tělo atd. Z hodnot se následně vypracují všechny mezní hodnoty odolnosti člověka, různé formy kritické pevnosti tkání, orgánů a jejich seskupení (hlava, trup, končetiny apod.). Jedny z nejdůležitějších biomechanických kritérií jsou maximální zatížení člověka při zpoždění, poranění hlavy, hrudníku a vnitrobřišních orgánů při nehodě [1].



obr. 3-1 WSU - křivka [1]

Kritéria ochrany (bezpečnostní limity) jsou mezní hodnoty pro mechanické zatížení (síly, zrychlení), které se měří při experimentech na zkušebních figurínách a které nesmí být při konstrukci nového dopravního prostředku překročeny. Limity pro zatížení hlavy (lidského mozku) jsou určeny WSU – křivkou (Wayne State University), která udává translační zpoždění hlavy v závislosti na době účinku (obr. 3-1) [1].

Hodnoty nad WSU – křivkou jsou považovány za životu nebezpečné, hodnoty pod křivkou pak za únosné. I když byla tato křivka stanovena pouze z experimentu čelního nárazu hlavy na rovnou plochu, je na jejím základě stanoven limit 80 g po dobu 3 ms pro špičkové zpoždění hlavy i v ostatních směrech (boční) [1].



obr. 3-2 Limitní hodnoty pro lidské tělo [1]

Při zkoušce čelního nárazu vozidla byly také stanoveny hraniční hodnoty v oblasti hrudníku a dolní části těla. Hlavními faktory jsou průhyb a síla. Biomechanické stlačení hrudníku nesmí být větší než 50 mm. Kritérium stlačení holenní kosti musí být menší než 8 kN. Při zkoušce bočního nárazu nesmí být deformace žebér větší než 42 mm. Kritérium pánve musí být menší než 6 kN a maximální zatížení břicha nesmí přesáhnout 2,5 kN (obr. 3-2) [1].

3.2 Nárazové zkoušky pasivní bezpečnosti

Nárazové zkoušky jsou nezbytnou součástí pro určení, zda vozidlo splňuje kritéria určené z biomechaniky. Zkoušky mají schválený a uznávaný způsob posuzování bezpečnosti. Testy bývají velice nákladné, a proto se co nejvíce organizací snaží tyto testy simulovat. Výsledky z testů jsou hlavní porovnávací kritéria mezi ostatními vozy. Mezi ty nejvýznamnější organizace patří evropská Euro NCAP a americké NHTSA a IIHS [5]. Zkoušky bezpečnosti jsou také nezbytnou podmínkou pro ověření konstrukce vozu Formula Student.

3.2.1 Nejčastější typy nárazových zkoušek

Částečný čelní náraz – reprezentuje nejčastější typ srážky automobilů a provádí se do deformovatelné bariéry, která je vyrobena z hliníkové překážky (hliníkové voštiny). Test je uskutečněn při rychlosti 64 km/h a nárazovou plochou během testu je 40 % přední části vozu. Aby vůz byl považován za správně zkonstruovaný, musí se přední deformační zóna deformovat kontrolovatelným způsobem a pohltit veškerou energii, zatímco prostor pro posádku musí zůstat nepoškozený [6].



obr. 3-3 Částečný čelní náraz do deformovatelné bariéry [6]

Plný čelní náraz – důvodem vzniku zkoušky byla stále tužší konstrukce automobilu, která sice zajistí bezpečný prostor pro posádku bez vnikajících cizích těles, ale zároveň znamená menší absorpci energie. Během zkoušky plného čelního nárazu jede automobil rychlostí 50 km/h a naráží do zcela pevné bariéry se 100 % překrytím. Test je zaměřen na zádržné systémy a deformační části vozu, které zmenšují zrychlení působící na posádku vozu [7].



obr. 3-4 Plný čelní náraz do pevné bariéry [7]

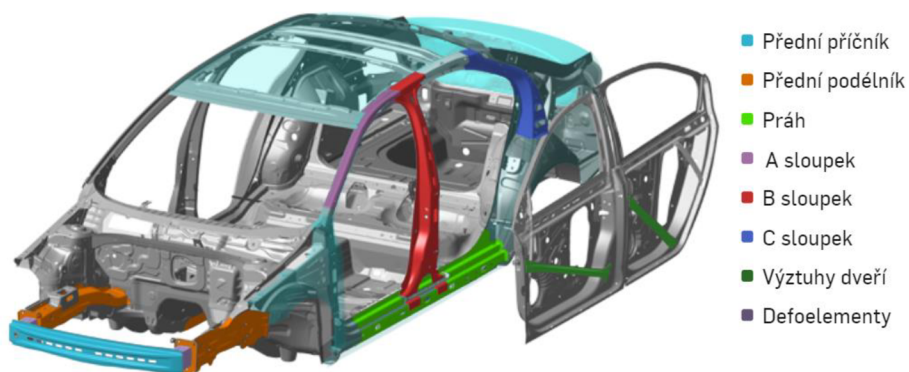
Boční náraz – náraz se simuluje pomocí vozíku o hmotnosti 950 kg s přední deformovatelnou částí představující deformační zóny druhého vozu, který narazí rychlostí 50 km/h do boku stojícího. Na boku vozu není moc prostor, a proto zde není velká možnost pro řízenou absorpci energie. Při testu mají největší vliv na výsledek a bezpečí řidiče boční a hlavové airbagy [8].



obr. 3-5 Boční náraz vozu do deformovatelné bariéry [8]

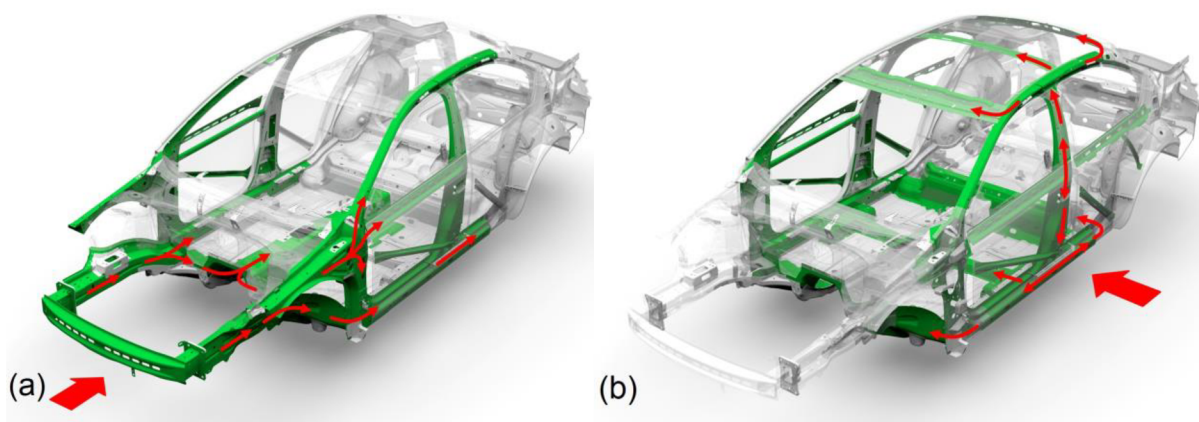
3.3 Deformační zóny

Každá karoserie moderního vozu je konstruována ze dvou základních částí, stejně tak je to i pro formuli Student. Kabina, která je velmi tuhá a tzv. deformačními zónami. Kabina musí zůstat co nejméně poškozená (nepohnutá), aby bylo možné otevřít dveře a nepronikla cizí tělesa do vozu. Karoserie vozu je konstruována z různých materiálů, tak aby každý splňoval požadavek kladený jeho funkcí. Největší deformační zóny v přední a zadní části vozu [9].



obr. 3-6 Klíčové části karoserie osobního automobilu [9]

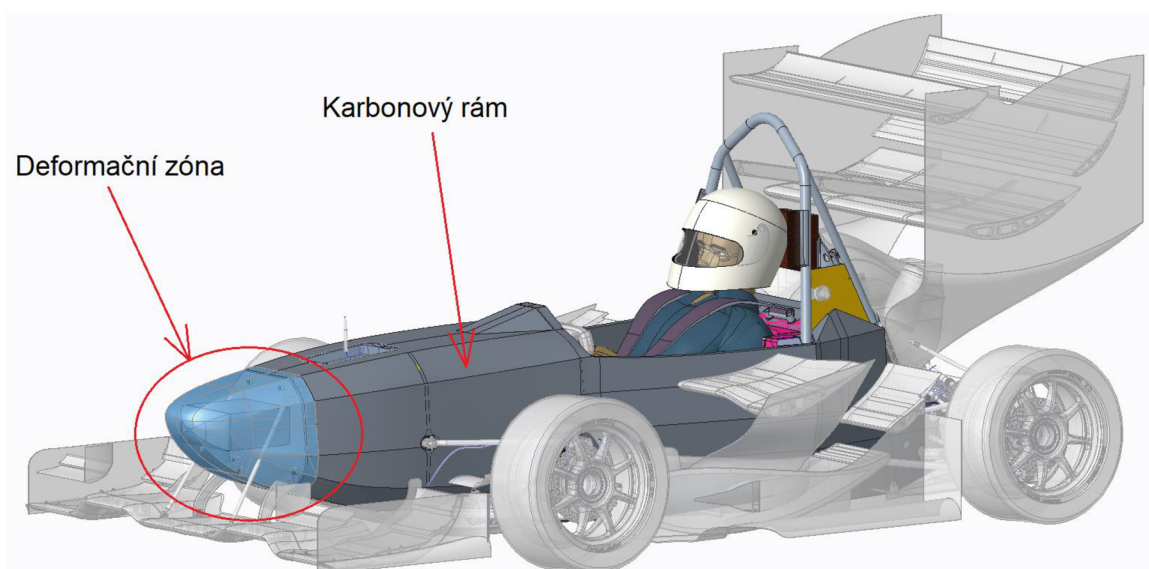
Deformační zóny a části karoserie určené k deformaci jsou navrhovány tak, aby bylo možné řídit jejich deformaci. Síly prochází přes deformační části, kde se výrazně sníží jejich velikost a následně vede do karoserie kabiny (obr. 3-7). Zbytkové síly působící na řidiče jsou utlumeny zádržnými systémy (pásy, airbasy). V bočních částech vozu se často využívá vyplnění sloupků pěnovým materiálem. S vyplněním prvků vzroste jejich potenciál pro řízené absorbování energie a řízení absorpce [9].



obr. 3-7 Rozložení sil (a) působících při čelním nárazu; (b) působících při bočním nárazu [9]

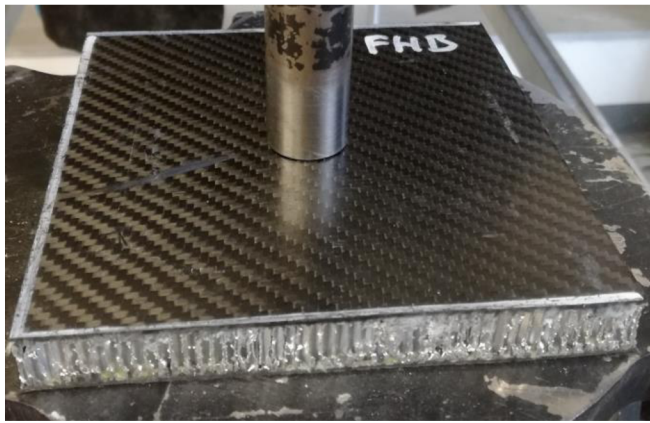
3.3.1 Deformační zóna u Formula Student

Ve vozu Formula Student je řešená struktura rámu velmi podobně, i když méně sofistikovaně. Základní konstrukci vozu tvoří chassis (rám) z karbonové struktury, který je velmi tuhý a stejně jako v osobním automobile musí zůstat při nárazu co nejméně poškozený. Struktura rámu (monokoku) je tvořena ze tří vrstev. První a poslední vrstva je tvořena z několika vrstev různých karbonových vláken. Do těchto dvou vrstev se zalaminuje hliníková voština, která tvoří prostřední vrstvu struktury (obr. 3-9). Tato struktura je oproti klasickému trubkovému rámu mnohem lehčí, ale zároveň i tužší. Tuhost rámu je potřebná nejen pro bezpečnost řidiče, ale i pro správné fungování podvozku.



obr. 3-8 Ilustrační obrázek deformačních zón formulového vozu

Zatímco u osobního automobilu je celá řada deformačních prvků v přední část (motorový prostor) vozu, které absorbují vzniklou rázovou energii. Na vozu Formula Student je pouze jediný deformační člen, umístěný v přední části. Z toho důvodu musí být deformační člen velmi pečlivě navržený a musí být schopen absorbovat velké množství energie. Organizace Formula Student klade velký důraz na bezpečnost deformačního členu, širší popis v kapitole (3.4)



obr. 3-9 Karbonová struktura formulových vozů [2]

3.3.2 Absorbéry nárazové energie

Slouží k pohlcování nárazové energie vzniklé při nárazu, především za nízké rychlosti (obr. 3-6). Přes deformační členy by neměla projít větší síla, než jakou vydrží deformační zóny bez trvalých deformací. Jedná se o síly mezi 100–150 kN. Deformační členy pohlcují energii řízeným zdeformováním se do sebe [1]. Dělí se do základních skupin:

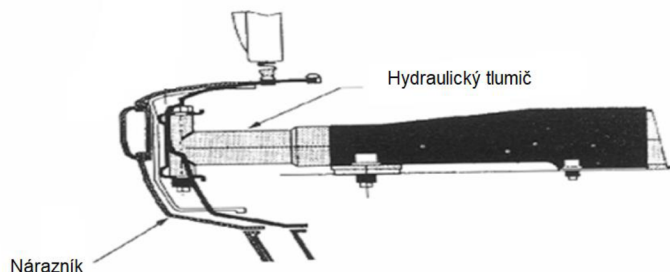
- deformovatelná plechová struktura
- hydraulický absorbér
- konstrukční díly z plastů
- kombinované absorbéry

Deformovatelná plechová struktura – jedná se o nejjednodušší a nejčastěji používaný typ absorbéru (obr. 3-10). Jeho velkou výhodou je, že přenáší síly i v jiných osách, a proto mohou mít nosnou a vodící funkci. Řízená deformace je zajištěna především jeho tvarem a tloušťkou. Nejčastěji používaný je čtyřboký jehlan s prolisy nebo děrováním. Díry oslabují deformační člen, a tím může být dosaženo řízené absorpce [1].



obr. 3-10 Čtyřboký deformační člen s prolisy [10]

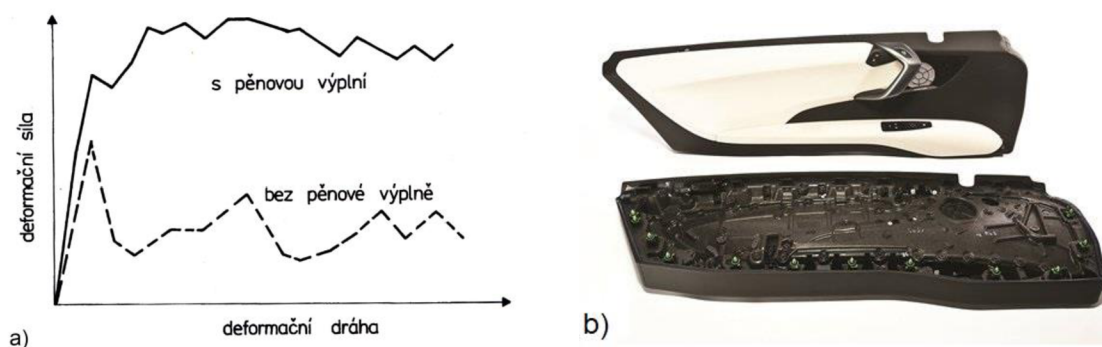
Hydraulický absorbér (tlumič) – pohlcuje energii vlivem proudění kapaliny a jejím tření. Rozdělují se na dva typy děrované a ventilové. Největší rozdíl mezi těmito tlumiči je, že děrovaný má konstantní dráhu, vždy využívá celkový zdvih a je použitelný pouze v jednom směru. Ventilový tlumič má konstantní sílu. Velkou nevýhodou je, že tvoří nosnou část, jsou těžké a velmi nákladné (téměř nepoužívané) [1].



obr. 3-11 Schéma hydraulického tlumiče připojeného k přednímu nárazníku [11]

Konstrukční díly z plastů – poslední dobou jsou velmi využívány. Díky sendvičové technologii je možné konstruovat díly, aby plnily nosnou funkci i deformační funkci. Absorpce energie je dosažena vytlačováním vzduchu ze struktury. Velkou nevýhodou je vznik tepla, který má špatný vliv na materiál. Využívají se jako výplně dveří a občas i nárazníku [1].

Kombinované absorbéry – pěnová (kovová) nebo také voštinová výplň stabilizuje tenkostěnný plechový nosník a zlepšuje jeho řízenou deformaci. Velmi vhodný materiál pro kombinované užití je Arpro, jeho hlavní složkou je polypropylen. Jeho velkou výhodou je relativně nízká hmotnost za vysoké odolnosti. Velmi dobře absorbuje nárazovou energii, a to bez ohledu na směr, ze kterého je náraz proveden. Tato velmi dobrá vlastnost se dá využít právě v automobilním průmyslu, jako výplň dveří nebo nárazníků. Výplně se mohou dát i před hydraulický tlumič a tím zlepšit jeho účinnost. Slouží i jako ochrana pro chodce [1, 12].



obr. 3-12 a) Deformační charakteristika absorbéru s vlivem výplně [1], b) Materiál Arpro pro dveřní panel [12]

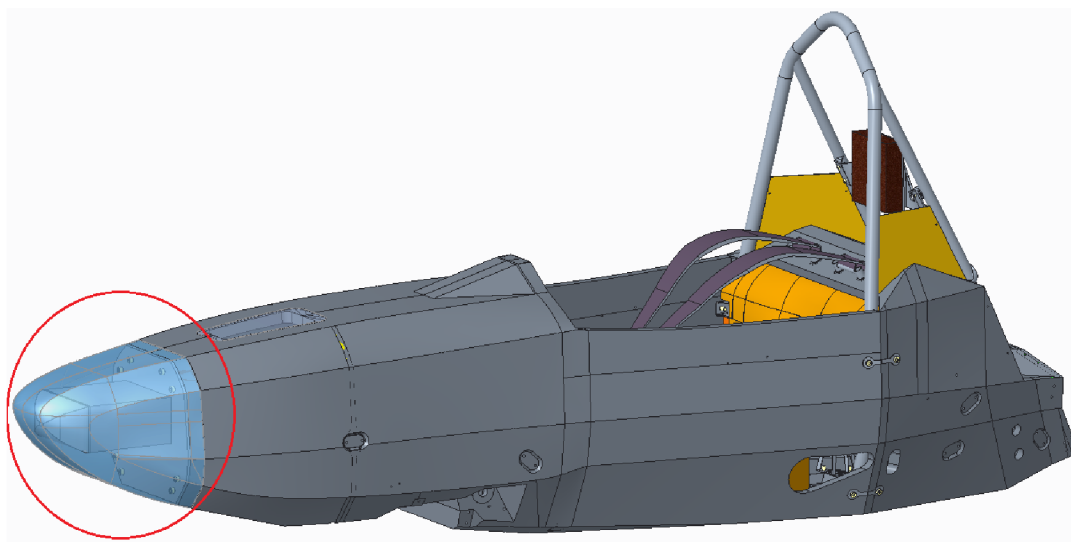
3.4 Absorbér nárazové energie Formula Student

Formula Student je prestižní evropská soutěž univerzitních týmů. Soutěž vznikla v USA roku 1981 a o 17 let později se dostala i do Evropy. Cíl soutěže je, aby každý tým tvořený studenty bakalářského nebo magisterského studia, postavil jednomístný vůz (formuli). Díky soutěži získají studenti spoustu znalostí, ale i známostí. Postavit takový vůz vyžaduje jisté znalosti a spoustu pravidel, zaměřené především na bezpečnost [2].

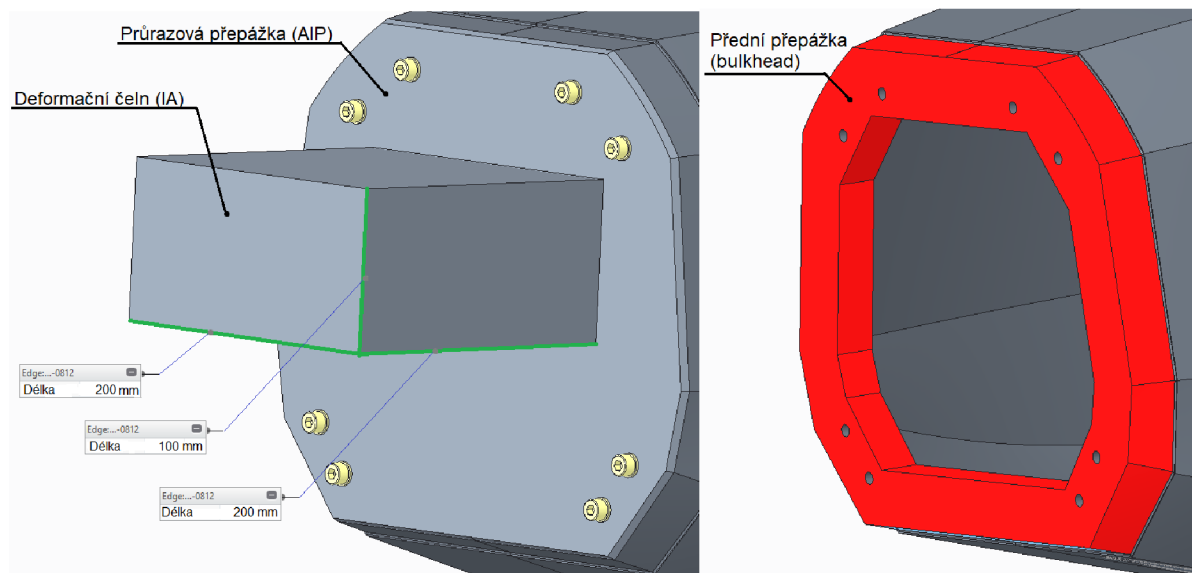
Jedním z hlavních parametrů projektu je bezpečnost, kladená na navrhovaný vůz. Každá formule musí být vybavena deformačním členem v přední části vozu. Pravidla na deformační člen jsou v podstatě rozdělena do dvou skupin. První skupina se zabývá vlastním deformačním členem a jeho instalací a druhá řeší podmínky a pravidla pro testování navrženého členu. Další pod-body jsou čerpány z originálních pravidel pro rok 2020, kde se deformačnímu členu věnuje oblast přibližně o 3 stránkách A4 [3].

Požadavky na deformační člen (obr. 3-13):

- připevněn na přední přepážku (bulkhead)
- nejméně 200 mm dlouhý (měřeno v podélné ose vozidla)
- nejméně 100 mm vysoký a 200 mm široký v minimální vzdálenosti 200 mm od přední části rámu
- bezpečně připevněn přímo k proti průrazové přepážce (Anti Intrusion Plate) a při čelním nárazu nesmí prorazit bulkhead
- nesmí být součástí nosných částí karosérie



obr. 3-13 Konstrukční řešení rámu (chassis) Dragona X



obr. 3-14 Schéma konstrukce přední části formulového vozu

U každého vozu musí být deformační člen připevněn k Anti Intrusion Plate (AIP), který je buď 1,5 mm široký z pevné oceli, nebo 4,0 mm široký z hliníku. Je možné si navrhnout vlastní AIP (např. z karbonových vláken), ale za takových podmínek se musí dělat další testy na samotný plech [3].

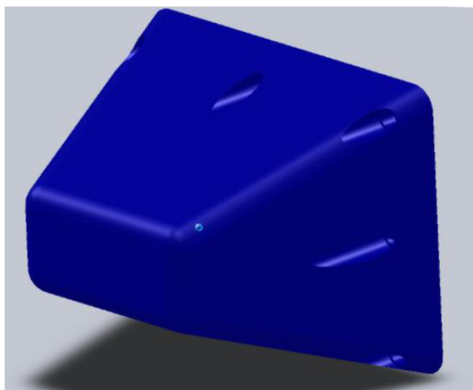
Požadavky pro testování deformačního členu:

- deformační člen připevněný na vůz o hmotnosti 300 kg narazí do absolutně tuhé bariéry rychlostí 7 m/s.
- zpomalení nesmí přesáhnout průměrně 20 g (20násobek tíhového zrychlení) a maximální hodnotu 40 g (40násobek tíhového zrychlení)
- absorbovaná energie musí být minimálně 7350 J
- deformační člen musí být během testování připevněn k AIP a k testovacímu přípravku (přední část vozu) stejným způsobem, jako bude reálné upevnění
- prostor za AIP musí být alespoň 50 mm
- žádná část AIP se nesmí trvale zdeformovat o více než 25 mm za polohu AIP před zkouškou

Dynamické testování deformačního členu se musí provádět pouze na specializovaném testovacím zařízení, jako jsou nárazová kyvadla, padstroje nebo saně. Test může být prováděn na univerzitě, ale jeho obsluha musí být prováděna odborným pracovníkem [3].

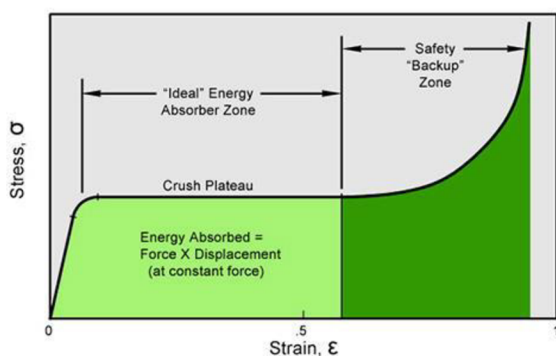
3.4.1 Používané typy deformačních členů

Standardní deformační člen – jedná se o deformační člen poskytovaný organizací Formula SAE. Standardní deformační člen je vyroben z materiálu Dow Impaxx® 700 a většinou jej využívají začínající týmy. Nevýhodou je jeho velká hmotnost (přibližně 700 g) a velké rozměry, díky kterým musí být předek vozů upravený a zvětšený podle pravidel [13].



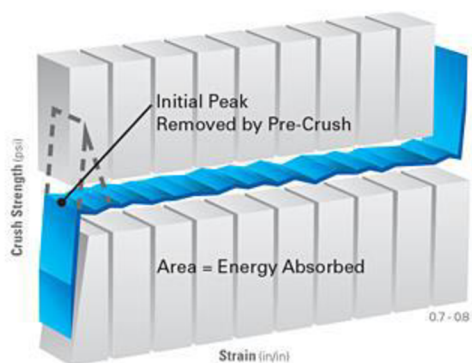
obr. 3-15 Standardní deformační člen poskytovaný organizací Formula SAE [13]

Deformační člen z pěnových materiálů – více rozšířený a používaný typ deformačního členu. Jeho výhodou je nízká hmotnost, díky vysoké pórovitosti, a zároveň dobrá vlastnost pohlcování energie. Průběh absorbování energie je popsán na (obr. 3-16), v závislosti působící síly na deformaci [14].



obr. 3-16 Závislost působící síly s deformací u pěnového materiálu [14]

Deformační člen z hliníkového sendvičového jádra– jde o nejvíce používaný materiál. Deformační člen lze zkonstruovat nalepením několika voštinových desek umístěných vedle sebe nebo speciálně vyrobené voštiny s buňkami v celé délce. Dnes se nejvíce využívá hexagonální struktura voštin. Výrobci dnes nabízí před-deformovanou voštinu, která minimalizuje prvotní špičku nárazu. Celý průběh deformování a pohlcování energie probíhá za konstantní síle. Díky této úpravě je chování voštiny více stabilní a dosahuje se snížení maximálních i průměrných hodnot zpomalení, která jsou kritériem pro splnění testu [15].



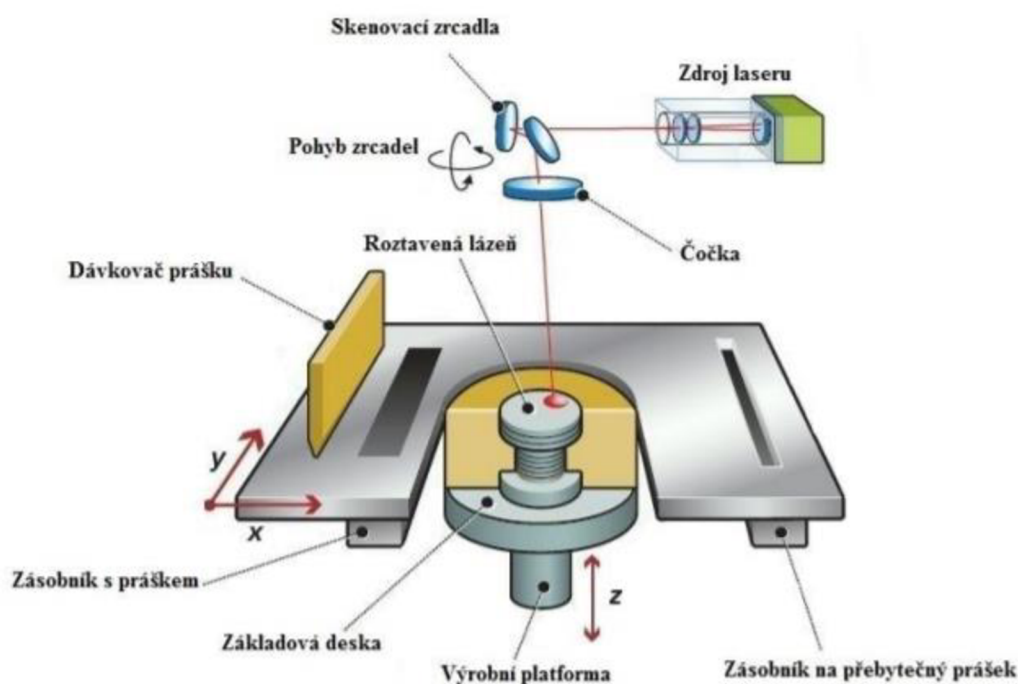
obr. 3-17 Charakteristika pohlcení prvotní špičky síly díky před-deformované oblasti [15]



obr. 3-18 Deformační člen využíváný týmem TU Brno Racing na voze Dragon 9

3.5 Technologie Selective Laser Melting (SLM)

Selective Laser Melting (SLM) je aditivní technologie 3D tisku. Na rozdíl od klasického způsobu výroby (obrábění), technologie materiál neubírá, ale přidává. Výroba začíná nanesením vrstvy kovového prášku na základovou desku. Vrstva je následně natavena usměrněným paprskem laseru pomocí zrcátek. Laser natavuje prášek přesně v místech, kde má vzniknout výsledný výrobek. Po první natavené vrstvě základová deska sjede dolů, dávkovač rozprostře další vrstvu prášku a proces se opakuje. Celý průběh 3D tisku probíhá v komoře s ochrannou atmosférou plynů, jako je argon nebo dusík. Technologie SLM umožňuje úplné protavení kovového materiálu. Výrobek je díky tomu homogenní a má lepší mechanické i fyzikální vlastnosti. Prášek, který nebyl nataven je možné znovu použít, a tím se sníží jeho spotřeba. Výrobek se po vytisknutí musí očistit především od podpor, které musí být pod materiálem, jenž by byl ve vzduchu (převisy) [16, 17, 18].



obr. 3-19 Schéma metody SLM [16]

Tato metoda je velmi vhodná pro výrobu konstrukčně a geometricky složitých dílů, jejichž výroba konvenční metodou není možná. Je možné vyrábět tenkostěnné výrobky což je oproti slévání velká výhoda. Metoda má velmi široké využití v medicíně a letectví. Díky SLM metodě je možné vyrábět různé lidské implantáty, které jsou velmi malé a geometricky složité [16, 17].

Technologií je možné kombinovat různé materiály dohromady, a tak docílit velmi specifických vlastností. Nejčastěji se pro tisk používají slitiny hliníku nebo slitiny titanu. SLM metoda umožňuje vyrábět funkční komponenty s vysokou strukturální integritou a velmi kvalitním povrchem. Velkou nevýhodou je vysoká provozní cena, a také dlouhý výrobní čas [16, 17].

3.5.1 Materiály pro aditivní výrobu

V současné době existuje velké množství materiálů a jejich slitin běžně používaných pro výrobu pomocí aditivní technologie, ale také mnoho dalších, které jsou zkoumány pro nejlepší vhodnost využití. Každý materiál má jinou pevnost, tuhost, teplotu tavení i tuhnutí a všechny tyto parametry ovlivňují proces výroby. Při volbě materiálu se proto musí brát ohled i na proces výroby, využití výrobku i jeho pracovní prostředí.

Pro různá odvětví byly vyvinuty různé materiály, které odpovídají jejich využití. Slitina Ti6Al4V má obrovské uplatnění v medicíně, letectví i v kosmickém výzkumu. Jednou z největších předností je kombinace pevnosti, korozní odolnosti, obrobitelnosti a svařitelnosti. Slitina je, vzhledem k její pevnosti a tuhosti, velice lehká. Hmotnost hraje velkou roli ve všech odvětvích, ať už jde o implantáty, díly pro letadla nebo kosmický průmysl. Slitina je také vhodná pro povrchové úpravy, kterými se zlepšují její vlastnosti. Kombinace materiálu Ti6Al4V a metody SLM je možné vyrobit velmi složité ale odolné výrobky [19]. Základní materiálové charakteristiky viz (tab. 3-1).

tab. 3-1 Mechanické vlastnosti materiálu Ti6Al4V [20]

Charakter	Hodnota
E	114 GPa
R _e	880 MPa
R _m	950 MPa
ρ	4 430 kg*m ⁻³

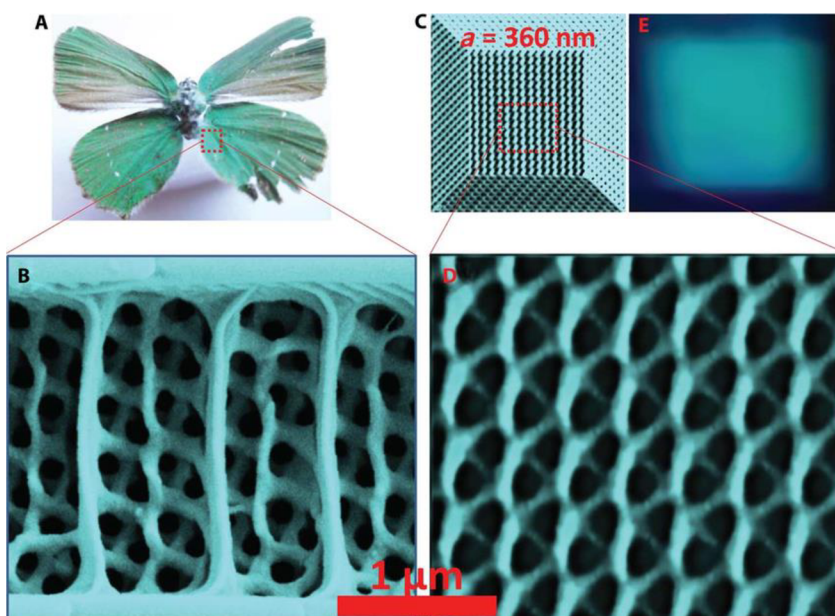
Dalším velmi rozšířeným materiálem je AlSi10Mg, který se původně používal především ve slevárenství. Díky jeho dobrým vlastnostem se ale začal používat pro aditivní výrobu pomocí SLM. V dnešní době je materiál velice využíván v automobilovém i leteckém průmyslu, a to především díky jeho vysoké pevnosti, ale zároveň nízké hmotnosti. Materiál má velmi dobré mechanické vlastnosti, a proto se stále velmi zkoumá a vyvíjí. Jedním z článků zabývajících se vlastnostmi tohoto materiálu je článek [21]. Nejdůležitější mechanické vlastnosti materiálu jsou shrnuty v (tab. 3-2).

tab. 3-2 Mechanické vlastnosti materiálu AISi10Mg [21,22]

Charakter	Hodnota
E	75 GPa
R _e	260 MPa
R _m	460 MPa
ρ	2 680 kg*m ⁻³

3.5.2 Využití strukturovaných materiálů pro absorpci energie

Inspirací pro strukturované materiály byly prvky přírody jako koraly, motýlí křídla, kosti i lastury (obr. 3-20). Struktura má velmi specifickou a tvarově složitou geometrii. I když nejsou tyto prvky plné materiálu mají velkou pevnost, a toho se snažíme využít pomocí strukturovaných materiálů. Použití strukturovaných materiálů místo plného má uplatnění tam, kde se klade důraz na pevnost, ale zároveň co nejmenší hmotnost. Nejčastější oblasti využití jsou v medicíně, kosmonautice, letectví, ale i motorsportu. Ve vesmírných aplikacích se využívá pro držáky různých součástí na satelitech. V medicíně se snaží vyrobit implantáty co nejvíce podobné reálným kostem. Lidská kost je tvořena tkání s přesně definovanou porézností. Každá část má jinou úlohu v mechanismu a také jiné vlastnosti. Při použití mikro-prutových struktur se dá velmi věrně napodobit tato struktura. Správným navržemím parametrů se dá co nejvíce přiblížit reálným kostem [4].

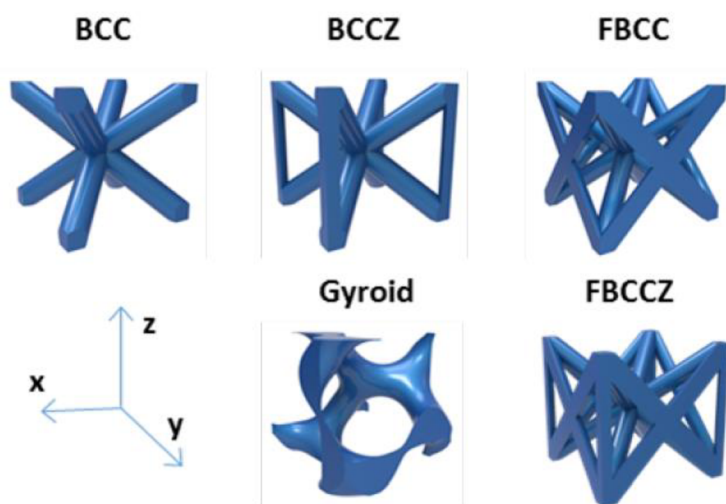


obr. 3-20 Motýlí křídla, jako inspirace pro mikro-prutové struktury [23]

3.5.3 Výzkumy v oblasti mikro-prutových struktur

Skupina Švýcarských výzkumníků zkoumala účinek pomalého zatížení hliníkového (Al5056) sendvičového jádra (honeycomb) a titan-hliníkového (Ti6Al4V) strukturovaného jádra. Vysoké využití těchto materiálů je především v letectví, kde je potřeba co nejnižší hmotnost, a proto se zdá být výhodná mřížková struktura. Při testu byla použita mřížková struktura BCC (body centered cubic) o velikosti 2,5 mm a sendvičová jádra s hexagonálním tvarem o velikosti 8 mm. Výroba proběhla metodou SLM, během které měnili výkon a expozici laseru. Rozměry zkušební vzorky byly 100 x 100 x 21 mm. Poté byly jednotlivé vzorky vystaveny pádu závaží o hmotnosti 2.07 kg. Při pádu závaží z výšky 0,5 m pohltil hliníkový vzorek 0,051 Jm³/kg a titanový vzorek 0.023 Jm³/kg. Výrazný rozdíl byl především ve velikosti zdeformované hloubky. U hliníkového jádra byla hloubka deformace 19,08 mm, téměř přes celou tloušťku vzorku. U titanového jádra to bylo pouhých 4,78 mm. Z porovnání vyplývá, že jak hliníková jádra, tak i titanová (Ti6Al4V) dosáhli velmi podobného výsledku specifické absorbované energie. Větší rozdíl byl ovšem v oblasti poškození vzniklé nárazem. U vzorku vyrobeného z mikro-prutových struktur byla oblast více lokalizovaná a lépe řízená. Je to způsobeno rozdílným mechanismem absorpce energie mezi sendvičovým jádrem a mikro-prutovou strukturou, a proto se zdá být mikro-prutová struktura více vhodná pro řízenou deformaci [24].

U strukturovaného materiálu je hodně parametrů, které se musí volit vzhledem k požadavkům na funkci součásti. Jedním z dalších důležitých prvků je vlastní geometrie mřížky, kterou se zabývá spousta výzkumů. Při experimentu bylo zkoušeno pět typů jednotkových mřížek viz (obr. 3-21).



obr. 3-21 Schéma různých typů jednotkových buněk [25].

Pro experiment byly vyrobeny 3 kusy pro každý typ mřížky se stejnou jednotkovou velikostí mřížky. Všechny vzorky byly vyrobeny z materiálu AlSi10Mg metodou SLM. Vzorky byly uloženy mezi tenkými plechy, kde horní $t = 0,3$ mm a spodní $t = 0,5$ mm. Všechny typy mřížek byly tvořeny se stejnou relativní hustotou 17,9 % a rozměrech 40 x 40 x 16,8 mm. Aby bylo docíleno stejné hustoty pro všechny typy mřížek, museli být různé průměry vzpěr. Průměry vzpěr byly voleny od 0,58 mm do 0,8, kdy nejmenší průměr vzpěru měla mřížka FBCCZ a největší průměr mřížka BCC [25].

Test všech vzorků byl proveden na padacím zařízení. Princip padacího zařízení je v přeměně kinetické energie pádového členu na energii nárazovou. Indentor (nástroj pro měření tvrdosti) měl průměr $d = \varnothing 16$ mm o váze $m = 2,83$ kg a byl spuštěn z výšky $h = 1$ m. Celý test a jeho výsledky byly zaznamenány na vysokorychlostní kamery. Výsledky testů jsou uvedeny v (tab. 3-3). Mřížka BCC a gyroid vyšly velmi podobně jak reálnou váhou vzorku, tak i absorbovanou energií. Gyroid měl o něco vyšší maximální sílu nárazu. Mřížky FCC byly na tom nejlépe s absorpční silou P_a [J/s], která se vypočítá ze vztahu:

$$P_a = \frac{E_a}{t_a} \quad (2.1)$$

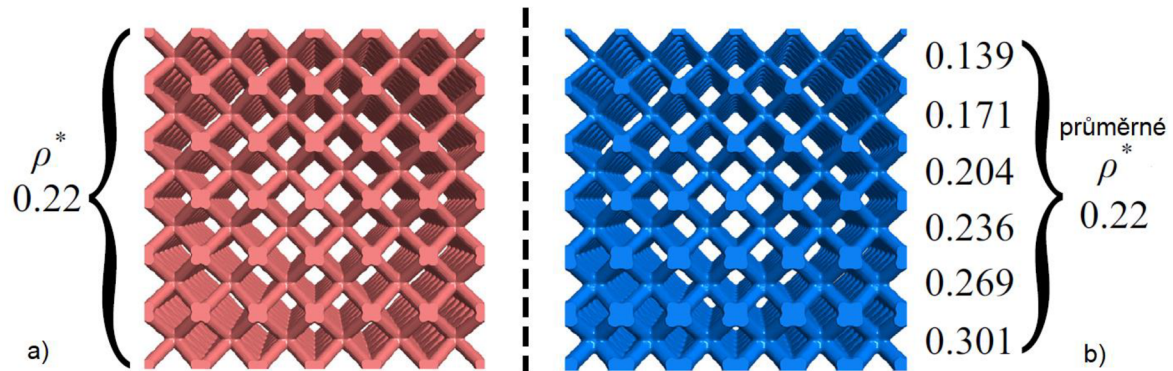
kde E_a je absorbovaná energie [J] a t_a je čas deformace [s]. Absorpční síla je charakteristika, která definovala proces absorpce energie během deformace vzorku [25].

tab. 3-3 Výsledky zkoušených vzorků [25].

Vzorek	Reálná váha (g)	Rychlost před nárazem (m/S)	Absorbovaná energie (J)	Čas deformace (ms)	Průměrná síla (N)	Maximální síla (N)	Absorpční síla (J/s)
BCC	15,349	4,15	23,99	3,20	2 746	5 029	7,50
BCCZ	15,995	4,11	23,56	3,11	2 762	5 068	7,57
FCC	20,049	4,12	23,29	2,39	3 337	6 526	9,76
PFCC	19,399	4,12	23,24	2,30	3 556	7 511	10,09
SG	16,316	4,13	23,60	2,81	2 977	6 064	8,39

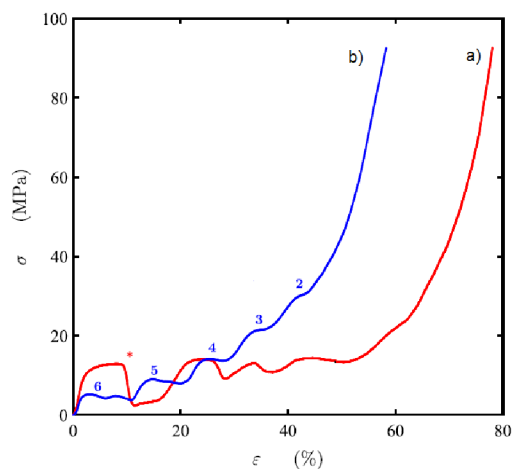
Struktura gyroidů má velmi podobný výsledek jako struktura BCC a BCCZ při nárazové zkoušce. Výhodou gyroidu je, že jeho tuhost je stejná pro všechny směry zatížení. Pro nepřetržitou absorpci energie je hloubka a čas deformace velmi důležitý. Pokud je materiál příliš tuhý, tak čas i hloubka deformace jsou příliš malé, a pak je nárazová energie absorbována jen částečně. Za tímto účelem byl definován parametr absorpční síly P_a [25].

Při dalším experimentu bylo zjišťováno, jaký má vliv rozložení hustoty materiálu na absorpci energie a pevnost materiálu. Vzorky byly vyrobeny z materiálu AlSi10Mg o rozměrech 18 x 18 x 18 mm s jednotkovou velikostí jádra 3 mm. Výroba proběhla metodou SLM. Experiment byl proveden na jednoosém siloměru o síle 50 kN. Kompresní posun byl nastaven na 0,03 mm/s. Data byla získávána z vysokorychlostních kamer [26].



obr. 3-22 Způsob rozložení hustoty a) rovnoměrné rozložení b) proměnná hustota [26]

Po provedení experimentu bylo zjištěno, že závislost napětí na deformaci je v prvních 10 % deformace na tom lépe vzorek s rovnoměrně rozloženou hustotou. Pro konečné napětí působící na vzorky byl rozdíl v deformaci asi 25 %. Výsledné zdeformování proměnné hustoty bylo menší. Při vyhodnocování absorbování energie probíhal vývoj velmi podobně. V prvních 10 % deformace větší množství energie pohltil typ A, poté absorboval druhý typ vzorku energii rychleji. V konečné deformaci (vzorek typu A zdeformován na 80 %, vzorek typu B na 60 %) pohltil vzorek s rovnoměrně rozloženou hustotou asi 15 J a vzorek s tříděnou hustotou 13 J viz (obr. 3-23) [26].

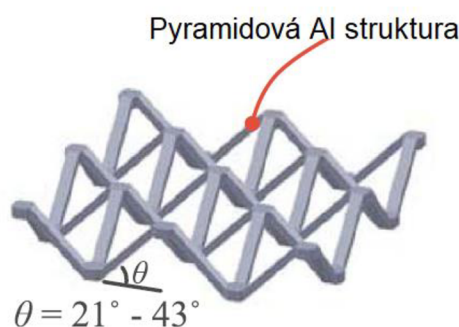


obr. 3-23 Graf závislosti napětí na deformaci, kde je a) s proměnnou hustotou b) s rovnoměrnou hustotou [26]

Vzorek s proměnnou hustotou se bortil v sekvenci vrstva po vrstvě, postupující z oblasti s nízkou hustotou do oblasti se zvýšenou hustotou. Křivky v grafu (obr. 3-23) ukazují řadu stupňovitých rysů, kde je možné identifikovat kolaps a ztuhnutí jednotlivých vrstev. Postupné zesílení a zvyšující se míra absorpce energie až do zahuštění ukazují potenciál v řízení absorpce energie pomocí mikro-prutových struktur [26].

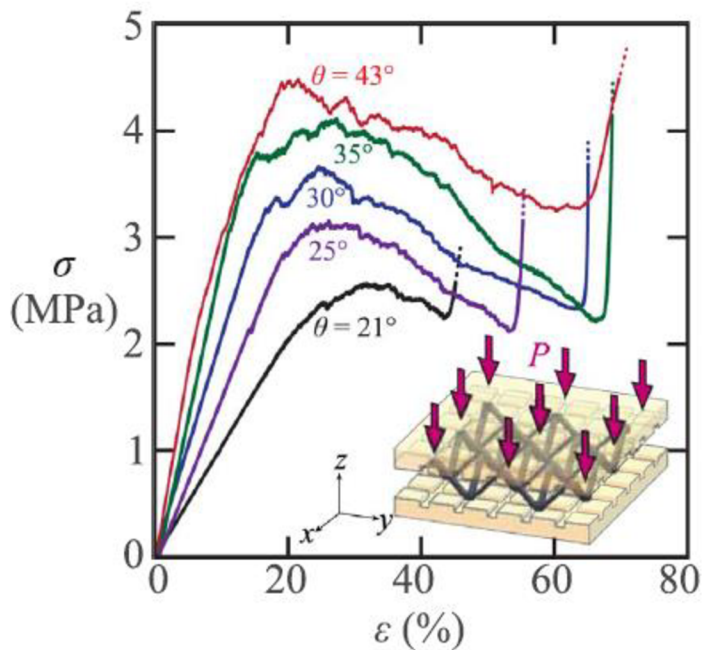
Strukturovaný materiál je relativně nová technologie. Díky tomuto faktu se objevuje spousta výzkumů a experimentů, jak co nejlépe využít potenciál těchto materiálů. Skupina pěti výzkumníků z Kanady navrhovala absorbér nárazové energie pro formulový vůz. Zjišťovali, jaký vliv má povlak na jádře z mřížkované struktury a jako moc to ovlivní absorpci energie.

Pro experiment byla využita pyramidová mřížová jádra ze slitiny Al. Byla vyrobena za použití formovacích lisů z komerčně dostupných kovových plechů AA3003-H144. Pro zvýšení tvarovatelnosti byly plechy nejprve žihány při $T = 600\text{ }^{\circ}\text{C}$ po dobu 1 h. Struktura byla vyráběna s úhlem příhradového nosníku $\theta = 21^{\circ} - 43^{\circ}$. Vzorky byly poté podrobeny důkladnému čištění povrchu a následnému tvrdému eloxování, aby vznikla vrstva keramického povlaku Al_2O_3 . proces čištění vede ke zlepšení elektrické vodivosti pro eloxování, ale také snižuje průřez o 2,5 %. Nanesená vrstva povlaku se pohybovala v rozmezí $s = 0 - 50\text{ }\mu\text{m}$ [27].



obr. 3-24 Ukázka použité pyramidové struktury [27]

Celkově bylo použito 49 vzorků se sedmi různými příhradovými úhly a sedmi různými tloušťkami povlaku. Vzorky byly podrobeny kvazistatickým zkouškám stlačení při zatížení 50 kN a rychlosti hlavy 0,017 mm/s. Výsledky byly zaneseny do grafů v závislosti napětí na deformaci. Se zvětšujícím se úhlem příhradových nosníků byl pozorován značný nárůst napětí ve vzorku. Také docházelo k větším zdeformování vzorku, které vedlo k větší absorpci energie [27].



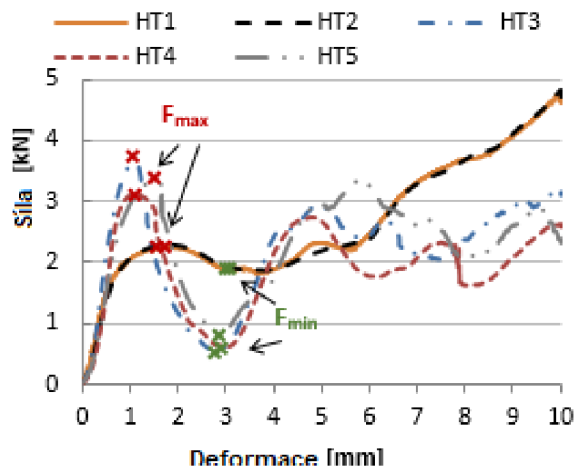
obr. 3-25 Graf s vlivem změny úhlu příhradového nosníku [27]

Experimentem bylo zjištěno, že od nejnižšího příhradového úhlu nepotažených Al mříží po nejvyšší úhel a nejsilnější povlak se šestinásobně zvýší pevnost v tlaku, dvanásobně zvýší absorpce energie na objem (z $0,2 \text{ J/cm}^3$ na $2,4 \text{ J/cm}^3$) a dvacetinásobně zvýšení absorpce energie na hmotnost (z $0,8 \text{ J/g}$ na 17 J/g) [27].

Poslední výzkum se zabývá tepelným zpracováním mikro-prutových struktur vyrobených metodou SLM. Pro výzkum využívali vzorky o rozměrech $20 \times 20 \times 20,8 \text{ mm}$ se základní mřížkou struktury BCC a materiálem AlSi10Mg. Délka jedné buňky je 4 mm a průměr jednotlivých vzpěr je $0,8 \text{ mm}$. V experimentu se používalo 5 různých vzorků (s označením HT1-HT5), ze kterých 4 byly tepelně zpracovány (žihány) a jeden zůstal nezměněn [28].

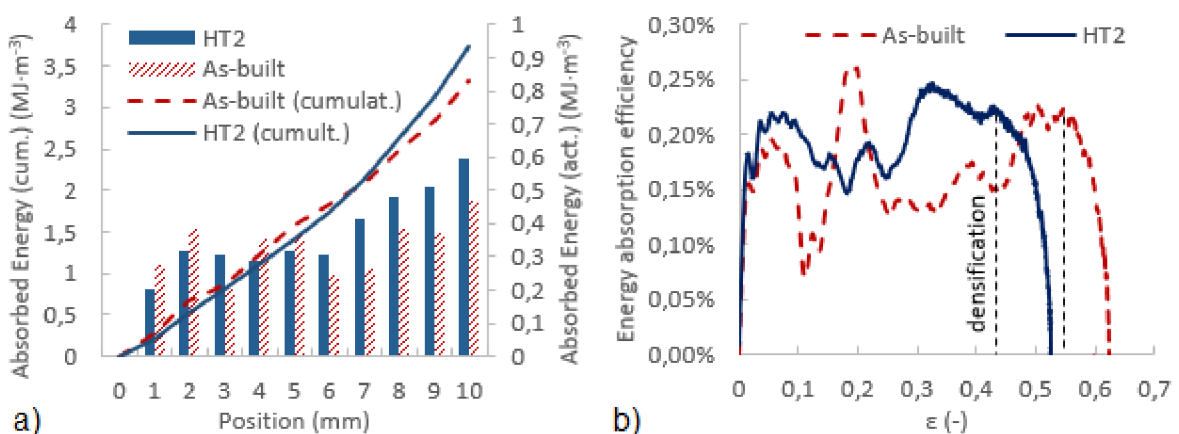
Vzorky s označením HT1 a HT2 byly žihány na teplotě 300 °C po dobu 3 h . Rozdíl byl v následném ochlazování, kde první vzorek se ochlazoval v uzavřené peci a druhý na vzduchu. Třetí vzorek byl žihán na teplotě 160 °C po dobu 6 h a ochlazen v uzavřené peci. Čtvrtý vzorek byl zpracován roztokem a následně ochlazen ve vodě [28].

Následně byly vzorky otestovány kvazistatickými zkouškami, při kterých se zjišťovaly mechanické vlastnosti jednotlivých vzorků. Byly zjištěny dva typy mechanického chování, které popisuje (obr. 3-26). První dva vzorky (HT1, HT2) ukázaly velké snížení tuhosti a maximální síly. Na druhou stranu byl u vzorku odstraněn kolaps, který je pro mikro-prutovou strukturu z AlSi10Mg typický. Zároveň vzorky mají 2 až 3krát vyšší prodloužení při přetržení. Druhá skupina vzorků (HT3, HT4) mají velmi podobné mechanické vlastnosti jako vzorek bez zpracování (HT5) [28].



obr. 3-26 Graf závislosti síly na deformaci při zdeformování vzorku do 50 % [28]

Pro srovnání absorpčních vlastností byl použit tepelně zpracovaný vzorek HT2 a vzorek bez tepelného zpracování HT5. Test vzorků byl proveden na pádovém zařízení s výslednou nárazovou energií 74 J. Výsledky jednoznačně ukázaly výrazně vyšší stabilitu deformačního chování. Jak ukazuje (obr. 3-27a), absorbovaná energie obou vzorků je velmi podobná. Z počátku deformace absorboval tepelně nezpracovaný vzorek více energie. Ovšem když došlo ke kolapsu této struktury, absorbovaná energie výrazně klesla a žíhaný vzorek, který se nezhroutil začal, absorbovat více energie. Výsledná absorbovaná energie byla vyhodnocena do 50 % (10 mm) deformace a její hodnoty pro vzorek HT2 byly 3,73 MJ/m³ a 3,31 MJ/m³ pro vzorek HT5. Na obr. 3-27b je ukázáno, že žíhané vzorky mají vyšší účinnost absorpce energie v důsledku většího protažení materiálu, které zajišťuje postupnou a stabilní deformaci struktury [28].



obr. 3-27 a) Graf skutečné (W_{act}) a kumulativní (W_{cum}) absorbované energie b) Graf účinnosti absorpce energie [28]

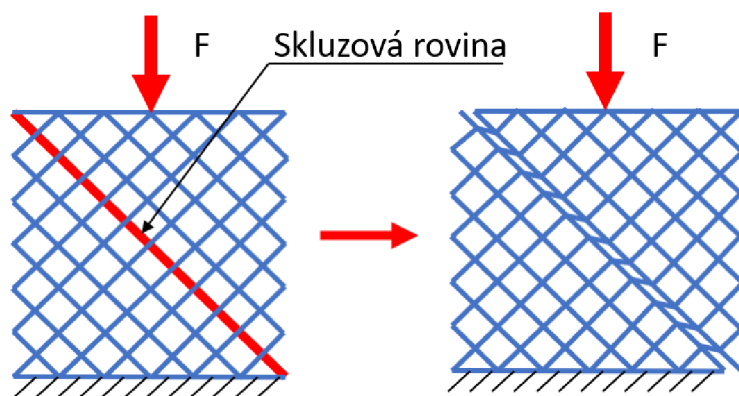
4 DISKUZE

4.1 Okrajové podmínky pro návrh absorbéru

Pro možný návrh účinného absorbéru nárazové energie bylo nutné zjistit maximální možná zatížení, která lidské tělo vydrží. V první kapitole se zjistilo, že nejnebezpečnější místa jsou hlava, hrudní a vnitrobřišní orgány. Nejkritičtější kritérium je limit 80 g po dobu 3 ms pro špičkové zpoždění hlavy. Zároveň při rozboru deformačních zón bylo zjištěno, že deformační člen ve voze musí vydržet 100-150 kN [1].

V současné době se velmi často využívají pěnové materiály (kovové) pro zlepšení absorpce. Jenomže díky částečně nahodilé struktuře je řízení absorpce velmi obtížné [1]. Pro zlepšení této vlastnosti je vhodné využít deformační členy vyrobené technologií SLM s mikro-prutovou strukturou. U takto vyrobených absorbérů by bylo umožněno lépe řídit celou absorpci energie během deformace. Tento způsob by se dal také dobře využít v bočních sloupcích vozu nebo alespoň v jeho části [9]. Zde není příliš velkých prostor pro deformační zónu, a proto je při bočním nárazu velmi obtížné snížit kinetickou energii vzniklou nárazem. Díky malému prostoru je vhodné použít proměnnou hustotu rozložení materiálu, kde by se hustota zvětšovala přes průřez sloupkem ve směru do kabiny. Ze začátku by se sloupky řízeně deformovaly a tím pohltily nárazovou energii. S rostoucí hustotou by se zvýšila tuhost a tím by sloupek získal pevnost, kterou musí mít, aby kabina vozu zůstala co nejméně poškozená [9, 26]. Velkým problémem bude výsledná cena dílu, která by byla o mnoho vyšší než současně vyráběné sloupky.

Získané maximální hodnoty pro osobní automobil se bohužel nedají přímo srovnávat s formulovým vozem, protože v automobilu jsou celé deformační zóny, které snižují kinetickou energii. Projekt Formula Student má pravidly dané maximální zpoždění 40 g a průměrné zpoždění nesmí přesáhnout 20 g. Dále je nutné, aby deformační člen absorboval minimálně 7 350 J nárazové energie. Minimální rozměry absorbéru musí být 200 x 100 x 200 mm, tyto údaje určují okrajové podmínky pro samotný návrh deformačního členu [3]. Oproti všem zkoušeným vzorkům z výzkumů bude deformační člen výrazně větší, což může způsobovat velké problémy při deformaci mikro-prutové struktury. Při deformaci a poškození mikro-prutové struktury dochází ke skluzu mřížek po skluzové rovině (obr. 4-1), a tím nedojde k úplnému využití absorbéru [28]. Pro co nejlepší předejití tomuto stavu je nutné vybrat co nejvhodnější materiál pro výrobu deformačního členu.



obr. 4-1 Schématické zobrazení skluzové roviny u mikro-prutových struktur

4.2 Porovnání materiálů pro aditivní výrobu SLM

Jak už ukázaly předešlé výzkumy, volba materiálu je velmi důležitý parametr při návrhu deformačního členu vyrobeného metodou SLM. Ať už je to z hlediska samotné výroby, tak i kvůli výsledným mechanickým vlastnostem výrobku, a také především kvůli co nejlepšímu zabránění kolapsu struktury.

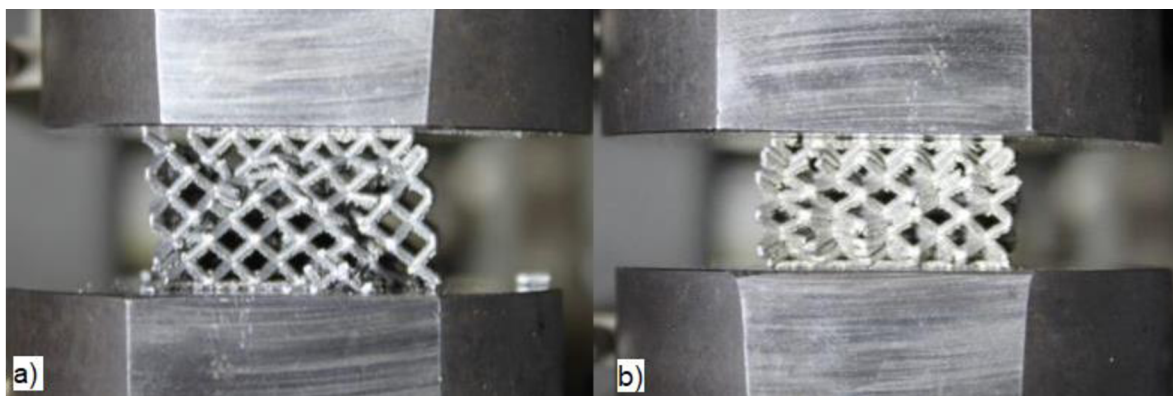
tab. 4-1 Srovnání mechanický vlastností AISi10Mg a Ti6Al4V [20, 21, 22]

Charakter	AISi10Mg	Ti6Al4V
E	75 GPa	114 GPa
R _e	260 MPa	880 MPa
R _m	460 MPa	950 MPa
ρ	2 680 kg*m ⁻³	4 430 kg*m ⁻³

V prvním experimentu byla srovnávána titanová slitina (mikro-prutové struktury) a hliníková slitina (struktury honeycomb). Jak ukazuje tabulka (tab. 4-1) slitina titanu má téměř čtyřnásobně větší mez kluzu a dvojnásobně větší mez pevnosti. Tyto vlastnosti i samotný experiment ukázaly, že titanová slitina je velmi tuhá, a proto se vzorek ve výsledku méně zdeformoval. Výzkum také ukázal, že hliníkový vzorek absorboval 0,051 Jm³/kg energie a titanový vzorek 0.023 Jm³/kg energie, což je téměř dvojnásobné množství [24].

V projektu Formula Student je velký prostor pro absorpci energie, protože deformační člen musí být nejméně 200 mm dlouhý. Z tohoto hlediska je vhodnější hliníkový materiál, který se zdeformuje téměř přes celou jeho délku a využije tak maximální potenciál pro absorpci energie. Další výhodou hliníkové slitiny je, že má oproti titanové slitině skoro poloviční hustotu, a díky tomu bude výrazně lehčí. Problém u hliníkové slitiny použité pro výrobu dílu metodou SLM může být ten, že je až příliš křehká. Díky tomu by mohlo dojít k porušení mikro-prutové struktury na skluzové rovině ještě před tím, než se zdeformuje po celé délce. To by způsobilo, že deformační člen bude absorbovat energii jen částečně a po porušení už by absorboval jen minimální množství.

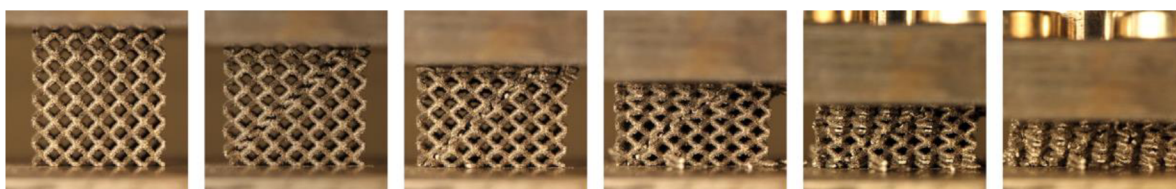
Podobný problém řešila skupina výzkumníků v článku [28]. Ve kterém se snažili najít nejvhodnější tepelné zpracování mikro-prutové struktury. Ukázalo se, že když se výsledná hliníková struktura bude žíhat na teplotu 300 °C po dobu 3 h a následně se ochladí na vzduchu, sníží se tak celková křehkost struktury. Díky tomu nedojde k rychlému kolapsu struktury a celá deformace absorberu bude více stabilní, viz (obr. 4-2). Tuto teorii také potvrdilo celkové množství absorbované energie, kdy tepelně nezpracovaný materiál absorboval 3,31 MJ/m³, zatímco žíhaný materiál absorboval 3,73 MJ/m³ [28]. Rozdíl hodnot se nezdá být příliš velký, ale hodnoty popisují absorbovanou energii na m³, což znamená, že u absorberu o velkém objemu bude rozdíl znatelný. Z provedené analýzy vyplývá, že při vhodném tepelném zpracování se zlepší křehké chování mikro-prutové struktury vyrobené metodou SLM. Stejný postup žíhání by byl použit i při výrobě deformačního členu. Kromě materiálu pro vytvoření struktury je velmi důležitá samotná geometrie mikro-prutové struktury.



obr. 4-2 Srovnání a) tepelně nezpracované struktury a b) tepelně zpracované struktury [28]

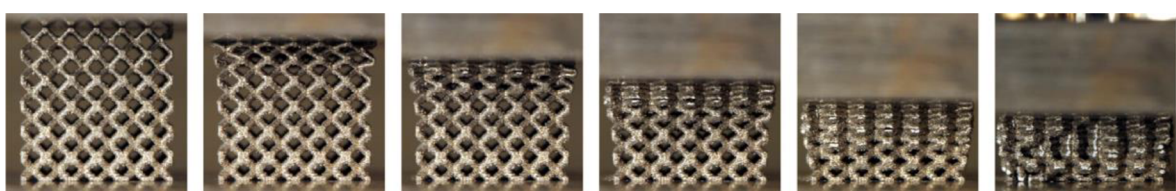
4.3 Porovnání rozložení hustoty a základních typů mřížek

Článek [26] ukázal, že díky technologii SLM a její velké tvarové volnosti, je možné vyrábět struktury s různě rozloženou hustotou. To umožňuje lépe určit průběh celkové deformace, a tak jí i lépe řídit. Experiment popisuje vliv rozložení hustoty ve zkušebním tělese na absorbovanou energii. Z experimentu bylo zjištěno, že vzorek s proměnnou hustotou se méně zdeformuje, ale výsledná absorbovaná energie je menší než u vzorku s rovnoměrně rozloženou hustotou. Vzorek s proměnnou hustotou má na začátku malou tuhost, a tak se deformuje více. Se zhušťováním se materiálu vzroste taky jeho tuhost a tím se méně deformuje. Na druhou stranu při příliš velké tuhosti je výsledná absorbovaná energie menší než u vzorku s rovnoměrnou hustotou. Vzorek s rovnoměrnou hustotou, také lépe absorboval energii hned od začátku, což by mohlo vést ke snížení maximální síly [26].



obr. 4-3 Deformace tepelně zpracované mikro-prutové struktury s rovnoměrně rozloženou hustotou [26].

Jak je vidět na (obr. 4-3), i když je struktura tepelně zpracovaná, může dojít k předčasnému kolapsu celé struktury a tím nedojde k využití potenciálu celého vzorku. Pro co nejefektivnější absorbér je potřeba, aby nedošlo k takovému kolapsu. S proměnnou hustotou se vzorek stává ještě více stabilní a nedochází ke kolapsu celé struktury viz (obr. 4-4), což umožňuje lépe řídit mechanické vlastnosti absorbéru (deformaci).



obr. 4-4 Deformace tepelně zpracované mikro-prutové struktury s proměnnou hustotou [26].

Nevýhodou u proměnné hustoty je, že s rostoucí hustotou výrazně roste i její tuhost, a proto se zcela nezdeformuje a nepohltní takové množství energie. Příliš velké tuhost absorbéru nárazové energie by mohla být velmi nebezpečná. Při příliš velké tuhosti by mohlo dojít k poškození (průrazu) průrazové přepážky (obr. 3-14) a tím by došlo ke zranění dolních končetin. Z těchto důvodů by musela být změna hustoty co nejmenší, aby byl absorbér schopen pohlcovat energii po celé délce a nebyl na konci příliš tuhý a neúčinný. Zároveň bychom, díky alespoň malé změně struktury, získali lepší kontrolu nad deformací.

Dalším velmi důležitým prvkem při návrhu mikro-prutové struktury je samotný tvar základní mřížky. Pro vytvoření takové struktury lze použít v dnešní době mnoho různých tvarů mřížky, jako jsou BCC, BCCZ až po mřížky gyroid viz (obr. 3-21). Volba mřížky je velice důležitá, protože každá mřížka nám vytváří strukturu o velmi odlišných vlastnostech.

Podle testů z článku [25] vyšly výsledky vzorků s mřížkou BCC a gyroid velmi podobně. Absorbovaná energie byla největší u typu BCC. Mřížka gyroid má velkou výhodu, že dokáže téměř stejně absorbovat energii ze všech směrů, a to díky tomu, že jeho tuhost je stejná pro všechny směry zatížení. Tato vlastnost se ovšem nedá využít ve formulovém vozu. Absorbéry energie jsou navrženy a testovány pouze v jednom směru zatížení. U vzorku s BCC mřížkou byla navíc maximální (5 000 N) i průměrná (2 700 N) síla působící během testu menší než u vzorku s mřížkou gyroid [25]. Průměrné i maximální síly (popř. zrychlení) jsou hlavním parametrem bezpečnosti deformačních členů formulových vozů [3]. Z toho plyne, že více vhodný základní prvek mikro-prutové struktury z této dvojice je mřížka BCC.

Pro další srovnání s mřížkou BCC byly vybrány mřížky FCC a PFC. Na první pohledy jsou vzorky s mřížkou FCC výrazně těžší než vzorky s mřížkou BCC. Ovšem výsledný čas jejich deformace byl výrazně nižší, což ukazuje na to, že mají výrazně vyšší tuhost. Proto byla u experimentu zavedena charakteristika absorpční síly, která ukazuje, jak rychle je vzorek schopen absorbovat energii během deformace. Vzorky s FCC mřížkou měly tuto hodnotu výrazně vyšší než ostatní zkoušené vzorky [25]. U návrhu deformačního členu pro závodní vůz je velmi důležitá nejen jeho správná funkčnost, ale také jeho hmotnost. Podle tohoto faktoru je opět výhodnější mřížka BCC. U Mřížky FCC je lepší absorpce v čase a její větší tuhost, jenže ani jedno není vyžadováno při návrhu absorbéru energie formulového vozu.

Z výzkumů lze usoudit, že nejvíce vhodnou mřížkou pro návrh absorbéru energie závodního vozu je typ BCC. Mřížka BCC měla nejmenší hmotnost, ale zároveň nejvíce absorbovala energii a v průběhu deformace na ní působily nejnižší průměrné síly. Má dostatečnou, a ne příliš vysokou tuhost, která umožní co největší zdeformování deformačního členu. Zároveň díky zdeformování na plné délce materiálu absorbuje největší množství nárazové energie, která je jedním z dalších kritérií pravidel Formula Student.

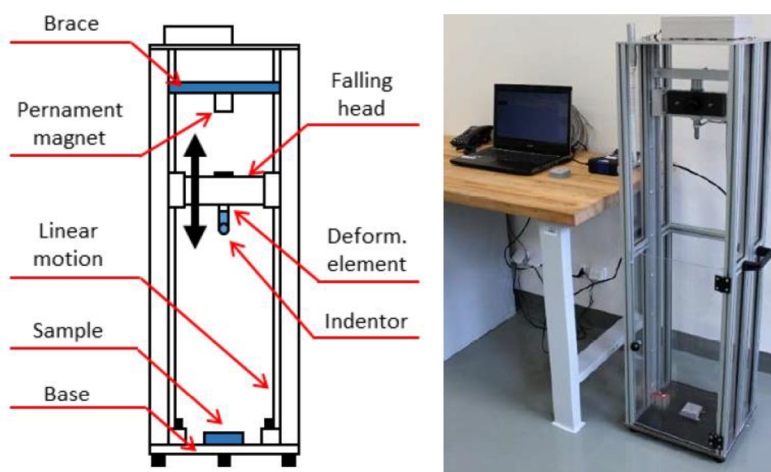


obr. 4-5 Základní mřížka mikro-prutové struktury BCC [25]

Výzkum zabývající se rozdílným úhlem nosníků potvrzuje, že je vhodné mít co největší úhel mezi příhradovými nosníky. Díky velkému úhlu vzroste výsledná absorbovaná energie [27]. Větší úhel tedy potvrzuje vhodnost mřížky BCC, jako základní prvek mikro-prutové struktury, protože má ze všech srovnávaných mřížek největší úhel mezi nosníky.

4.4 Testování absorbéru nárazové energie

Po návrhu absorbéru energie je velmi důležité jeho samotné testování. Při testování je potřeba zjistit, jestli absorbér správně plní svojí funkci a jestli splní všechny parametry pravidel z kapitoly 3.4. Při testování nového deformačního členu je nejdůležitější výsledná absorbovaná energie a zrychlení působící na deformační člen během nárazu.



obr. 4-6 Pádové zařízení používané na ústavu konstruování a jeho schématické zobrazení [25]

Na základě všech studií je pro měření vhodnosti absorbéru nárazové energie nejvhodnější využít padostroj (viz obr. 4-6). Princip fungování zařízení je založen na změně kinetické energie padacího razníku na nárazovou energii. Tento princip lze popsat jednoduchou fyzikální rovnicí [25]:

$$\frac{1}{2}mv^2 + E_t = mgh \quad (4-1)$$

- Kde: m [kg] hmotnost použitého indentoru
v [m*s⁻¹] rychlost indentoru těsně před nárazem
E_t [J] ztrátová třecí energie
g [m*s⁻²] tíhové zrychlení
h [m] pádová výška

Během testu na zkušební vzorek volným pádem dopadá indentor, který postupně proniká do testovacího vzorku a mění svojí kinetickou energii na absorbovanou energii vzorkem. Zařízení na (obr. 4-6) pracuje s maximálním závažím o hmotnosti $m = 7,25 \text{ kg}$ a výšce pádu $h = 1 \text{ m}$ [25]. Vzhledem k omezeným rozměrům a možnostem, by bylo možné testovat pouze vzorky, pro zjištění chování navrženého absorbéru.

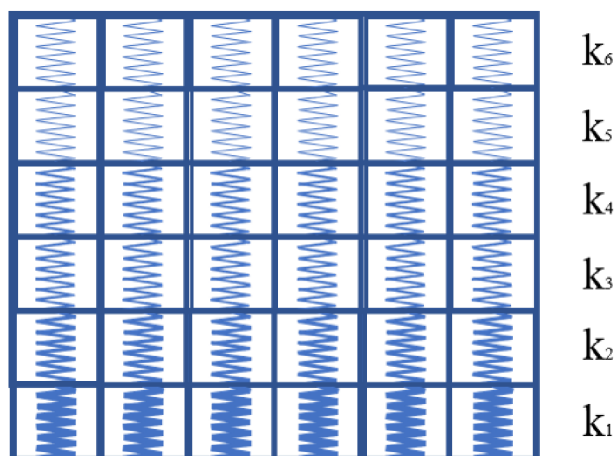
Pro otestování výsledného deformačního členu, který má minimální rozměry $200 \times 100 \times 200 \text{ mm}$ a musí absorbovat minimálně energii o velikosti $7\,350 \text{ J}$ by bylo zapotřebí použít větší pádové zařízení [3]. Je potřeba, aby takový padostroj měl dostatečně velký prostor a dostatečně velké závaží pro provedení testu. Optimální padostroj má firma KTG s.r.o., která provádí podobné bezpečnostní testy. Pro tým TU Brno Racing firma poskytuje potřebné otestování a také dodává veškeré výsledky z testů ve formě grafů a videí [29]. Během testování se také měří maximální průhyb průrazové přepážky, na které je umístěn deformační člen. Hodnota průhybu nesmí přesáhnout 25 mm [3].

4.5 Výpočet tuhosti vrstev s proměnnou hustotou

Výzkumy ukázaly, že s pomocí proměnné hustoty se dá snížit šance na předčasný kolaps mřížek po smykové rovině. Pro návrh správně rozložené hustoty je vhodné znát tuhost jednotlivých vrstev. Hodnoty při výpočtu vycházejí z experimentu [26]. Pro výpočet tuhosti jednotlivých vrstev se využije rovnice (4-2) a zjednodušení viz (obr. 4-7).

$$F = kx \quad (4-2)$$

Kde: F [N] síla působící na deformovanou vrstvu
 k [$\text{N} \cdot \text{mm}^{-1}$] tuhost deformované vrstvy
 x [mm] rozdíl hloubek vrstvy při deformaci



obr. 4-7 Zjednodušené schéma mikro-prutové struktury s proměnnou hustotou

Pro určení tuhosti jednotlivých vrstev musela být prvně určena síla působící na každou vrstvu. Síla vychází z grafu napětí působícího na plochu vzorku (18 x 18 mm) během deformace (obr. 3-23). Z grafu byla přibližně odečtena hloubka L, při které se jednotlivé vrstvy zdeformovaly a určena hodnota x rozdílem nové a předchozí hloubky. Následně byl proveden výpočet a všechny hodnoty byly zaznamenány do (tab. 4-2)

tab. 4-2 Hodnoty jednotlivých vrstev mikro-prutové struktury s proměnnou hustotou

Vrstva	Relativní hustota (%)	F (N)	L (mm)	x (mm)	k (N*mm ⁻¹)
6	13,9	1 620	0,9	0,9	1 800
5	17,1	3 240	2,7	1,8	1 800
4	20,4	4 860	4,5	1,8	2 700
3	23,6	6 804	6,3	1,8	3 780
2	26,9	9 720	7,56	1,26	7 714,3
1	30,1	39 160	10,8	3,24	12 086,4

Z tabulky zcela jednoznačně vyplývá, že s rostoucí hustotou roste tuhost jednotlivých vrstev. Z počátku se zdá být růst tuhosti poměrně lineární a rovnoměrný. Během deformace nedochází k žádnému výraznému kolísání, které by bylo způsobeno kolapsem struktur. Což ukazuje, že struktura s proměnnou hustotou je více stabilní a předvídatelná. Nicméně ke konci deformace, kdy se před nezdeformovanými vrstvami zhutňuje materiál předchozích vrstev, začne tuhost růst velice strmě. Tento jev ovšem nastává i u vzorku s rovnoměrně rozloženou hustotou.

4.6 Výsledný návrh absorberu energie

Z výsledků vyplývajících ze všech zmíněných výzkumů, lze určit přibližné výsledné hodnoty. Vzhledem k tomu, že je absorber oproti zkoušeným vzorkům velký, je většina parametrů volena tak, aby se co nejvíce omezila možnost kolapsu mřížky.

Prvním parametrem je materiál použitý na výrobu, kterým je AlSi10Mg. Materiál byl vybrán z důvodu relativně nízké hustoty (hmotnosti) a výzkumy také prokázaly, že má dobré absorpční vlastnosti. Materiál by byl následně žhán na teplotu 300 °C po dobu 3 h, aby nebyl tolik křehký a byl více stabilní. Základní tvar mřížky je BCC z důvodu dobrého poměru absorbované energie a hmotnosti. Mřížka zároveň dobře eliminuje maximální špičky zrychlení. Velikost mřížky je 4 mm a průměr každého prutu ve struktuře $d = 0,8$ mm. Tato velikost mřížky a prutu byla zvolena proto, aby byl možný odhad mechanických vlastností výsledné struktury. U rozložení hustoty není zcela jasné, zda je lepší rovnoměrné nebo proměnné rozložení. Z těchto důvodů by bylo potřeba vyrobit oba typy a následně by byl určen vhodnější. Vzhledem k velkým rozměrům deformačního členu by bylo 50 vrstev základní mřížky. To je opravdu velké množství, které značně zvyšuje šanci kolapsu celé struktury. Z tohoto důvodu by okolo celého deformačního členu byly stěny, které by měly zabránit, nebo alespoň snížit riziko sesunutí struktury.

tab. 4-3 Přibližné hodnoty navrženého deformačního členu

Rozměry (mm)	Objem (mm ³)	Zdeformovaný objem (mm ³)	Absorbovaná energie (J)	Váha 1 buňky (g)	Váha (g)
20 x 20 x 20,8	8 320	4 000	14,92	0,03792	4,74
1 x 1 x 1	1	1	0,00373	$5,7 \cdot 10^{-4}$	$5,7 \cdot 10^{-4}$
200 x 100 x 200	$4 \cdot 10^6$	$4 \cdot 10^6$	14 920	0,03792	2 284,07

Díky takto zvoleným parametrům a s předpokladem, že nedojde ke kolapsu je možné použít získané hodnoty z výzkumu [28] a určit přibližné výsledné hodnoty navrženého deformačního členu. Za těchto předpokladů bude stejné množství absorbované energie na m³ jako u zmíněného experimentu ($3,73 \text{ MJ/m}^3$). Hodnotu bylo potřeba přepočítat na J/mm³, což je $0,00373 \text{ J/mm}^3$. Následně byly celková absorbovaná energie a hmotnost deformačního vzorku přepočítány přes objem zkušební vzorku na objem navrženého deformačního členu a zaznamenány do (tab. 4-3).

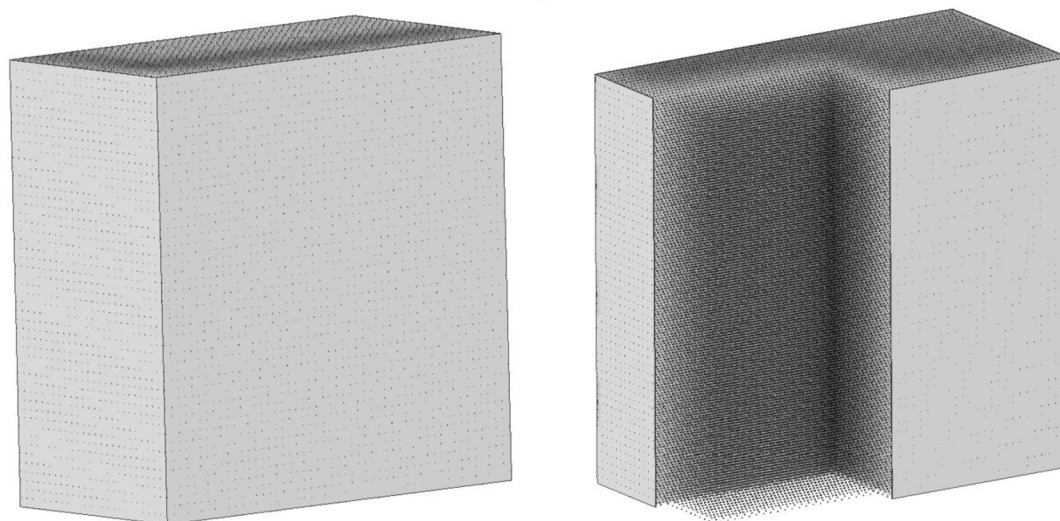
Výpočet ukázal, že deformační člen by vážil okolo 2 kg, což je v podstatě pětinasobně vyšší hmotnost než současně používaný deformační člen z honeycombu (400 g). Zároveň má takto navržený absorbér potenciál deformovat až 15 000 J energie. Tato hodnota je taky až příliš velká. Proto je možné upravit parametr průměru vzpěry d na 0,4 mm, popřípadě velikost mřížky a na 8 mm a tím dojde ke snížení hmotnosti i absorbované energie.

tab. 4 4 Výsledné rozměry a odhadované hmotnosti navržených deformačních členů

Návrh	Velikost mřížky (mm)	Průměr vzpěry (mm)	Počet buněk	Váha 1 prutu (g)	Váha 1 buňky (g)	Váha (g)
1	4	0,4	62 500	$4,74 \cdot 10^{-3}$	0,018 93	1 185
2	8	0,8	8 125	0,01896	0,075 84	616,2

Odhadované hmotnosti byly dopočítány pomocí trojčlenky. Z (tab. 4-3) byla přepočítaná hmotnost jedné buňky na hmotnost jednoho prutu. Následně byla tato hmotnost u návrh č. 1 vydělena dvěma, protože má poloviční průměr prutu, zatímco u návrhu č. 2 byla hodnota vynásobena dvěma, protože je prut v mřížce dvakrát delší než výchozí. Dále byla vypočítaná hmotnost jedné buňky, kde každá buňka má 4 pruty. Na konec se určila výsledná hmotnost návrhů přes celkový počet buněk.

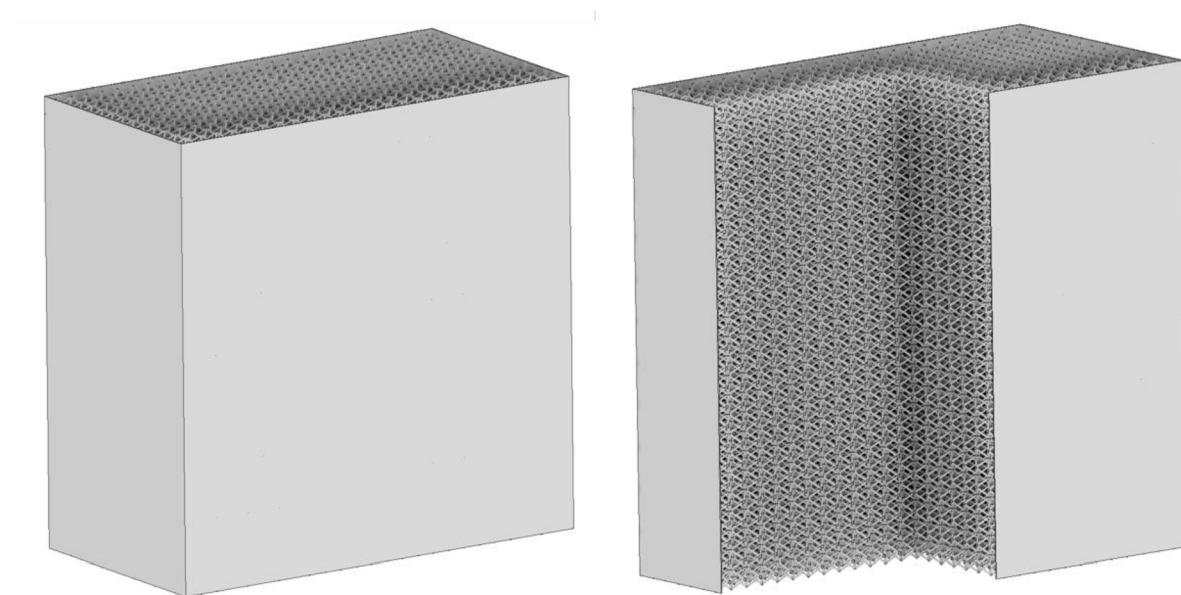
Absorbovaná energie u prvního návrhu by měla klesnout na polovinu (7 500 J) oproti struktuře z výzkumu. Tato hodnota splňuje pravidla Formula Student, kde je dané minimum absorbované energie 7 350 J. U druhého deformačního členu by měla být absorbovaná energie velmi podobná jako u prvního. Není ovšem jisté, jestli se zvětšením buňky na dvojnásobek až příliš nesnížila tuhost absorberu, což by mohlo způsobit kolaps a neúplné využití absorpce. Výsledné deformační členy byly podle parametrů vymodelovány v programu Autodesk Inventor Professional 2020.



obr. 4-8 Návrh deformačního členu č. 1 s průměrem prutu 0,4 mm a velikostí buňky 4 mm

U prvního návrhu (obr. 4-8) se ukázalo, že vymodelovat takto navrženou strukturu je výpočtově velmi náročné pro CAD softwary. Způsobovalo to především množství jednotlivých buněk, kdy jedna vrstva má 25 x 50 buněk a celý deformační člen dohromady 50 vrstev. Díky přidání stěn ($t = 0,4$ mm) okolo celého deformačního členu jsou výsledné rozměry 200,8 x 100,8 x 200 mm. Model se nakonec podařilo vymodelovat, ale jakákoliv operace s ním je velmi náročná a zdlouhavá.

Druhý návrh deformačního členu (obr. 4-9), místo poloviční velikosti prutu, má dvakrát větší buňku. Základní mřížka (BCC) i velikost prutu (0,8 mm) zůstala stejná jako ve výchozím experimentu. Zatím co velikost buňky se zvětšila na 8 mm. To mělo za důsledek menší počet buněk, a tím i snazší výpočet pro software. Ve výsledku má jedna vrstva 25 x 13 buněk a celkově je v navrženém absorbéru 25 vrstev. S přidáním stejných stěn jako u prvního návrhu je výsledný rozměr 200,8 x 104,8 x 200 mm.



obr. 4-9 Návrh deformačního členu č. 2 s průměrem prutu 0,8 mm a velikostí buňky 8 mm

5 ZÁVĚR

Tato bakalářská práce se zabývá využitím technologie SLM a mikro-prutových struktur pro výrobu absorberu nárazové energie. Technologie má totiž velký potenciál v ušetření hmotnosti vyrobených dílů, je ovšem potřeba velmi správně navrhnout všechny parametry, aby bylo docíleno maximálního využití. Ve všech motorsportech hraje hmotnost velkou roli a jinak tomu není v projektu Formula Student. Z těchto důvodů bylo potřeba získat dostatečné množství informací pro návrh absorberu energie pro formulový vůz, vyrobený metodou SLM. Hlavním cílem této práce byla rešerše v oblasti bezpečnostních prvků automobilů a vozů Formula Student a následný návrh absorberu energie vyrobeného metodou SLM.

V první kroku byla zpracovaná rešerše v oblasti bezpečnosti pasažérů, která ukázala hraniční hodnoty 80 g po dobu 3 ms pro špičkové zpoždění hlavy. Následně byl vypracován přehled běžně využívaných deformačních členů a srovnání deformačních zón v osobním automobilu a ve formulovém vozu.

Dále byly popsány nejdůležitější body pravidel týkající se návrhu a testování absorberu energie. Především nejmenší rozměry 200 x 100 x 200 mm, minimální množství absorbované energie (7 350 J), a také maximální (40 g) a průměrné (20 g) možné zpoždění při nárazu. Nakonec byl vypracován přehled současných výzkumů, které se v dnešní době zabývají absorpcí energie pomocí mikro-prutových struktur.

Na závěr práce byly získané informace zhodnoceny v diskuzi a následně z nich byly vybrány nejvhodnější parametry pro návrh deformačního členu. Jako nejvhodnější mřížka byla vybrána struktura BCC. Zvolený materiál pro výrobu byl AlSi10Mg, který by byl následně žíhán z důvodu snížení křehkého chování. V diskuzi byl také určen způsob a stroj (padostroj) pro měření vhodnosti deformačních členů.

Následně byly udělány dva zjednodušené výpočty. První z nich je analytický pružinový model popisující výpočet tuhosti jednotlivých vrstev u mikro-prutové struktury s proměnnou hustotou. Druhý ukázal, jakých výsledků by navržené deformační členy mohly dosáhnout (hmotnost a absorbovaná energie).

Nakonec byly vymodelovány dva deformační členy v programu Autodesk Inventor. První s průměrem prutu 0,4 mm, velikostí buňky 4 mm a hmotnosti 1 185 g. Druhý model měl průměr prutu 0,8 mm a velikost buňky 8 mm. Hmotnost druhého modelu je přibližně 616 g.

Osobně si myslím, že technologie SLM a mikro-prutové struktury mají velkou budoucnost, bohužel navržený deformační člen je o něco těžší než současně používaný. Do budoucnosti by bylo možné provést zkoušky a zjistit tak, jestli navržené deformační členy pohltnou vypočítaných 7 500 J energie nebo více.

6 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. VLK, František. Karosérie motorových vozidel: ergonómika: biomechanika: pasivní bezpečnost: kolize: struktura: materiály. Brno: VLK, 2000. ISBN 80-238-5277-9.
2. TU Brno racing [online]. 2020 [cit. 2020-06-22]. Dostupné z: <https://tubrnoracing.cz/kontakt/>
3. Formula Student Rules 2020. Formula Student Germany [online]. 2020 [cit. 2020-06-22]. Dostupné z: https://www.formulastudent.de/fileadmin/user_upload/all/2020/rules/FS-Rules_2020_V1.0.pdf
4. VAVERKA, Ondřej. Ultra lehké komponenty vyráběné 3D tiskem. MM Průmyslové spektrum [online]. 2019, str. 60 [cit. 2020-06-22]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/ultra-lehke-komponenty-vyrabene-3d-tiskem.html>
5. SAJDL, Jan. Euro NCAP. Autolexiconnet [online]. c2020 [cit. 2020-06-22]. Dostupné z: <https://www.autolexicon.net/cs/articles/euro-ncap/>
6. SAJDL, Jan. Euro NCAP – částečný čelní náraz. Autolexiconnet [online]. c2020 [cit. 2020-06-22]. Dostupné z: <https://www.autolexicon.net/cs/articles/euro-ncap-castecny-celni-naraz/>
7. SAJDL, Jan. Euro NCAP – plný čelní náraz do nedeformovatelné bariéry. Autolexiconnet [online]. c2020 [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: <https://www.autolexicon.net/cs/articles/euro-ncap-plny-celni-naraz-do-nedeformovatelne-bariery/>
8. SAJDL, Jan. Euro NCAP – boční náraz. Autolexiconnet [online]. c2020 [cit. 2020-06-22]. Dostupné z: <https://www.autolexicon.net/cs/articles/euro-ncap-bocni-naraz/>
9. Karoserie. Bezpečné cesty [online]. Simopt, c2014-2019 [cit. 2020-06-22]. Dostupné z: <https://www.bezpecnecesty.cz/cz/bezpecnost-automobilu/pasivni-prvky-bezpecnosti/karoserie>
10. Informational Document regarding Effects of the Introduction of the RCAR Bumper Test. RCAR [online]. c1960-2020 [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: http://rcar.org/Papers/MemberPapers/Effects%20of%20RCAR%20Bumper%20Test%20issue%201_0.pdf#zoom=80%
11. Gedavari [online]. [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: <http://ww1.gerdavari.com/imeni-oto.aspx>

12. BLAIR, Paul. Absorbér energie, izolace nebo kreativní materiál? MM Průmyslové spektrum [online]. 2019, str. 22 [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/absorber-energie-izolace-nebo-kreativni-material.html>
13. Formula SAE Standard Impact Attenuator. *Formula SAE* [online]. [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: <http://www.fsaeonline.com/page.aspx?pageid=193613e4-fff1-4ea9-97ec-eb1c07fbe3c0>
14. Duocel® Foam Energy Absorption. *ERG materials & aerospace* [online]. c2020 [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: <http://ergaerospace.com/technical-data/duocel-foam-energy-absorption/>
15. Plascore CrushLite™. *Plascore* [online]. c2008-2020 [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: <https://www.plascore.com/honeycomb/energy-absorbition/crushlite/>
16. MURPHY, James. Selective Laser Melting (SLM) – 3D Printing Simply Explained. *All3DP* [online]. 28 Mar 2019 [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/selective-laser-melting-slm-3d-printing-simply-explained/>
17. WILSON, Andrew. Near-infrared camera monitors selective laser melting process. *Vision Systems Design* [online]. c2020, 4 Oct 2011 [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: <https://www.vision-systems.com/cameras-accessories/article/16744806/nearinfrared-camera-monitors-selective-laser-melting-process>
18. SLM – Selective Laser Melting. *3Dlaboratory* [online]. [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: <http://3dlaboratory.cz/rapid-prototyping/>
19. VEIGA, Celestino, J. Paulo Davim DAVIM a A.J.R. LOUREIRO. PROPERTIES AND APPLICATIONS OF TITANIUM ALLOYS: A BRIEF REVIEW. *Researchgate* [online]. c2008-2020, 30 May 2012 [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: http://www.ipme.ru/e-journals/RAMS/no_23212/05_23212_veiga.pdf
20. Titanium Ti-6Al-4V. *ASM aerospace specification metals* [online]. 2020 [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: <http://asm.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=MTP641aerospacemetal>
21. KEMPEN, K., L. THIJS, J. VAN HUMBEECK a J.-P. KRUTH. Mechanical Properties of AlSi10Mg Produced by Selective Laser Melting. *Physics Procedia* [online]. 2012, **39**, 439-446 [cit. 2020-06-25]. DOI: 10.1016/j.phpro.2012.10.059. ISSN 18753892. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1875389212025862>
22. Aluminium (AlSi10Mg). *Zare* [online]. c2014 [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: <https://www.zare.it/en/materials/aluminium-alsi10mg>

23. GAN, Zongsong, Mark D. TURNER a Min GU. Biomimetic gyroid nanostructures exceeding their natural origins. *Science Advances* [online]. 2016, **2**(5) [cit. 2020-06-25]. DOI: 10.1126/sciadv.1600084. ISSN 2375-2548. Dostupné z: <https://advances.sciencemag.org/lookup/doi/10.1126/sciadv.1600084>
24. HASAN, Rafidah, Robert A.W. MINES, E. SHEN, S. TSOPANOS, Wesley J. CANTWELL, W. BROOKS a C.J. SUTCLIFFE. Comparison of the Drop Weight Impact Performance of Sandwich Panels with Aluminium Honeycomb and Titanium Alloy Micro Lattice Cores. *Applied Mechanics and Materials* [online]. 2010, **24-25**, 413-418 [cit. 2020-06-25]. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.24-25.413. ISSN 1662-7482. Dostupné z: <https://www.scientific.net/AMM.24-25.413>
25. VRANA, Radek, Daniel KOUTNY a David PALOUSEK. IMPACT RESISTANCE OF DIFFERENT TYPES OF LATTICE STRUCTURES MANUFACTURED BY SLM. *MM Science Journal* [online]. 2016, **2016**(06), 1579-1585 [cit. 2020-06-25]. DOI: 10.17973/MMSJ.2016_12_2016186. ISSN 18031269. Dostupné z: <http://www.mmscience.eu/december-2016.html#2016186>
26. MASKERY, I., N.T. ABOULKHAIR, A.O. AREMU, C.J. TUCK, I.A. ASHCROFT, R.D. WILDMAN a R.J.M. HAGUE. A mechanical property evaluation of graded density Al-Si10-Mg lattice structures manufactured by selective laser melting. *Materials Science and Engineering: A* [online]. 2016, **670**, 264-274 [cit. 2020-06-25]. DOI: 10.1016/j.msea.2016.06.013. ISSN 09215093. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S092150931630658X>
27. YU, B., K.H. CHIEN, K. ABU SAMK a G.D. HIBBARD. A mechanism for energy absorption: Sequential micro-kinking in ceramic reinforced aluminum alloy lattices during out-of-plane compression. *Materials Science and Engineering: A* [online]. 2018, **716**, 11-22 [cit. 2020-06-25]. DOI: 10.1016/j.msea.2018.01.004. ISSN 09215093. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0921509318300030>
28. Heat Treatment of the SLM Processed Lattice Structure Made of AlSi10Mg and Its Effect on the Impact Energy Absorption. *Researchgate* [online]. c2008-2020, October 2019 [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/337621918_Heat_Treatment_of_the_SLM_Processed_Lattice_Structure_Made_of_AlSi10Mg_and_Its_Effect_on_the_Impact_Energy_Absorption
29. *KTG* [online]. 2020 [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: <http://ktg.cz/cz/>

7 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

d	[mm]	průměr prutu
E	[MPa]	Yongův modul
E _a	[J]	absorbovaná energie
E _t	[J]	ztrátová třecí energie
ε	[-]	poměrné délkové prodloužení
F	[N]	síla působící na deformovanou vrstvu
g	[m*s ⁻²]	tíhové zrychlení
h	[m]	pádová výška
θ	[°]	úhel příhradového nosníku
k	[N*mm ⁻¹]	tuhost deformované vrstvy
L	[mm]	hloubka deformace
m	[kg]	hmotnost
P _a	[J/s]	absorpční síla
ρ	[kg*m ⁻³]	hustota
R _e	[MPa]	mez kluzu
R _m	[MPa]	mez pevnosti v tahu
s	[mm]	tloušťka nanesené vrstvy povlaku
σ	[MPa]	mechanické napětí
T	[°C]	teplota
t	[mm]	tloušťka stěny
t _a	[s]	čas deformace
v	[m*s ⁻¹]	rychlost
x	[mm]	rozdíl hloubek vrstvy při deformaci

3D	trojrozměrný
AIP	Anti Intrusion Plate
BCC	Body Centered Cubic
BCCZ	Body Centered Cubic with Z-truss
CAD	Computer Aided Design
Euro NCAP	European New Car Assessment Programme
FBCC	Face and Body Centered Cubic
FBCCZ	Face and Body Centered Cubic with Z-truss
FS	Formula Student
HT1-HT5	heat treatment 1-5
IA	Impact Attenuator
IHS	Insurance Institute for Highway Safety
NHTSA	National Highway Traffic Safety Administration
SAE	Society of Automotive Engineers
SLM	Selective Laser Melting
TU	Technical University
USA	United States of America
VUT	Vysoké učení technické
W_{act}	skutečná absorbované energie
W_{cum}	kumulativní absorbované energie
WSU	Wayne State University

8 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

obr. 1-1	Formulový vůz týmu TU Brno Racing, Dragon 9 [2]	13
obr. 1-2	Použití mikro-prutové struktury vyrobené metodou SLM [4]	14
obr. 3-1	WSU - křivka [1]	17
obr. 3-2	Limitní hodnoty pro lidské tělo [1]	18
obr. 3-3	Částečný čelní náraz do deformovatelné bariéry [6].....	19
obr. 3-4	Plný čelní náraz do pevné bariéry [7]	20
obr. 3-5	Boční náraz vozu do deformovatelné bariéry [8]	20
obr. 3-6	Klíčové části karoserie osobního automobilu [9]	21
obr. 3-7	Rozložení sil (a) působících při čelním nárazu; (b) působících při bočním nárazu [9].....	21
obr. 3-8	Ilustrační obrázek deformačních zón formulového vozu.....	22
obr. 3-9	Karbonová struktura formulových vozů [2].....	23
obr. 3-10	Čtyřboký deformační člen s prolisy [10]	23
obr. 3-11	Schéma hydraulického tlumiče připojeného k přednímu nárazníku [11]	24
obr. 3-12	a) Deformační charakteristika absorberu s vlivem výplně [1], b) Materiál Arpro pro dveřní panel [12]	24
obr. 3-13	Konstrukční řešení rámu (chassis) Dragona X	25
obr. 3-14	Schéma konstrukce přední části formulového vozu	26
obr. 3-15	Standardní deformační člen poskytovaný organizací Formula SAE [13]....	27
obr. 3-16	Závislost působící síly s deformací u pěnového materiálu [14]	27
obr. 3-17	Charakteristika pohlcení prvotní špičky síly díky předdeformované oblasti [15].....	28
obr. 3-18	Deformační člen využívaný týmem TU Brno Racing na voze Dragon 9	28
obr. 3-19	Schéma metody SLM [16].....	29
obr. 3-20	Motýlí křídla, jako inspirace pro mikro-prutové struktury [23]	31
obr. 3-21	Schéma různých typů jednotkových buněk [25].	32
obr. 3-22	Způsob rozložení hustoty a) rovnoměrné rozložení b) proměnná hustota [26]	34

obr. 3-23	Graf závislosti napětí na deformaci, kde je a) s proměnnou hustotou b) s rovnoměrnou hustotou [26].....	34
obr. 3-24	Ukázka použité pyramidové struktury [27].....	35
obr. 3-25	Graf s vlivem změny úhlu příhradového nosníku [27].....	36
obr. 3-26	Graf závislosti síly na deformaci při zdeformování vzorku do 50 % [28] ...	37
obr. 3-27	a) Graf skutečné (W_{act}) a kumulativní (W_{cum}) absorbované energie b) Graf účinnosti absorpce energie [28]	37
obr. 4-1	Schématické zobrazení skluzové roviny u mikro-prutových struktur.....	39
obr. 4-2	Srovnání a) tepelně nezpracované struktury a b) tepelně zpracované struktury [28]	40
obr. 4-3	Deformace tepelně zpracované mikro-prutové struktury s rovnoměrně rozloženou hustotou [26].....	41
obr. 4-4	Deformace tepelně zpracované mikro-prutové struktury s proměnnou hustotou [26].....	41
obr. 4-5	Základní mřížka mikro-prutové struktury BCC [25].....	42
obr. 4-6	Pádové zařízení používané na ústavu konstruování a jeho schématické zobrazení [25].....	43
obr. 4-7	Zjednodušené schéma mikro-prutové struktury s proměnnou hustotou.....	44
obr. 4-8	Návrh deformačního členu č. 1 s průměrem prutu 0,4 mm a velikostí buňky 4 mm	47
obr. 4-9	Návrh deformačního členu č. 2 s průměrem prutu 0,8 mm a velikostí buňky 8 mm	48

9 SEZNAM TABULEK

tab. 3-1	Mechanické vlastnosti materiálu Ti6Al4V [20].....	30
tab. 3-2	Mechanické vlastnosti materiálu AlSi10Mg [21,22]	31
tab. 3-3	Výsledky zkoušených vzorků [25].	33
tab. 4-1	Srovnání mechanický vlastností AlSi10Mg a Ti6Al4V [20, 21, 22]	39
tab. 4-2	Hodnoty jednotlivých vrstev mikro-prutové struktury s proměnnou hustotou	45
tab. 4-3	Přibližné hodnoty navrženého deformačního členu.....	46

10 SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 Model návrhu deformačního členu č. 1

Příloha 1 Model návrhu deformačního členu č. 2