

Hybridní smart sendvičové struktury pro automobilový průmysl

Denis Bilík

Bakalářská práce
2020

 Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

Akademický rok: 2019/2020

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Denis Bilík**
Osobní číslo: **T19726**
Studijní program: **B3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Technologická zařízení**
Forma studia: **Prezenční**
Téma práce: **Hybridní SMART sendvičové struktury pro automobilový průmysl**

Zásady pro vypracování

1. Literární rešerše zaměřená na problematiku sendvičových struktur v automotive.
2. SMART princip, význam, aplikace.
3. 3D návrh SMART aplikací sendvičových struktur v automotive.
4. Význam zvolených aplikací z pohledu bezpečnosti a výrobních možností.
5. Závěr a doporučení pro automobilový průmysl.

Forma zpracování bakalářské práce: **Tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

Barbero, Ever J. 2018, Introduction to composite materials design, Third edition, CRC Press, Taylor & Francis Group, ISBN-13: 978-1138196803.

ŠUBA, Oldřich. Mechanika polymerů a kompozitů. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2011. ISBN 978-80-7454-015-8.

ŠUBA, Oldřich. Dimenzování a navrhování výrobků z polymerů. Vyd. 3. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2010, 112 s. ISBN 978-80-7318-948-8.

EHRENSTEIN GOTTFRIED, W. 2009. Polymerní kompozitní materiály. Praha, nakladatelství SCIENTIA v Praze, 351s, 2009. ISBN 978-80-86960-29-6.

Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Soňa Rusnáková, Ph.D.**
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání bakalářské práce: **2. ledna 2020**
Termín odevzdání bakalářské práce: **22. května 2020**

L.S.

prof. Ing. Roman Čermák, Ph.D.
děkan

prof. Ing. Berenika Hausnerová, Ph.D.
ředitel ústavu

Ve Zlíně dne 17. února 2020

PROHLÁŠENÍ AUTORA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Beru na vědomí, že:

- bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému a dostupná k nahlédnutí;
- na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- podle § 60 odst. 1 autorského zákona má Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- pokud bylo k vypracování bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tj. k nekomerčnímu využití), nelze výsledky bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- pokud je výstupem bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Prohlašuji,

- že jsem na bakalářské práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou obsahově totožné.

Ve Zlíně, dne:

Jméno a příjmení studenta:

.....
podpis studenta

ABSTRAKT

Tato bakalářské práce se zaměřuje na návrh hybridního SMART sendvičového panelu pro automobilový průmysl. První část se věnuje vysvětlení, co je to sendvičový panel obecně a kde všude nachází uplatnění. V další části se zaměřuje na materiálové trendy v automobilovém průmyslu. Poslední kapitola teoretické části se zabývá mikrosenzory, které jsou využity pro návrh sendvičového panelu. V praktické části je zhotoven 3D model hybridního SMART sendvičového panelu pro automobilový průmysl a návrh jeho využití a porovnání ohybových vlastností sendvičového panelu při integraci senzorů do jádra sendvičového panelu. V závěru bakalářské práce jsou dosažené výsledky porovnány.

Klíčová slova: sendvičový panel, automobilový průmysl, senzory pro sendvičové panely, pěnové jádro, prepreg

ABSTRACT

This bachelor thesis is focused on design of hybrid SMART sandwich panels for the automotive industry. The first part is focust on sandwich panels and they applications. The next part is focused on material trends in the automotive industry. The last chapter of the theoretical part deals with microsensors which are used for the design of the sandwich panel. The experimental part deals with 3D model of a hybrid SMART sandwich panel for the automotive industry and the proposal for its applications and comparison of they properties of the sandwich panels by the integration of sensors into the core of the sandwich panel. At conclusion of the bachelor thesis the results are compared.

Keywords: sandwich panel, automotive industry, sensors for sandwich panels, foam core, prepreg

Poděkování

Těmito slovy bych rád poděkoval vedoucí mé bakalářské práce doc. Ing. Soni Rusnákové, Ph.D. za odborné vedení, čas věnovaný při konzultacích, vstřícnost a za všechny rady při tvorbě mé práce.

Dále bych také rád poděkoval své rodině za podporu po dobu mého studia a v neposlední řadě mé snoubence za trpělivost a rovněž za podporu při studiu a tvorbě mé práce.

Prohlašuji, že odevzdaná verze bakalářské/diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

OBSAH

ÚVOD	10
I TEORETICKÁ ČÁST	11
1 SENDVIČOVÉ STRUKTURY	12
1.1 DEFINICE	12
1.2 VLASTNOSTI SENDVIČOVÝCH PANELŮ.....	12
1.3 VNĚJŠÍ VRSTVY	13
1.4 JÁDRA	14
1.4.1 Pěnová jádra	15
1.4.2 Voštinová jádra	16
1.4.3 Vlnitá jádra.....	18
1.5 VYUŽITÍ SENDVIČOVÝCH PANELŮ	18
1.5.1 Studie využití sendvičových struktur v karoserii automobilu značky FIAT	20
1.6 VE STROJÍRENSTVÍ NEJZNÁMĚJŠÍ POUŽÍVANÉ SENDVIČOVÉ STRUKTURY	22
1.6.1 Bondal	22
1.6.2 Litecor	22
1.6.3 Glare	23
1.6.4 Hylite.....	23
2 MATERIÁLOVÉ TRENDY V AUTOMOBILOVÉM PRŮMYSLU	25
2.1 MATERIÁLY VYUŽÍVANÉ V AUTOMOBILOVÉM PRŮMYSLU.....	25
2.2 POLYMERNÍ MATERIÁLY V AUTOMOBILECH	25
3 SMART PRINCIP	28
3.1 VÝZNAM	28
3.2 APLIKACE V PRAXI	28
3.2.1 Konkrétní příklad využití metody SMART	28
4 SENZORY A SNÍMAČE	29
4.1 MIKROSENZORY	29
4.1.1 Rozdělení mikrosenzorů.....	29
4.1.2 Mikrosenzory s mechanickým signálem.....	30
4.2 SENZORY VYUŽÍVANÉ V SENDVIČOVÝCH STRUKTURÁCH	30
4.2.1 FBG senzory.....	30
4.2.2 OTDR senzory	31
4.3 SENZORY V AUTOMOBILOVÉM PRŮMYSLU	32
II PRAKTICKÁ ČÁST	34
5 CÍLE	35
6 NÁVRH SMART APLIKACE	36

6.1	NÁVRH 3D MODELU	36
6.2	ZVOLENÉ MATERIÁLY	39
6.3	POROVNÁNÍ VLASTNOSTÍ	41
7.1	VLIV UMÍSTĚNÍ SENZORŮ V JÁDŘE NA MECHANICKÉ VLASTNOSTI	49
7.2	NÁVRHY DALŠÍCH MOŽNOSTÍ INTEGRACE FBG SENZORŮ	54
ZÁVĚR		56
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....		57
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....		62
SEZNAM OBRÁZKŮ		64
SEZNAM TABULEK.....		66
SEZNAM GRAFŮ		67
SEZNAM PŘÍLOH.....		68

ÚVOD

Sendvičové struktury a sendvičové panely se v praxi s oblibou čím dál více používají pro své schopnosti docílit předepsané odolnosti a pevnosti za značné úspory hmotnosti. Hojně se využívají například v letadlech, kde hmotnost hraje zásadní roli. Tahle bakalářská práce se však zaměřuje na využití sendvičových struktur a panelů v automobilovém průmyslu.

V automobilovém průmyslu jsou sendvičové panely v dnešní době hojně využívány pro stropy, podlahové panely nebo stěny moderních nákladních automobilů. Emisní kritéria se však stále více zpřísňují a výrobci hledají všemožné cesty, jak emise snížit. Zásadním faktorem je úspora hmotnosti vozidla. Situace dnešní doby přímo vybízí k větší integraci sendvičových panelů do konstrukcí vozidel. Výhodou může být kromě úspory hmotnosti také zlepšení izolačních či tlumících vlastností.

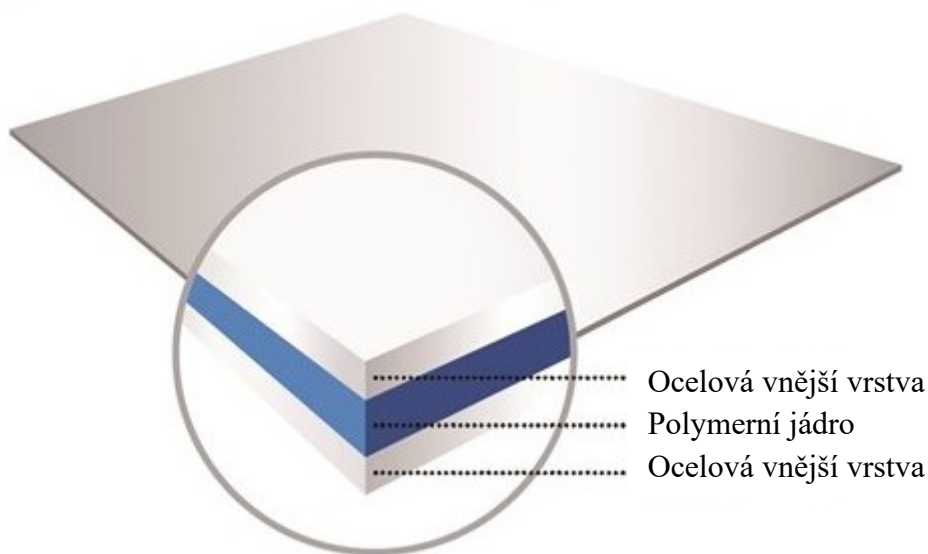
Předmětem této práce je návrh integrace sendvičového panelu, který bude obsahovat senzory zapuštěné ve svém jádru. V dnešních automobilech můžeme nalézt nespočet senzorů, které monitorují chování různých částí. Použitím senzorů zvyšujeme bezpečnost cestování a můžeme sledovat opotřebení dílů, čímž snížíme náklady na opravy. Panel by tedy měl kromě svých hmotnostních a dalších mechanických výhod napomáhat pomocí senzorů bezpečnosti cestování a snížení nákladů na údržbu.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 SENDVIČOVÉ STRUKTURY

1.1 Definice

Sendvičové struktury se povětšinou skládají ze dvou plochých vnějších vrstev a jádra (mezivrstvy), jak je znázorněno na obr. 1. Vnější ploché části jsou tenké, ale zároveň velmi pevné, kdežto mezivrstva je méně pevná. Tloušťka mezivrstvy může být různá dle požadavků na funkčnost požadovaného panelu. [1]

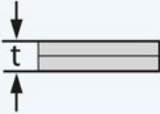
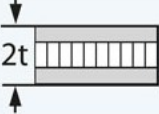
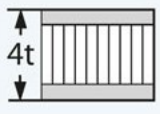


Obrázek 1 Schéma konstrukce sendvičového panelu [2]

Díky relativně jednoduchému přizpůsobení z konstrukčního hlediska a výborným vlastnostem jsou sendvičové struktury stále více a více vyhledávanějším řešením. Sendvičové struktury představují dobrou kombinaci vysoké pevnosti a tuhosti za úspory hmotnosti. Další výraznou výhodou sendvičových struktur jsou nízké výrobní náklady. [1]

1.2 Vlastnosti sendvičových panelů

Z hlediska namáhání nesou čelní plochy rovinná a ohybová zatížení. Jádro se stará o odolnost proti příčným a stříhovým silám. V porovnání s jednoduchou laminátovou strukturou lze využitím sendvičové struktury výrazně zvýšit pevnost a tuhost v ohybu. [3] Porovnání vlastností můžeme vidět na přiloženém obr. 2.

Material	Homogenní materiál	Síla panelu 1t	Síla panelu 4t
Schéma			
Tuhost panelu	1	7	37
Pevnost v ohybu	1	3,5	9,2
Hmotnost	1	1,03	1,06

Obrázek 2 Porovnání základních vlastností hliníkového sendvičového panelu oproti homogennímu materiálu [4]

Kromě již zmíněných vlastností mají různé typy sendvičových struktur řadu dalších výhod:

- Odolnost proti rázům
- Odolnost proti šíření trhlin
- Únavová odolnost
- Tepelné izolační vlastnosti
- Akustické izolační vlastnosti
- Tlumicí vlastnosti
- Odolnost proti ohni

Řada vlastností je ovlivněna právě díky správně zvolenému materiálu jádra. [5]

1.3 Vnější vrstvy

Vnější vrstvy jsou nejčastěji rovinné, ale není to pravidlem. Z hlediska mechanického namáhání jsou vnější vrstvy namáhány na tah a na stlačení.

Nejčastější materiály jsou:

- Hliník
- Ocel
- Kompozity
- A jiné [6]

1.4 Jádra

Jádro je lehký materiál, který slouží jako vyztužující prvek s nízkou hustotou. Může být jak z různých materiálů, tak různého typu konstrukčního řešení. [5]

Základní typy jader:

- Pěnová (obr. 3)
- Voštinová (obr. 4 a 5)
- Vlnitá (obr. 6) [6]



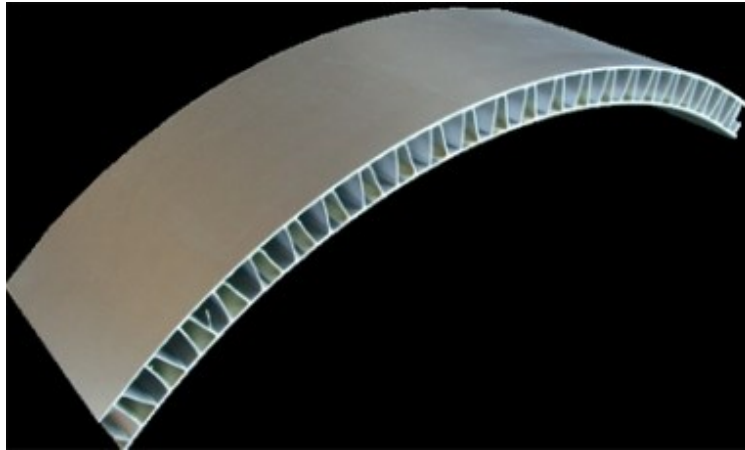
Obrázek 3 Sendvičový panel s pěnovým jádrem [7]



Obrázek 4 Sendvičový panel s voštinovým jádrem využívaný v dopravě [4]



Obrázek 5 Sendvičový panel s voštinovým jádrem využívaný v konstrukci nábytku [4]



Obrázek 6 Sendvičový panel s vlnitým jádrem [8]

Když mezi sebou porovnáme pěnová a voštinová jádra dospějeme například k závěru, že voštinová jádra mají lepší mechanické vlastnosti než pěnové při zachování srovnatelné hustoty. Ne vždy však můžeme využívat libovolný typ jádra. Sendvičové panely nemusí být jen a pouze rovinné desky, ale mohou mít složitější tvar s výstupky apod. Výsledný požadovaný tvar proto přímo ovlivňuje volbu jádra. Například zakřivené sendvičové panely nemohou využívat voštinové jádro hexagonálního typu, protože by se jádro deformovalo a nesplňovalo by požadované vlastnosti. Musí se tedy zvolit jiný konstrukční typ voštinového jádra nebo se musí využít pěnové jádro. [5]

1.4.1 Pěnová jádra

Pěnová jádra jsou nejčastější výplní sendvičových panelů. Nejčastěji jsou vyrobeny z termoplastů. Typy běžných termoplastických pěn:

- Polyuretan (PUR)
- Polypropylen (PP)
- Polyetheramid (PEI)
- Polykarbonát
- a další...

Pěnová jádra se vyznačují dobrými izolačními vlastnostmi a dobrou odolností proti vlhkosti a chemikáliím za relativně nízké ceny. Důležitou roli pro využívání pěnových jader hraje hmotnost. Negativní vlastností je náchylnost k tečení (creep). [9]

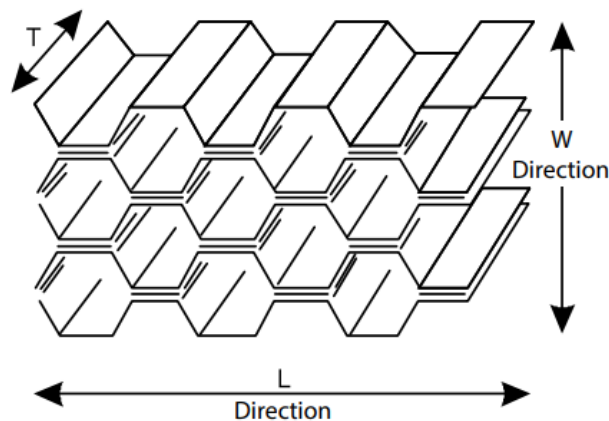
1.4.2 Voštinová jádra

Voštinová jádra si můžeme nejčastěji představit například jako včelí plástve. Tvar šestiúhelníků je inspirován včelími plástvi pro své vlastnosti v přírodě. Voštiny ale mohou mít různé tvary dle požadovaných vlastností. Volí se pro aplikace vyžadující vysokou tuhost za nízké hmotnosti. [10] Nízké hmotnosti je dosaženo díky prázdným dutinám. Voština funguje na principu úzké stěny, která je kolmá na vnější vrstvy. Voština samotná je často velice ohebná či stlačitelná. Samotná by nedosahovala potřebných vlastností. V kombinaci s vnějšími vrstvami však dosahuje vynikajících vlastností, které jsou jmenovány v odstavci 1.2.

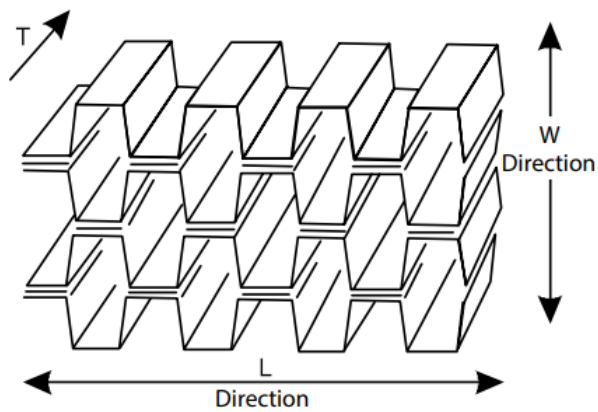
Voština může být vyrobena z různých typů kovových i nekovových materiálů a může mít různé tvary. Firmy zabývající se výrobou voštinových jader nabízí i výrobu specifických tvarů přímo na míru konkrétní aplikaci.

Příklad typů voštinových jader od firmy Hexcel:

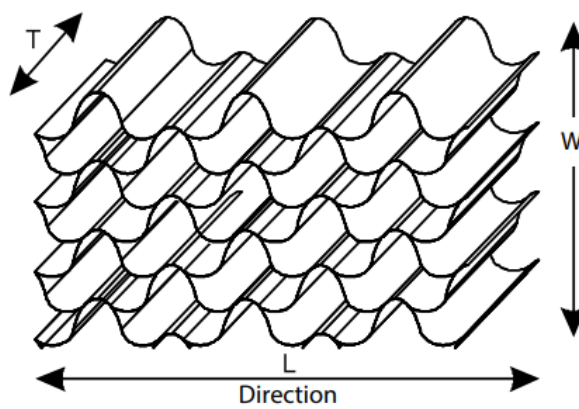
- Šestihranné (hexagonální) jádro – včelí plástve (obr. 7)
- OX-Core – obdélníkový tvar buňky či smrsknuté šestihranné jádro (obr. 8)
- Flex-Core – vlnitý tvar, díky tvaru do sebe stěny zapadají a nevybočují, vhodné pro tvarování (obr. 9)
- Double-Flex – obdobné vlastnosti jako Flex-Core, ale má lepší kompresní vlastnosti (obr. 10)
- Reinforced Hexagonal – vyztužené šestihranné jádro, poskytuje vyšší hustotu, ideální pro aplikace s vysokým zatížením (obr. 11) [10]



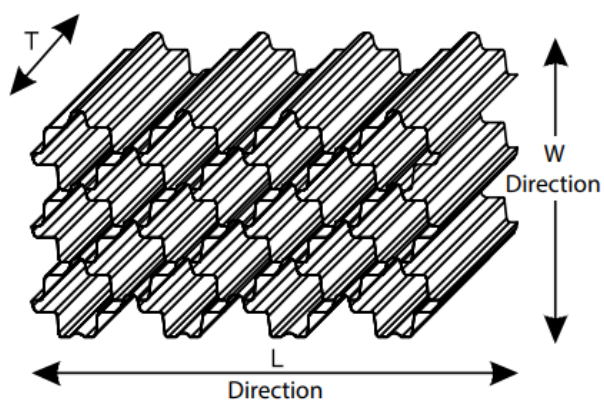
Obrázek 7 Hexagonální voštinové jádro [10]



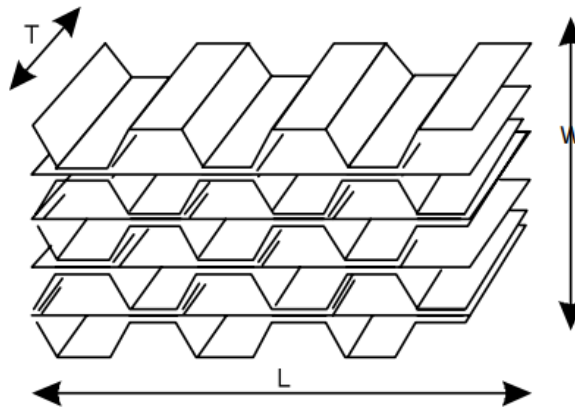
Obrázek 8 OX-Core voštinové jádro [10]



Obrázek 9 Flex-Core voštinové jádro [10]



Obrázek 10 Double-Flex voštinové jádro [10]



Obrázek 11 Reinforced Hexagonal voštinové jádro [10]

1.4.3 Vlnitá jádra

Vlnitá jádra (obr. 6) tvoří otevřené kanály v jednom směru. Jejich hlavním úkolem je zpevnit čelní strany panelů. Jinak se využívají všude tam, kde pěnová jádra nejsou ideálním řešením a voštinová jádra jsou zbytečně kvalitní. Oproti klasickým voštinovým jádrům má jednodušší konstrukci, což ovlivňuje výrobní náklady.

Nejběžnější typy:

- Zaoblená vlnitá jádra
- Lichoběžníková vlněná jádra [6]

1.5 Využití sendvičových panelů

Sendvičové struktury nalezneme převážně v konstrukcích letadel jako podlahy, vnitřní obložení nebo konstrukce skříněk pro personál. Další uplatnění nachází v železniční dopravě rovněž jako konstrukční prvek nábytku, dveří, obložení apod. Díky tlumícím a absorpčním vlastnostem je vhodným materiálem pro nárazníky nebo blatníky. [10] Dále se sendvičové struktury hojně využívají ve stavebnictví jako fasádní systém skladů a výrobních hal. [11]

Také v automobilovém průmyslu, na který je tahle práce zaměřená, nachází sendvičové panely hojně uplatnění. Trendem dnešní doby v automobilovém průmyslu je snižování hmotnosti za účelem snižování emisí. Čím nižší hmotnost vozidla, tím nižší spotřeba energie na pohon a tím nižší emise. [1] Ideální podmínky pro využití vlastností sendvičových panelů.

Aktuálně nacházejí sendvičové panely uplatnění v několika typech vozidel. Ze sendvičových panelů jsou v dnešní době vyráběny stěny, stropy a podlahové panely nákladních automobilů. Konkrétní příklady jsou zobrazeny na obr. 12. Oproti původním kovovým konstrukcím dochází k úspoře hmotnosti a zvýší se izolační vlastnosti. [12]



Obrázek 12 Sendvičové panely v nákladním prostoru užitkových automobilů [13]

Uplatnění také nachází ve speciálních vozidlech (sanitky apod.) jako materiál pro tvorbu regálů a úložných prostor nebo v mrazících nástavbách chladírenských užitkových vozů. Uplatnění také nachází v konstrukci obytných automobilů. [7] [12]

V kategorii sportovních vozů mají sendvičové panely uplatnění například v podvozkové části či jako zadní difuzor. Nalézt je také můžeme v konstrukci kapot sportovních rallye aut. [2] [13]

Sendvičové panely se hojně vyskytují i v konstrukcích autobusů. Využívají se na konstrukce stropů, podlah nebo jako podlahy zavazadlových prostorů. [13]

Uplatnění mají i jako konstrukce skládacích nájezdových ramp pro vozíčkáře (obr. 13). Nalézt je můžeme např. v autobusech a tramvajích. [5] [13]

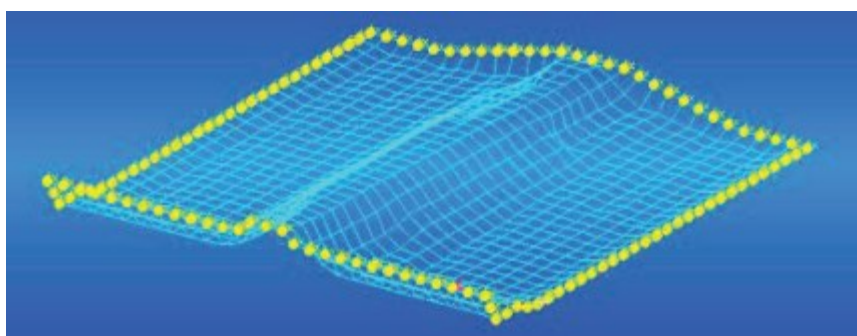


Obrázek 13 Skládací rampa pro vozičkáře [13]

1.5.1 Studie využití sendvičových struktur v karoserii automobilu značky FIAT

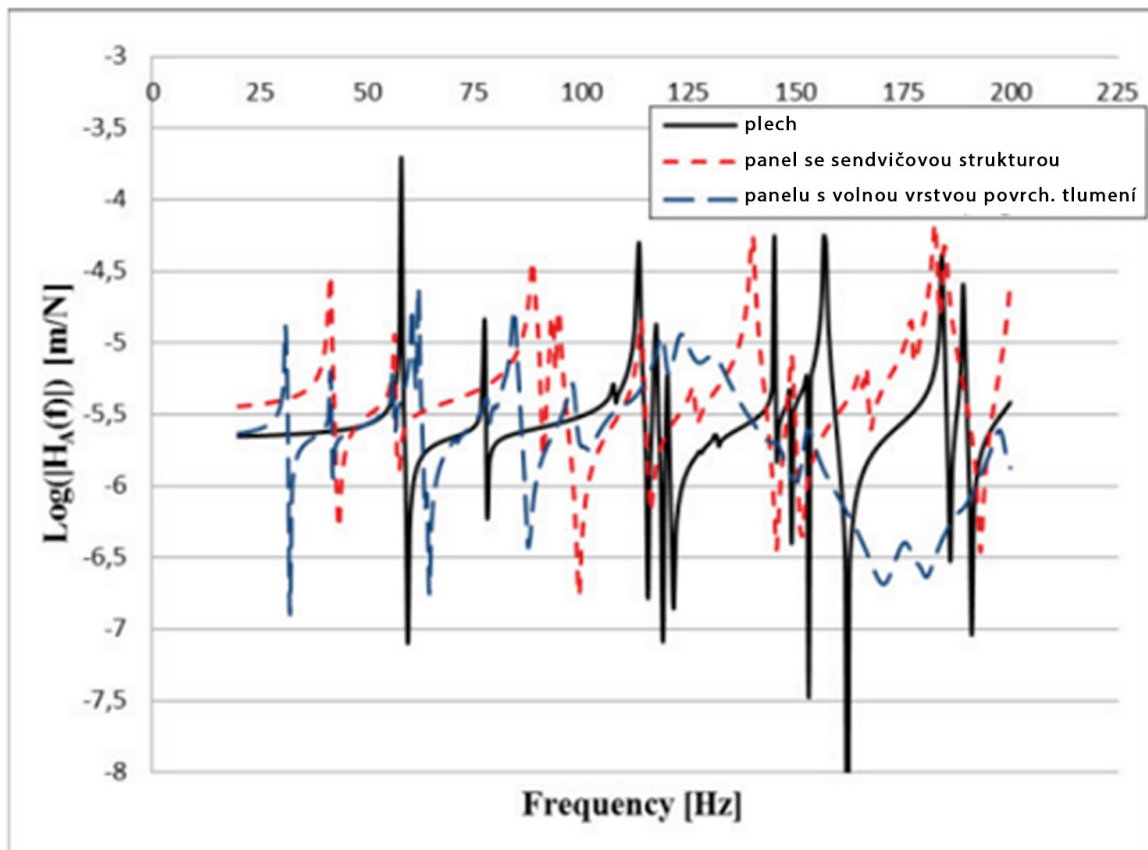
V roce 2016 byla provedena studie, která porovnává původní konstrukci automobilu značky Fiat s konstrukcí využívající sendvičové struktury. Konkrétně byl nahrazen podlahový panel (obr. 14), panel u zadních kol a panel zavazadlového prostoru. Tvar byl zachován, ale nahrazen sendvičovou strukturou. Cílem studie bylo zjistit nejnižší váhu sendvičového panelu, který by měl stejné vlastnosti jako původní konstrukční řešení s volnou vrstvou povrchového tlumení. [1]

Studie porovnávala výsledky pomocí metody frekvenční odezvové funkce (Frequency Response Function – FRF). Metoda FRF vytváří vstupní signál a následně měří odezvu soustavy. Studie konkrétně porovnává vlastnosti podlahového panelu pod sedadly. [1]



Obrázek 14 Podlahový panel auta značky FIAT [1]

Frekvenční odezvu na vstupní signál podlahového panelu s plechem (steel), panelu se sendvičovou strukturou (laminated steel) a panelu s volnou vrstvou povrchového tlumení (damping treatment) a její porovnání můžeme vidět na grafu č. 1. [1]



Graf 1 Porovnání frekvenční odezvy podlahového panelu s plechem (steel), panelu se sendvičovou strukturou (laminated steel) a panelu s volnou vrstvou povrchového tlumení (damping treatment) [1]

V tabulce č. 1 můžeme vidět podobná čísla v prvních několika režimech. Sendvičovou strukturou s přidavkem 0,1 mm viskoelastického materiálu docílíme stejných vlastností jako u původního ocelového panelu s volnou vrstvou povrchového tlumení. Aplikováním sendvičové struktury by se docílilo 68% snížení hmotnosti. Použitím sendvičových struktur bychom tedy docílili nižší hmotnosti karoserie a tím snížení emisí díky poklesu spotřeby energie. [1]

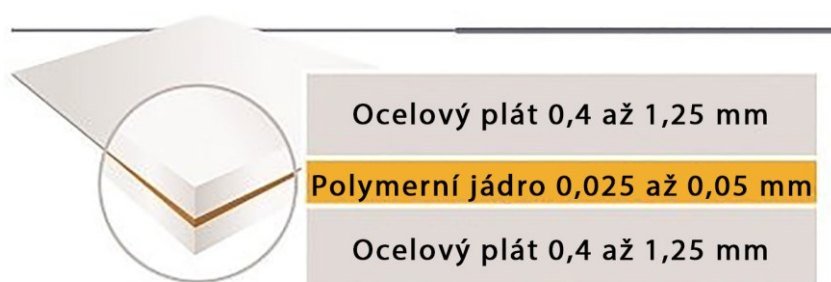
Tabulka 1 Porovnání ztrátových faktorů sendvičové struktury a volné vrstvy povrchového tlumení [1]

Metoda	Režimy [Hz]					
	1	2	3	4	5	6
Sendvičový panel	0,011	0,009	0,010	0,010	0,025	0,039
Vrstva povrchového tlumení	0,01	0,0096	0,011	0,0012	0,0255	0,0037

1.6 Ve strojírenství nejznámější používané sendvičové struktury

1.6.1 Bondal

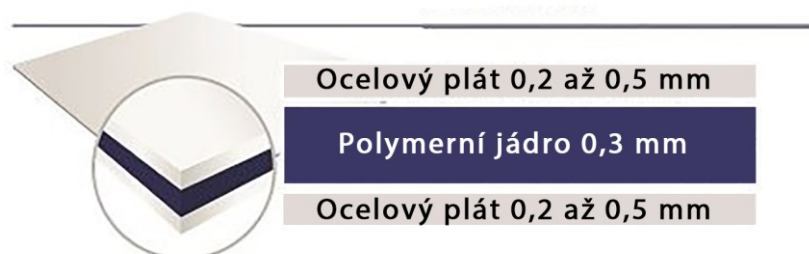
Vyvinutý společností ThyssenKrupp Steel AG. Tvoří jej dva krycí ocelové plechy, mezi kterými je polymerní jádro, jak můžeme vidět na obr. 15. Jádro má velikost okolo 0,05 milimetrů. Bondal se vyznačuje vysokým tlumícím účinkem, skvělou tvárností a odolností proti korozi. Díky svým vlastnostem nachází uplatnění převážně v automobilovém průmyslu. Konkrétně jej můžeme naléznout v dílech převodovek nebo agregátů. Nevýhodou jsou nízké sřížné vlastnosti. [2] [14]








Obrázek 15 Sendvičová struktura s obchodním názvem BONDAL [2]

1.6.2 Litecor

Sendvičový panel taktéž na bázi polymerního jádra od firmy ThyssenKrupp Steel AG. Oproti sendvičovému panelu typu Bondal má tlustší nejen jádro, ale i vnější vrstvy. Rozměry a jednotlivé vrstvy můžeme vidět na obr. 16. Je vhodný pro části karoserií díky svým deformačním vlastnostem. Porovnání vlastností oproti hliníku a oceli můžeme vidět na obr. 17. Oproti oceli má výrazně nižší hmotnost. Oproti hliníku nedochází k hmotnostní úspoře, ale ke snížení nákladů. Litecor je tedy ideálním kompromisem mezi ocelí a hliníkem. [2]



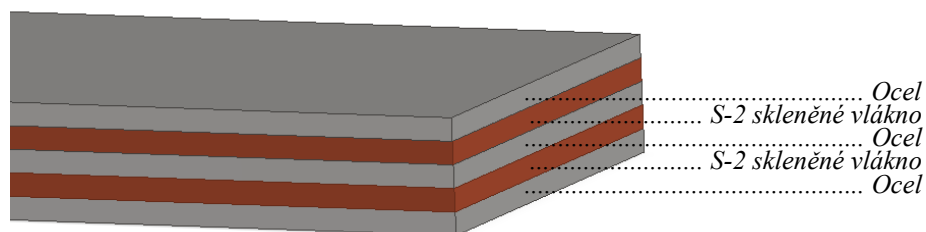
Obrázek 16 Sendvičová struktura s obchodním názvem LITECOR [2]

Tloušťka	Hustota (kg/m ²)	Ohybová tuhost		
0,75 mm	5.8	100%	Ocel (reference)	
1.0 mm	2.7	79%	Hliník	
0.20/0.40/0.20 = 0.80 mm	3.5	106%	LITECOR	
0.25/0.40/0.20 = 0.85 mm	3.9	129%	LITECOR	
0.25/0.60/0.20 = 1.05 mm	4.2	209%	LITECOR	

Obrázek 17 Porovnání vlastností sendviče LITECOR oproti hliníku a oceli [2]

1.6.3 Glare

Sendvičový kompozitní panel složený z vrstev hliníku a výztuhy ve formě skelných vláken (obr. 18). Nalézt jej můžeme v konstrukcích letadel Airbus 380. Využitím Glare v konstrukci letadla dochází k veliké úspoře hmotnosti, zhruba 15-30 %. Vyvinula jej firma Delft University of Technology z Nizozemska. [14] [15]

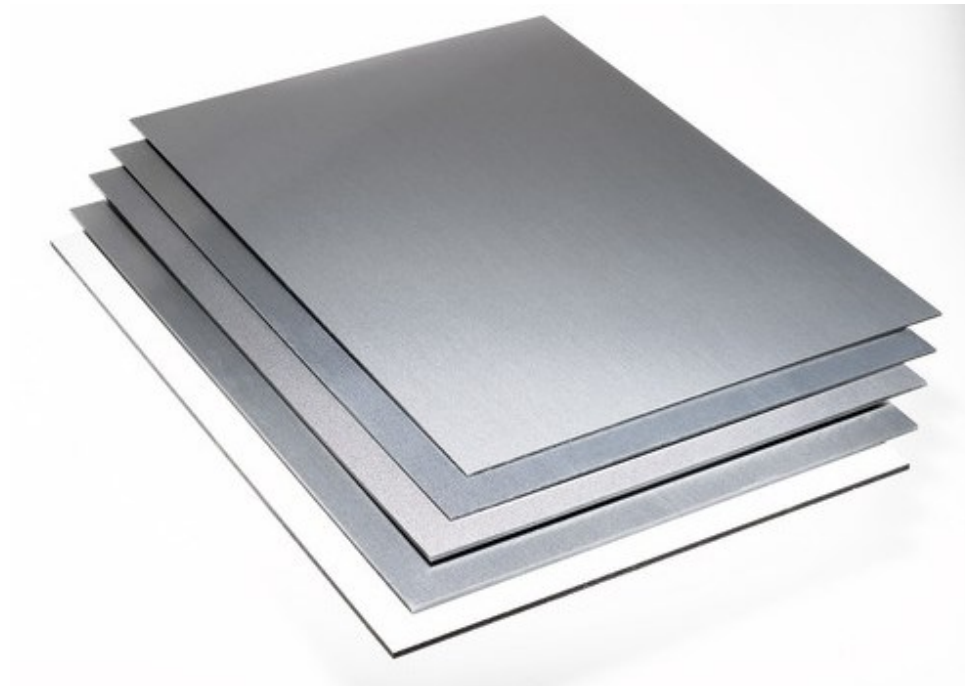


Obrázek 18 Sendvičová struktura s obchodním názvem GLARE [15]

1.6.4 Hylite

Sendvičový panel složený z hliníku a polypropylenového jádra (obr. 19). Je to jeden z nejtenčích kompozitních sendvičových panelů. Nejtenčí varianta je 1,2 mm. Má dobrou tvarovatelnost a po konstrukčních úpravách má vysokou odolnost proti opakovanému ohýbání. Dále má dobrou odolnost proti korozi a dobré tlumící vlastnosti. Využití nachází u

zemědělských strojů jako opláštění, v konstrukcích karavanů, krycích skříní strojů apod.
[14] [16] [17]



Obrázek 19 Sendvičová struktura s obchodním názvem Hylite [18]

2 MATERIÁLOVÉ TRENDY V AUTOMOBILOVÉM PRŮMYSLU

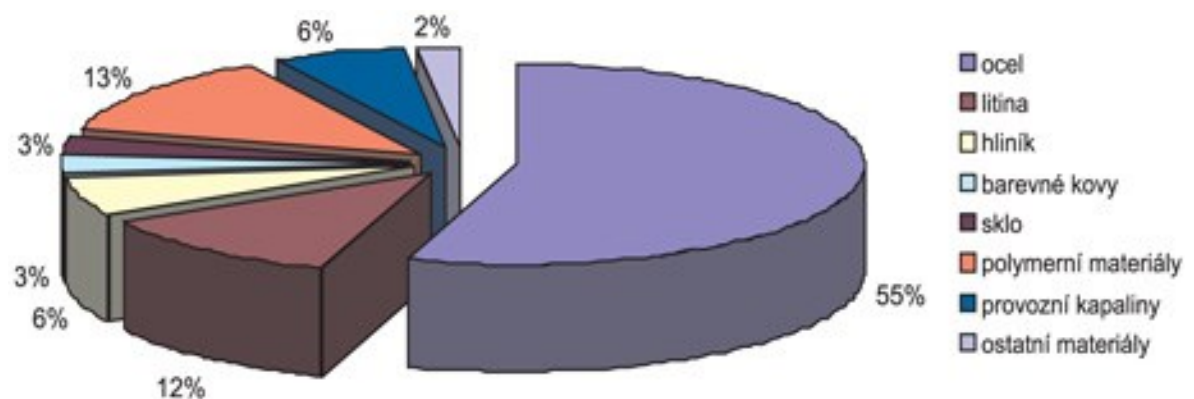
2.1 Materiály využívané v automobilovém průmyslu

Automobilový průmysl patří k nejvlivnějším průmyslovým odvětvím. Materiálové trendy se v čase zásadně mění a požadavky automobilového průmyslu mají široký dopad na dodavatelské firmy. Výroba dnešních automobilů kromě nízkých nákladů na výrobu klade důraz jak na přísné podmínky emisí škodlivin, tak na nízkou spotřebu paliva. [19]

Tyhle podmínky mají vliv na materiály, které musí plnit tyto základní kritéria:

- Nízká cena
- Nízká váha
- Snadná výroba a montáž
- Recyklovatelnost [19]

Automobil se skládá ze spousty druhů materiálů, jako například ocel, litina, hliník a další. V čase jsou některé materiály postupně nahrazovány jinými materiály s lepšími vlastnostmi. Výrobci automobilů se však mezi sebou liší, jak v konstrukci, tak v použitých materiálech. Základní materiály, které se vyskytují v osobních automobilech a jejich procentuální zastoupení můžeme vidět na grafu 2. [19]

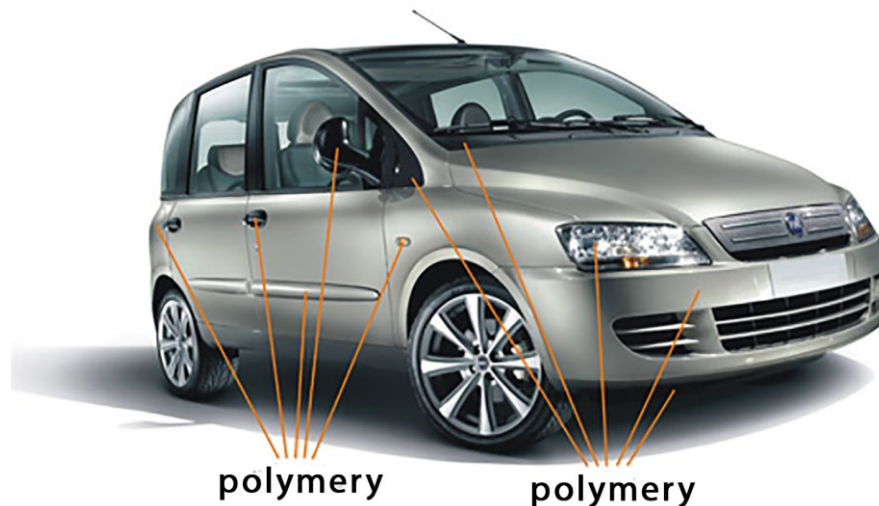


Graf 2 Procentuální zastoupení materiálů v osobních automobilech [19]

2.2 Polymerní materiály v automobilech

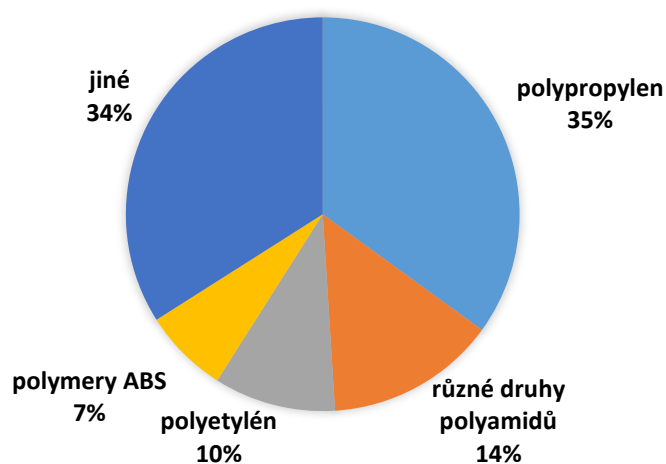
Trendem posledních let je elektronizace automobilů, což má vliv na navyšující se množství polymerních komponentů. Dříve nebyla nabídka polymerních materiálů tak bohatá jako

dnes. Bylo proto jejich zastoupení v automobilech nízké. Razantní vzestup nastal okolo sedmdesátých let. Zvyšující se požadavky na pasivní bezpečnost a snižování cen odstartovaly postupné nahrazování kovových částí lehkými polymery. Na obr. 20 můžeme vidět příklady polymerních komponentů. [19]



Obrázek 20 Příklad lehkých polymerních materiálů na automobilu [19]

Množství použitých polymerů se odvíjí od technické úrovně konstrukce a velikosti daného automobilu. Aktuálně se ve střední třídě použije na výrobu jednoho automobilu obvykle okolo 140 kg polymerů, které mají největší procentuální zastoupení v karosérii a nejmenší pak v podvozku. Procentuální zastoupení různých typů polymerních materiálů můžeme vidět na grafu 3. [19]



Graf 3 Procentuální zastoupení polymerních materiálů v automobilech [19]

Polypropylen a jeho směsi mají širší uplatnění díky široké variabilitě mechanických vlastností. Vliv mají také jeho estetické vlastnosti a ekonomická výhodnost. [19]

V dnešní době se také často sahá po kompozitních materiálech, které jsou tvořeny dvěma i více složkami. Každá složka má jiné vlastnosti, což dohromady vytváří zcela nové vlastnosti. [19]

Známé kompozitní materiály, ze kterých se vyrábí extrémně pevné nebo lehké díly jsou:

- Skelný laminát
- Kevlar (z uhlíkových vláken)
- Karbon – kevlar
- Bazalt – aramid [19]

Kompozitní materiály se vyznačují vysokou odolností proti deformaci a mají vysokou mez únavy. Zároveň jsou ohnivzdorné, ale jejich výpary mohou být toxické. Využívají se hlavně pro ulehčení údržby za zvýšené spolehlivosti a životnosti. Příklad využití je zobrazen na obr. 21. [19]



Obrázek 21 Příklad využití kompozitních materiálů v automobilovém průmyslu [20]

3 SMART PRINCIP

3.1 Význam

SMART princip je technika efektivního navrhování plánů a cílů v řízení podniku a výroby. Název SMART je zkratka z počátečních písmen anglicky znějících názvů cílů, které tahle metoda využívá:

- **S – Specific** – konkrétně zadaný a specifikovaný cíl
- **M – Measurable** – měřitelnost cíle, díky které získáme jasný důkaz o jeho splnění
- **A – Achievable/Acceptable** – reálná dosažitelnost cíle
- **R – Realistic/Relevant** – cíl by měl být splnitelný z dostupných zdrojů
- **T – Time Specific/Trackable** – přesný časový plán a snaha o jeho dodržování [21]

3.2 Aplikace v praxi

Metoda slouží pro zlepšení a zefektivnění řízení podniku a plánování výroby. Pokud bude náš cíl splňovat všechny vlastnosti metody SMART, bude snáze dosažitelný a bude se lépe hodnotit úroveň jeho splnění. I když by naše prvotní plány byly více obecné a nesplňovaly by všechny zmíněné vlastnosti metody SMART, měli bychom poté postupně vytvářet konkrétní cíle pro jednotlivé části, tak abychom plně dosáhli všech vlastností této metody. Metoda je v principu jednoduchá, ale v praxi občas obtížně splnitelná. [21] [22]

3.2.1 Konkrétní příklad využití metody SMART

Špatně stanovené cíle:

1. Snížení spotřeby elektrické energie
2. Automatizace výroby

Cíle stanovené pomocí metody SMART:

1. V každém čtvrtletí roku 2020 dosažení a udržení 5% snížení elektrické energie ve výrobních halách oproti roku 2019.
2. Do konce roku 2023 nahrazení 5 pracovních pozic v lisovací hale stroji nezávislými na lidské práci. [22]

4 SENZORY A SNÍMAČE

Nové materiály a struktury, v našem případě sendvičové panely, jsou díky svým výhodám používány ve větším množství. Jejich chování oproti klasickým konvenčním materiálům však může být rozdílné. Proto je zapotřebí při testování monitorovat jejich chování a případné poruchy ve struktuře materiálu. Dále se nové materiály a struktury mohou využívat pro integraci senzorů a aplikaci kontrolních prvků pro snímání chování a propojení s řídicími prvky. [23] Tato bakalářská práce se zaměřuje na jednu podskupinu senzorů, a to konkrétně na mikrosenzory.

4.1 Mikrosenzory

Mikrosenzory mají, jak již název napovídá, nízké rozměry, a to v řádech milimetrů a méně. Oproti klasickým senzorům mají díky malým rozměrům lepší hlavně dynamické vlastnosti. Za konkrétních podmínek a definovaných vlastností jsou jejich výrobní náklady nižší než běžné senzory větších rozměrů. [24]

4.1.1 Rozdělení mikrosenzorů

Mikrosenzory se mohou dělit podle různých vlastností. Např. podle výstupního signálu, podle lidských smyslů nebo podle funkce. V následující tabulce č. 2 můžeme vidět rozdělení mikrosenzorů podle lidských smyslů. [24]

Tabulka 2 Rozdělení mikrosenzorů podle lidských smyslů [24]

LIDSKÝ SMYSL	SIGNÁL	MĚŘENÁ VELIČINA	SENZOR
ZRAK	Záření	Intenzita a vlnová délka	Fotografický film, fotodioda, fototranzistor
SLUCH	Mechanický	Intenzita a frekvence zvuku	Mikrofon
HMAT	Mechanický	Tlak, síla	Potenciometry, posunutí, optický, taktilní
ČICH	Chemický	Vůně	Elektrický nos
CHUŤ	Biologický	Proteiny	-

4.1.2 Mikrosenzory s mechanickým signálem

Mikrosenzory, které měří mechanické vlastnosti tvoří největší skupinu mikrosenzorů. Mechanických vlastností, které se dají měřit a vyhodnocovat, je spousta. Proto se i mechanické mikrosenzory dále pro větší přehlednost dělí např. dle měřených veličin viz tabulka č. 3. [24]

Tabulka 3 Rozdělení mikrosenzorů podle mechanických veličin [24]

1. poloha a posuv	5. mechanické namáhání, tlak	9. průtok, hladina
2. rychlost	6. deformace	10. tvar, nerovnosti
3. akcelerace	7. tuhost, poddajnost	11. viskozita
4. síla, torze	8. hmota, hustota	12. ostatní

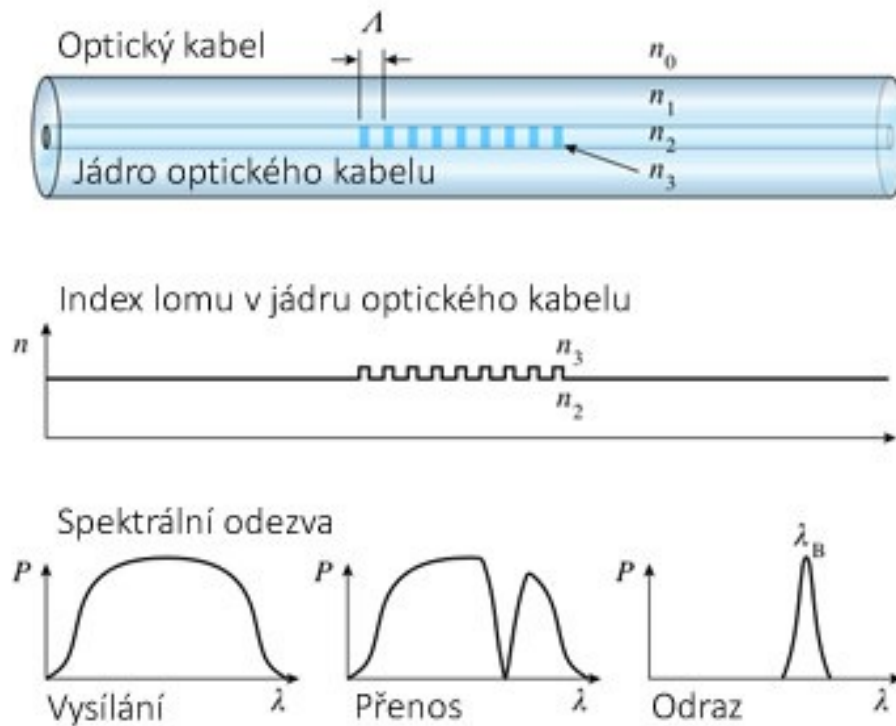
4.2 Senzory využívané v sendvičových strukturách

Ve vrstvených strukturách je obtížné používat běžné povrchové nebo externí senzory pro účinné monitorování vnitřního poškození. Důležitým faktorem pro správně zvolený senzor je také přežití výroby, a to konkrétně vytvrzovacího cyklu, kde mohou být teploty až 200 °C. Vhodným řešením se proto jeví mikrodrátové senzory, kterou se při výrobě zabudují do konstrukce struktury. Vhodnými senzory jsou optické vláknové senzory. Konkrétně optické vláknové mřížky (Fiber Bragg Grating – FBG) a optické senzory měřící zpětný rozptyl v časové oblasti (Optical Time Domain Reflectometer – OTDR). [25] [26] [27]

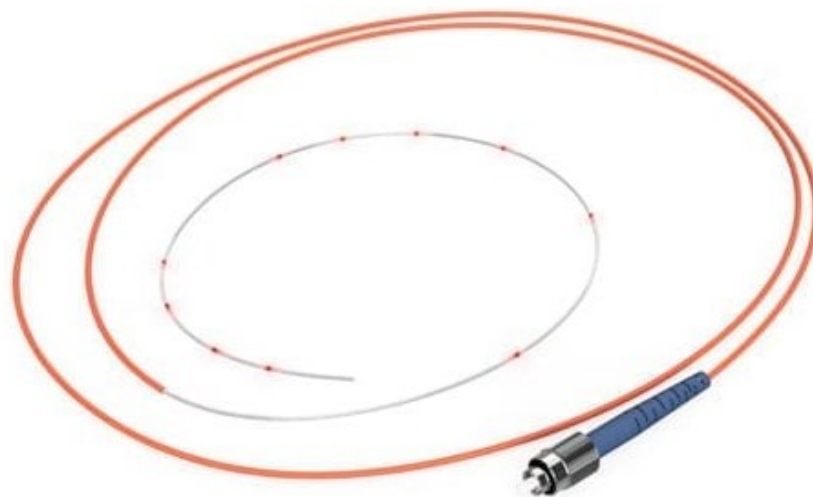
Reálnost použití senzorů typu FBG a OTDR v sendvičových strukturách popisuje studie z roku 2000 od autora D. Balagease. [25] Výsledek studie říká, že senzory dokážou snímat a lokalizovat škody způsobené nárazem. Je však nutné, aby senzory byly v poškozené oblasti. Musí se tedy dbát na správné rozvržení sítě senzorů. [25]

4.2.1 FBG senzory

FBG senzory (obr. 23) jsou optické senzory fungující na principu tzv. Braggovy mřížky, které měří průměrné mechanické napětí nebo deformaci (obr. 22). Jsou tenké jako vlas a jejich hmotnost je velice nízká. Což z nich dělá vhodnou aplikaci pro složité struktury. Jejich výhodou je vícebodové měření a připojení více senzorů do jednoho optického vlákna. Tloušťka FBG senzoru může mít například 1550 nm nebo 850 nm. [26] [28]



Obrázek 22 Funkce FBG senzoru [29]

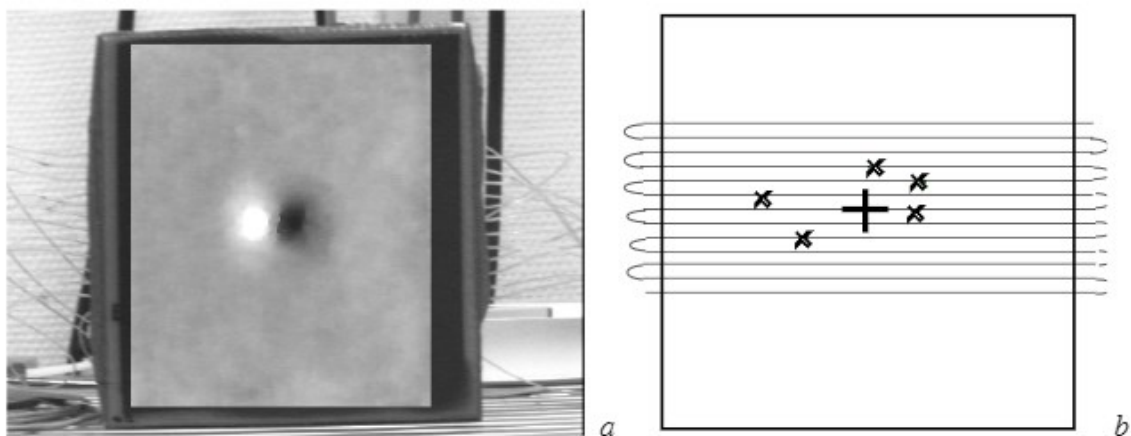


Obrázek 23 FBG senzor [28]

4.2.2 OTDR senzory

OTDR je senzor využívající pro svou funkci optická vlákna podobně jako FBG senzory. Fungují na principu proudění pulzního laserového světla, které svým rozptylem nebo odrazem a dobou návratnosti dodávají informace o stavech spojů, defektů apod. OTDR je

rovněž senzor o malém průřezu (obr. 25). Ukázku detekce nárazů pomocí senzorů OTDR můžeme vidět na obr. 24. [30]



Obrázek 24 Ukázka detekce nárazu pomocí senzorů OTDR [25]



Obrázek 25 Kabeláž ke snímání metodě OTDR dostupná z e-shopu Amazonu [31]

4.3 Senzory v automobilovém průmyslu

Senzory a snímače jsou v dnešní době nepostradatelnými prvky moderních automobilů. Obecně se definují jako zařízení, které transformují fyzické veličiny (tlak, zrychlení apod) do výstupního signálu, který dále slouží jako vstup pro řídicí systémy. Zprvu se senzory v automobilech používaly k měření tlaku oleje, hladiny paliva, teploty chladicí kapaliny atd. Potřeba senzorů s dobou a technologiemi neustále roste. Tenhle vzestupný trend můžeme sledovat u motoru, kde se počet senzorů z přibližně deseti v roce 1995 vyšplhal na více než

třicet v roce 2010. Pronikání elektrických systémů a související potřeba senzorů je znázorněna v tabulce č. 4. [32]

Tabulka 4 Faktory, které pohánějí integraci senzorů v automobilovém průmyslu (dle automobilového trhu v Severní Americe) [32]

Pohonná jednotka: 1. vlna: Pokračující růst v důsledku legislativy	
80. léta a 90 léta	Poháněné snížením emisí, spotřebou paliva, palubní diagnostikou, legislativou: <i>Regulace poměru paliva a vzduchu, zhoršení kvality katalyzátoru, vynechávání motoru, diagnostické systémy, tempomat, elektronické řízení přenosu</i>
rok 2000 a dále	Poháněné legislativou pro vozidla s velmi nízkými emisemi, přidány požadavky na funkci a nejlepší jízdní vlastnosti oproti konkurenci: <i>Vstřikování paliva tlakovými senzory Common Rail, variabilní načasování ventilů, optimalizované řízení motoru na bázi spalování</i>
Podvozek: 2. vlna: Stabilní růst díky poptávce po výkonu	
80. léta a 90 léta	Poháněné bezpečnostními a komfortními prvky: <i>ABS – brzdový senzor, senzor trakce, kontrola stability vozidla, elektrický posilovač řízení, tlak vzduchu v kolech</i>
rok 2000 a dále	Poháněné bezpečností, snížením hmotnosti a nákladů, multiplexní kompatibilitou, legislativou: <i>Stabilizační systémy vozidla, plně aktivní odpružení, ...</i>
Karoserie: 3. vlna: Urychlení růstu díky personalizaci vozidla	
80. léta a 90 léta	Poháněné bezpečnostní legislativou, zabezpečením, pohodlím a elektrickým pokrokem: <i>Airbagy proti čelním a bočním nárazům, systém ochrany před krádeží, paměťová sedadla, navigace</i>
rok 2000 a dále	Poháněné bezpečností, novou legislativou a inteligentními transportními systémy: <i>Pokročilé airbagy, ochrana proti převrácení, předcházení kolizím, inteligentní/radarový tempomat, provoz v reálném čase a navigace</i>

Obecně můžeme říct, že v motorovém prostoru automobilu převládají senzory rotačního pohybu, tlaku a teploty. V podvozku převládají senzory inerciálního zrychlení a uhlové rychlosti. [32]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

5 CÍLE

Cílem praktické části bakalářské práce bylo:

- a) Navrhnout vhodnou součást pomocí hybridního SMART sendvičového panelu do konstrukce automobilu.
- b) Vytvořit 3D model ve zvoleném programu Autodesk – Inventor 2019, uvést význam SMART panelu z pohledu bezpečnosti.
- c) Volba materiálů pro daný produkt a výrobní možnosti:
 1. volba materiálu pro vnější vrstvy,
 2. volba vhodných polymerních jádrových materiálů pro navrženou aplikaci.
- d) Základní napěťová a deformační analýza vytvořených vzorků, vyhodnocení průhybu.
- e) Porovnání vlivu integrace senzorů na průhyb sendvičových panelů.
- f) Další možnosti integrace senzorů.
- g) Diskuse dosažených výsledků.

6 NÁVRH SMART APLIKACE

Při uvažování nad možnostmi využití sendvičové struktury s aplikovanými senzory v automobilovém průmyslu jsem volil oblast, která by využila přednosti sendvičové struktury a zároveň by zvýšila bezpečnost vozidla. Jako vhodnou aplikaci hybridního SMART sendvičového panelu jsem navrhl podlahu úložného prostoru užitkových vozů.

6.1 Návrh 3D modelu

Návrh 3D modelu jsem vytvořil podle dostupných rozměrů nákladního prostoru (obr. 27) užitkového automobilu – Transporter typ T5/T6 (2003 a mladší) od německé firmy Volkswagen (obr. 26).



Obrázek 26 Volkswagen Transporter typ T5 [33]

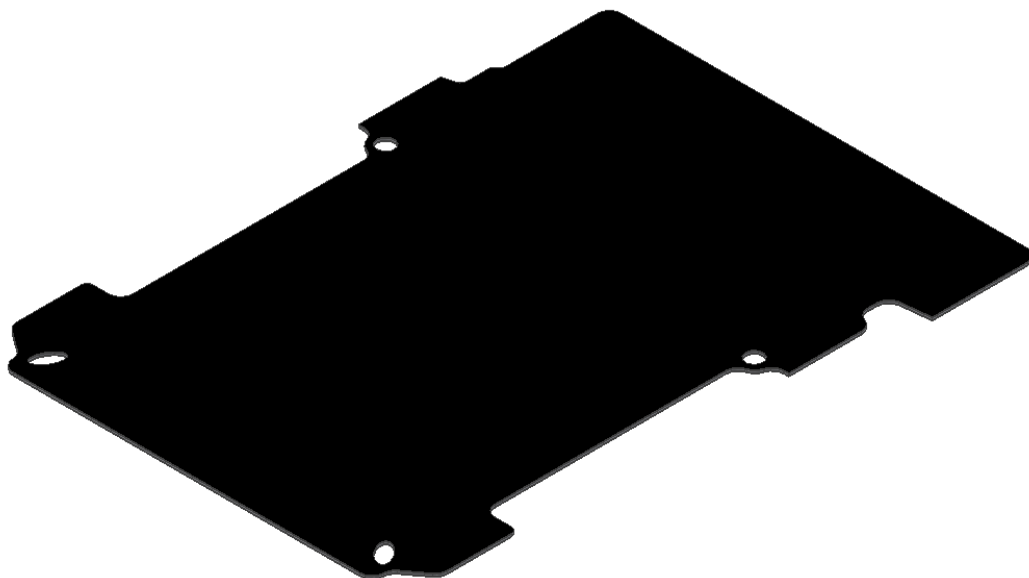


Obrázek 27 Nákladový prostor vozu Volkswagen Transporter typ T5 [33]

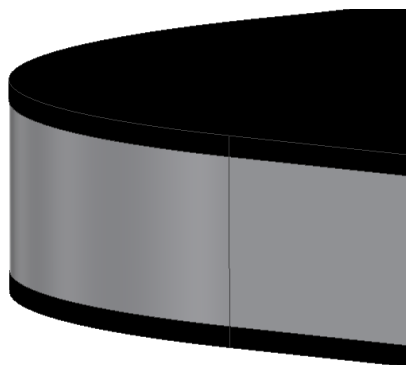
Pro prvotní návrh a testování jsem se rozhodl vytvořit panel, který by se na stávající podlahu Transporteru položil a mohly by se tak jeho vlastnosti snadno testovat.

Užitkové vozy se často hojně upravují tak, aby splňovaly požadavky pro konkrétní využití. Nákladový prostor se často různými úpravami tepelně izoluje a odhlučňuje. Dále se také na plochu úložného prostoru umisťují panely nebo vložky s protiskluzným povrchem. Kromě úprav pro využití na převoz nákladu se najdou kutilové, kteří přestavují užitkové vozy na obytné vozy. V rámci přestavby taktéž řeší izolaci a odhlučnění podlahy. Často se pro takovou úpravu podlahy využívají izolační vrstvy jako například skelná vata nebo polystyren. Pevnou horní vrstvu většinou tvoří překližka tloušťky nejčastěji 12 mm. Všemi úpravami samozřejmě dochází k značnému nárůstu hmotnosti. Navržením vhodného sendvičového panelu a následným nahrazením plechové karoserie by měly být starosti s izolací a odhlučněním vyřešeny. Rovněž by nemělo docházet k hmotnostnímu nárůstu.

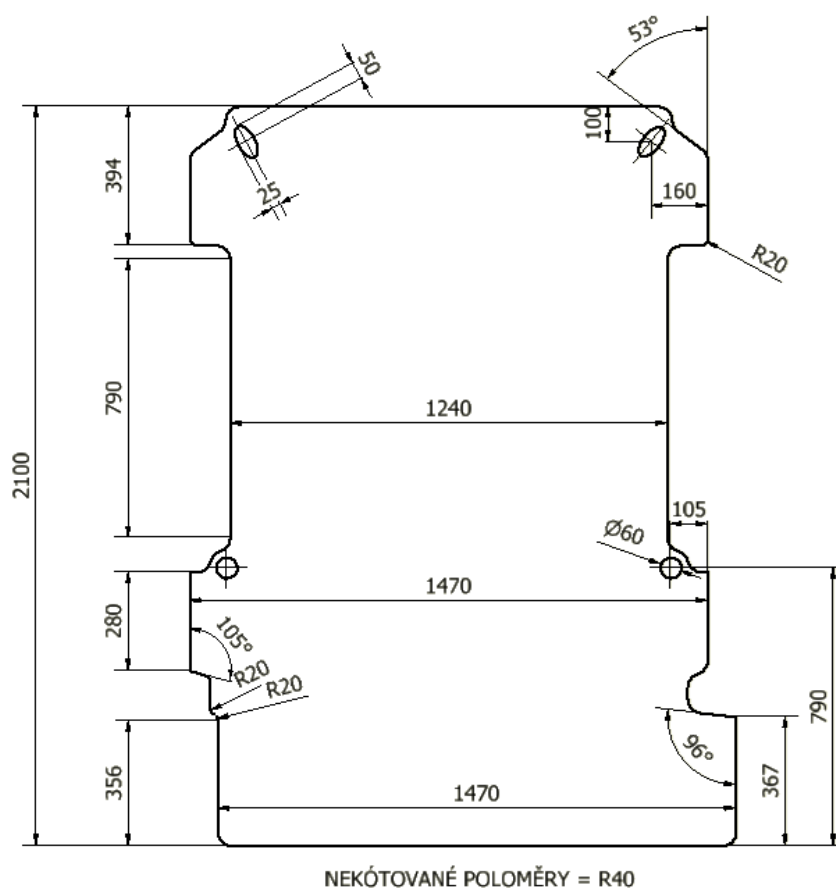
Tvar a rozměry pro vytvoření 3D modelu sendvičového panelu byly použity dle produktu z webu Auto Hotárek. Finální tvar a náhled vrstev sendvičového panelu je zobrazen na obr. 28, 29 a 30. [34]



Obrázek 28 3D návrh sendvičového panelu na podlahu užitkového vozu Transporter typ T5/T6



Obrázek 29 Pohled na jednotlivé vrstvy sendvičového panelu na podlahu užitkového vozu Transporter typ T5/T6



Obrázek 30 Základní rozměry navrženého sendvičového panelu

Pro 3D model jsem neuvažoval voštinové jádro, jelikož by při zatížení mohlo dojít k přestřižení senzorů ostrými hranami voštinového jádra.

Kromě vyřešení zmíněných problémů by panel sloužil ke zlepšení bezpečnosti užitkového vozu. U užitkových vozů může a často taky dochází k nerovnoměrně zatížené nákladní

ploše. Pokud přetížíme jednu stranu vozidla, může se vozidlo chovat nevyzpytatelně v zatáčkách a při brzdění. Dále má nevyváženost vozidla vliv na nerovnoměrné opotřebení pneumatik a brzdové soustavy. Každé vozidlo, které opouští výrobní linku je perfektně vyváženo tak, aby nedocházelo k výše zmíněným problémům. Rovnovážnému zatížení nákladového prostoru se podle mě nevěnuje velká pozornost. Kontrola rovnoměrného zatížení by mohla být prováděna pomocí senzorů, které by snímaly rozvržení zatížení úložného prostoru. Pomocí vhodného softwaru by se na obrazovce v kabině řidiče objevilo vyhodnocení rovnoměrného zatížení.

Integrací senzorů do sendvičové struktury dojde ke změně mechanických vlastností panelu. Jak velký vliv má integrace senzorů na mechanické vlastnosti sendvičových panelů bylo předmětem mého testování.

6.2 Zvolené materiály

Pro vnější vrstvy jsem zvolil vláknitě vyztužený prepreg modifikovaný epoxidovou pryskyřicí HexPly® M77HF od firmy Hexcel. Prepregy od téhle firmy můžeme nalézt v hojném zastoupení např. v konstrukci v Airbusu A350 XWB. Vlastnosti zvoleného materiálu jsou uvedeny v tabulce 5. [35]

Tabulka 5 Vlastnosti zvoleného materiálu od firmy Hexcel [35] [36]

Prepreg	Youngův modul [GPa]	Modul pružnosti ve smyku [MPa]	Hustota [g/cm ³]	Pevnost v tahu [MPa]	Poissonova konstanta
HexPly® M77HF (CHS/M77HF;35%;150AW)	18,1	4200	1,2	336	0,13

Jádro jsem volil z dostupných pěn od firmy 3A COMPOSITES. Firma 3A COMPOSITES se zaměřuje především na PET pěny a balsové dřevo a je špičkou v oboru. Pro testování jsem zvolil tři typy pěn. Jejich vlastnosti zjištěné z materiálových listů jsou uvedeny v tabulce 6. [37]

- AIREX® T10 – PET pěna (polyethylen) (obr. 31)
 - vhodná pro velké objemové aplikace, které jsou vystaveny statickému a dynamickému zatížení

- využití: boční stěny, podlahové a stropní prvky automobilů, konstrukce lodí, sportovní vybavení apod. [37]



Obrázek 31 AIREX® T10 – PET pěna [37]

- AIREX ® C70.55 – PVC pěna (polyvinylchlorid) (obr. 32)
 - zesílená tuhá pěna, vynikající přilnavost k vnějším vrstvám, velký poměr tuhosti k hmotnosti
 - využití: boční stěny, podlahové a stropní prvky automobilů a vlaků, v letectví a kosmonautice, konstrukce lodí apod. [37]



Obrázek 32 AIREX ® C70.55 – PVC pěna [37]

- AIREX ® R82.60 – PEI pěna (polyetheramid) (obr. 33)
 - pěna se skvělou ohnivzdorností, vhodný pro extrémně horké nebo chladné prostředí
 - využití: konstrukce lodí, střechy, krycí panely, klenuté střechy, sportovní potřeby, kontejnery, automobilový průmysl – kryty motorů, střechy apod. [37]



Obrázek 33 AIREX® R82.60 – PEI pěna [37]

Tabulka 6 Vlastnosti zvolených pěn od firmy 3A COMPOSITES [37]

Pěna:	Youngův modul [GPa]	Modul pružnosti ve smyku [MPa]	Hustota [g/cm ³]	Pevnost v tahu [MPa]
AIREX® T10 (tuhá polymerní pěna na bázi polyethyltereftalátu – PET)	0,125	16	0,100	1,5
AIREX® C70.55 (Tuhá polymerní pěna na bázi polyvinylchloridu – PVC)	0,035	18	0,060	1
AIREX® R82.60 (Tuhá polymerní pěna na bázi polyetherimidu – PEI)	0,045	15	0,060	1,2

Poissonovo číslo běžně nebývá firmami ve výrobních listech uváděno. Z provedeného měření [38] vychází Poissonova konstanta polymerních pěn v rozmezí 0,29 až 0,33. Pro simulaci a výpočet zatížení jsem zvolil hodnotu Poissonovy konstanty 0,3.

6.3 Porovnání vlastností

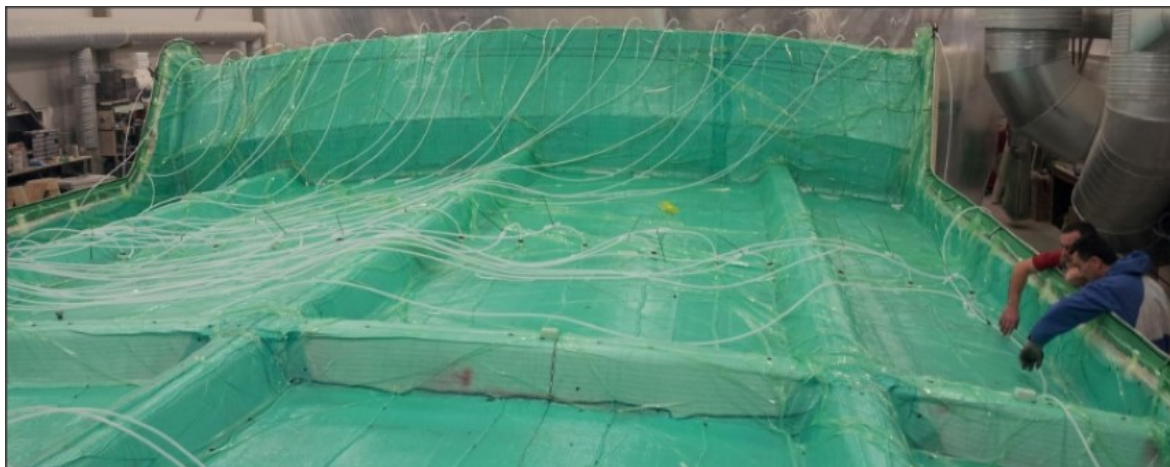
Ze zvolených materiálů jsem vytvořil tři modely sendvičových struktur o rozměrech viz. bod 6.1. Návrh 3D modelu. V tabulce č. 7 je porovnána hmotnostní úspora při využití zvolených materiálů oproti ocelovému plechu o tloušťce 2 mm, který simuluje materiál karoserie. Tloušťku vnějších vrstev sendvičových panelů jsem volil vždy 0,4 mm a tloušťku jádra vždy 14 mm. K určení hmotností jsem použil program Autodesk – Inventor 2019.

Tabulka 7 Porovnání hmotností panelů ze zvolených materiálů pomocí programu Autodesk – Inventor 2019

Navržené modely podlahy užitkového vozu	Hmotnost [kg]
Ocelový plech 2 mm	44,5
Sendvičový panel – jádro PET (14 mm)	6,7
Sendvičový panel – jádro PVC (14 mm)	5,1
Sendvičový panel – jádro PEI (14 mm)	5,1

Výroba takového sendvičového panelu by vzhledem ke svým rozměrům nebyla realizovatelná lisováním (pokud by se nejednalo o velkosériovou výrobu). Navrhl bych tedy výrobu těmito technologiemi:

- Ruční laminace pod vakuovou fólií
- Vakuová infuze (obr. 34)
- Ruční laminace



Obrázek 34 Vakuová infuze [39]

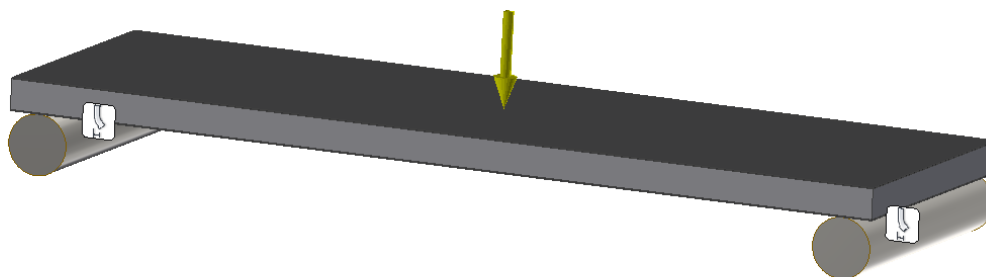
Tyhle technologie jsou vhodné pro malé až střední série. Dalšími výhodami jsou konstrukčně jednoduché a levné formy a nízké obstarávací ceny daných technologií.

V případě využití navržené sendvičové struktury pro nahrazení podlahy užitkového vozu by samozřejmě model musel být složitější s lemy apod. tak aby se dala celá konstrukce složit.

Pro další porovnání vlastností jsem vytvořil vzorky o rozměrech 300 x 100 mm. Rozměry vzorku jsem volil tak, aby je bylo možné vyrobít v běžných laboratorních podmínkách. Jelikož pro tuhle práci z důvodů epidemie nebyla možnost vzorky reálně vyrobít a otestovat, zvolil jsem pro porovnání mechanických vlastností panelů pevnostní analýzu v programu Inventor 2019 od firmy Autodesk.

Na vzorcích jsem testoval odolnost na ohyb při zatížení silou 1000 N kolmou na horní plochu ve středu desky. Do simulace jsem uvažoval i gravitační sílu. Tloušťku jádra jsem volil 14 mm tak, aby došlo k hmotnostní úspoře a zároveň ke stejnému či menšímu průhybu ve svislém směru v porovnání s ocelovým plechem o tloušťce 2 mm.

Sestava pro simulaci byla vytvořena taktéž v programu Autodesk – Inventor 2019 ze zkušební vzorku a dvou válečků z tuhého materiálu jako podpory. Vytvořený model simuluje třibodový ohyb. Náhled modelu pro simulaci je vidět na obr. 35.



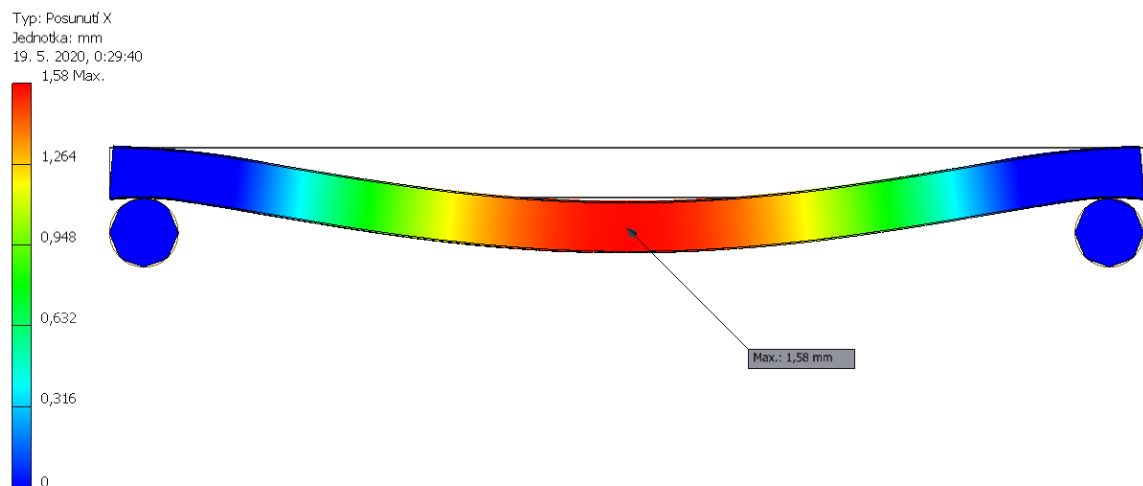
Obrázek 35 Náhled sestavy pro simulaci zatížení gravitační silou a silou 1000 N z programu Autodesk Inventor

Třibodový ohyb se v praxi provádí přitlačováním dalšího válečku z horní strany za určitého zatížení. Při porovnávání rozdílů mezi přitlačováním válečku z horní strany a zobrazenou simulací na obr. 35 se výsledky lišily minimálně. Pro 3D simulaci jsem neuvažoval spojovací prvky (lepidla apod.).

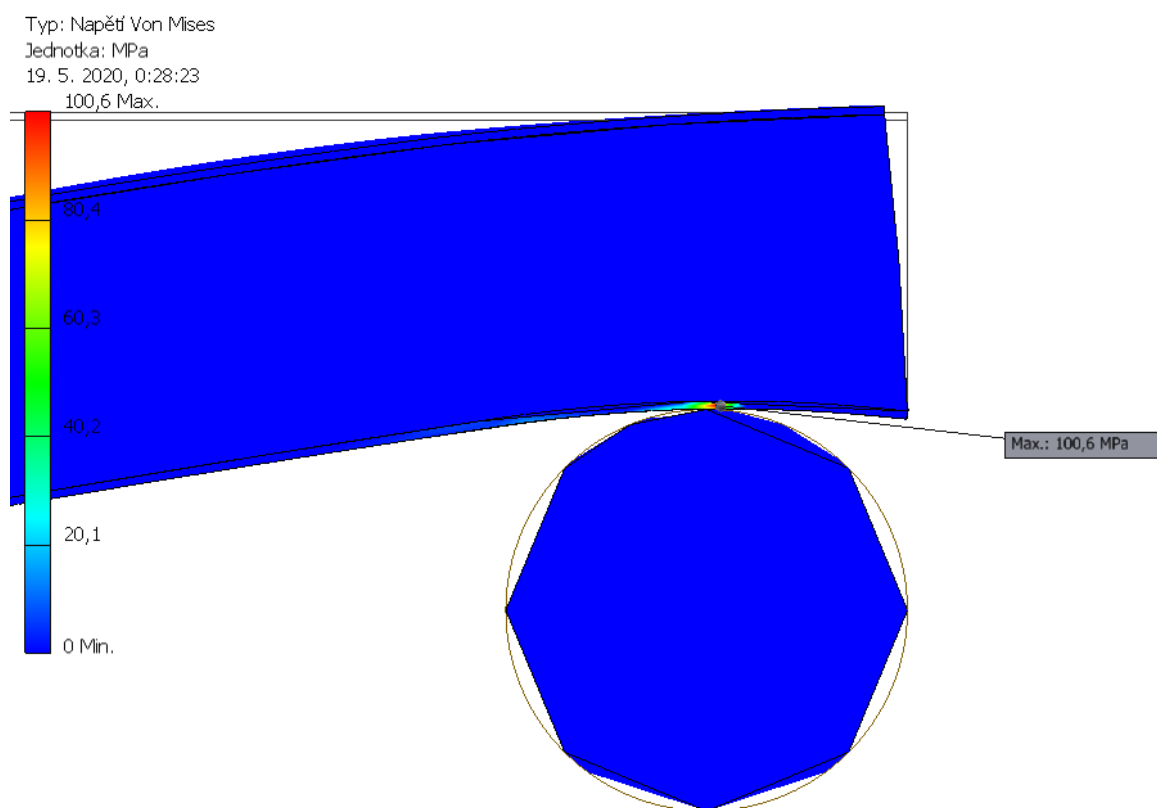
Na obr. 36, 39 a 42 jsou zobrazeny výsledky maximálního průhybu navržených vzorků. Obr. 37, 40 a 43 zobrazují největší napětí, které při třibodovém ohybu vzniká. Největší napětí dle očekávání vzniká mezi sendvičovými panely a pevnými válečky. Obr. 38, 41 a 44 zobrazují hodnoty součinitele bezpečnosti. Nejnižší hodnota se nachází u všech tří vzorků mezi spodní vnější vrstvou a pěnovým jádrem. Hodnota součinitele bezpečnosti by ve skutečnosti díky

lepidlu byla větší. Nicméně v tomhle místě může docházet k delaminaci. Zabránit by se tomu dalo zvýšením počtu vnějších vrstev nebo zvolením vrstev s větší plošnou hmotností.

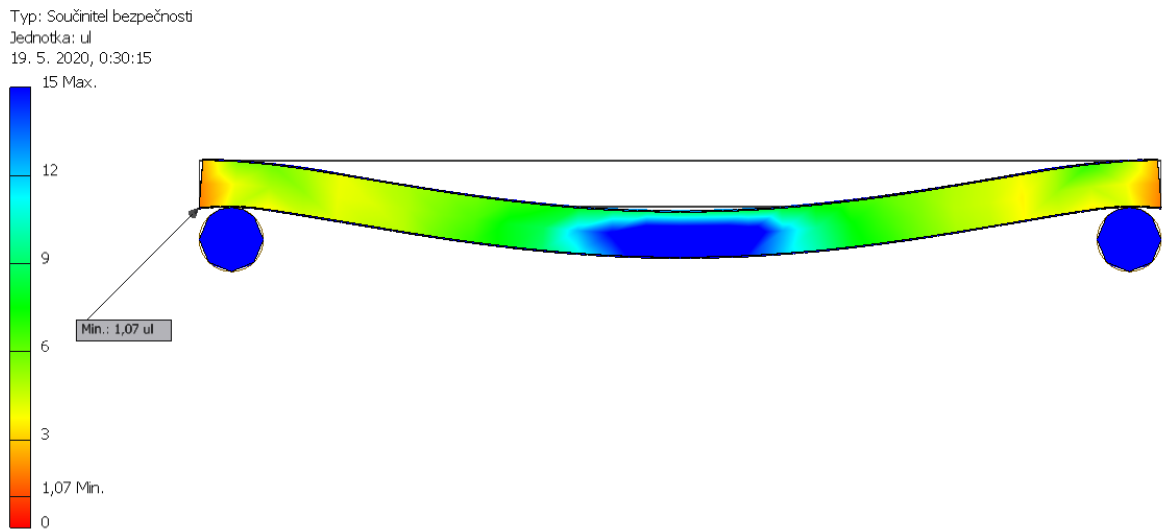
Pro lepší představu jsou pro všechny výsledky simulací zvětšeny.



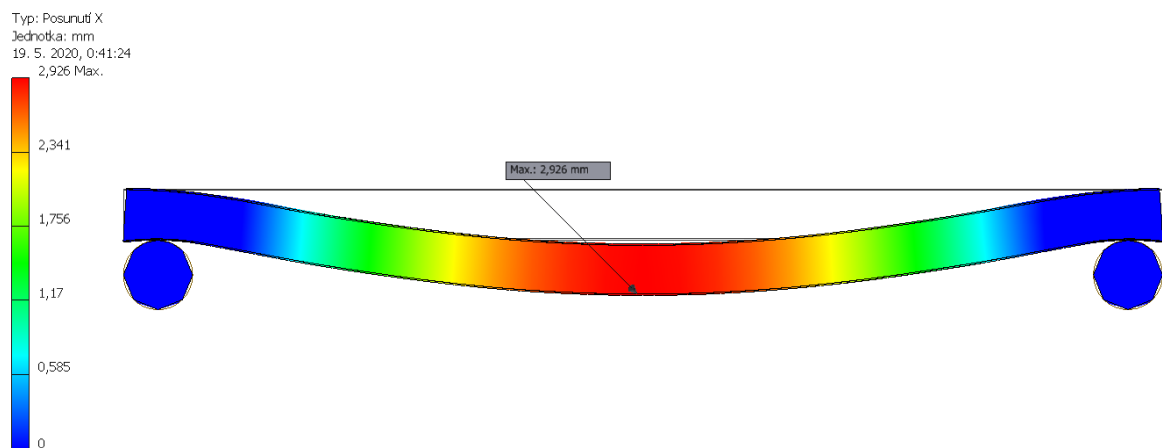
Obrázek 36 Výsledek simulace sendvičového panelu s PET pěnou – průhyb



Obrázek 37 Výsledek simulace sendvičového panelu s PET pěnou – největší napětí



Obrázek 38 Výsledek simulace sendvičového panelu s PET pěnou – souč. bezpečnosti

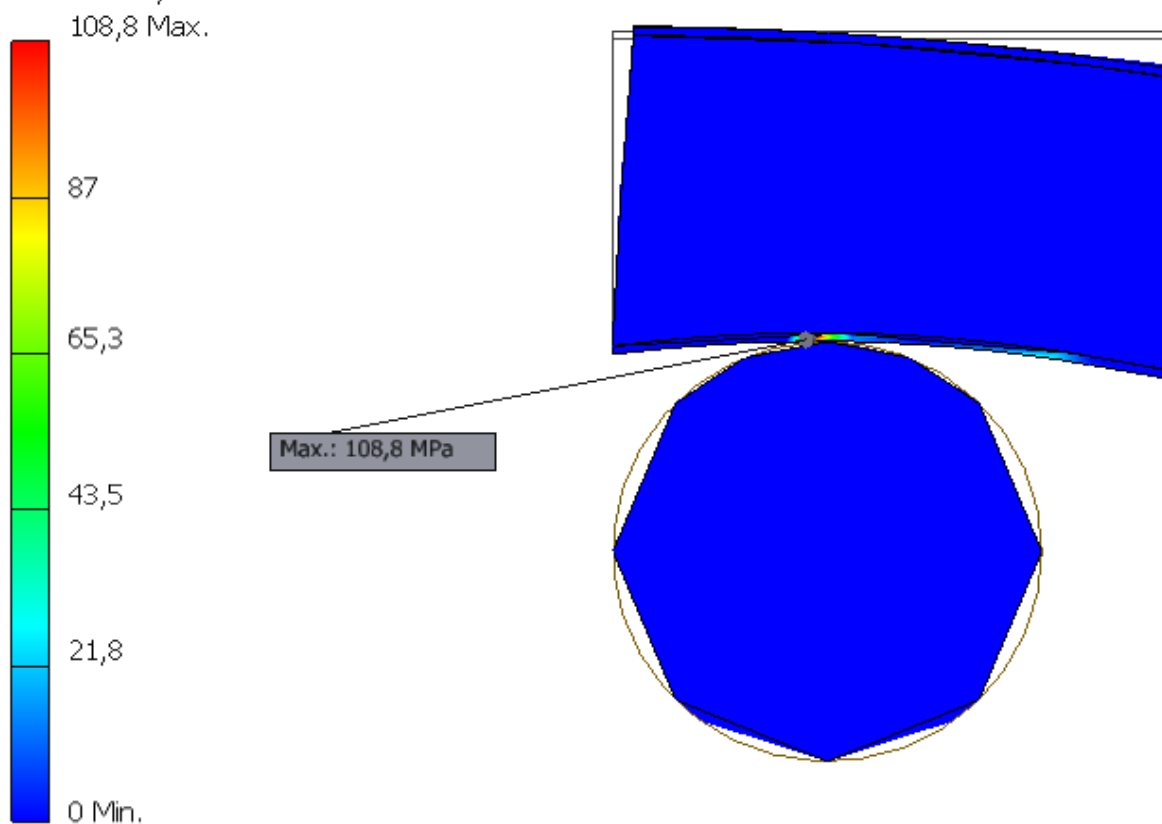


Obrázek 39 Výsledek simulace sendvičového panelu s PVC pěnou – průhyb

Typ: Napětí Von Mises

Jednotka: MPa

19. 5. 2020, 0:40:25

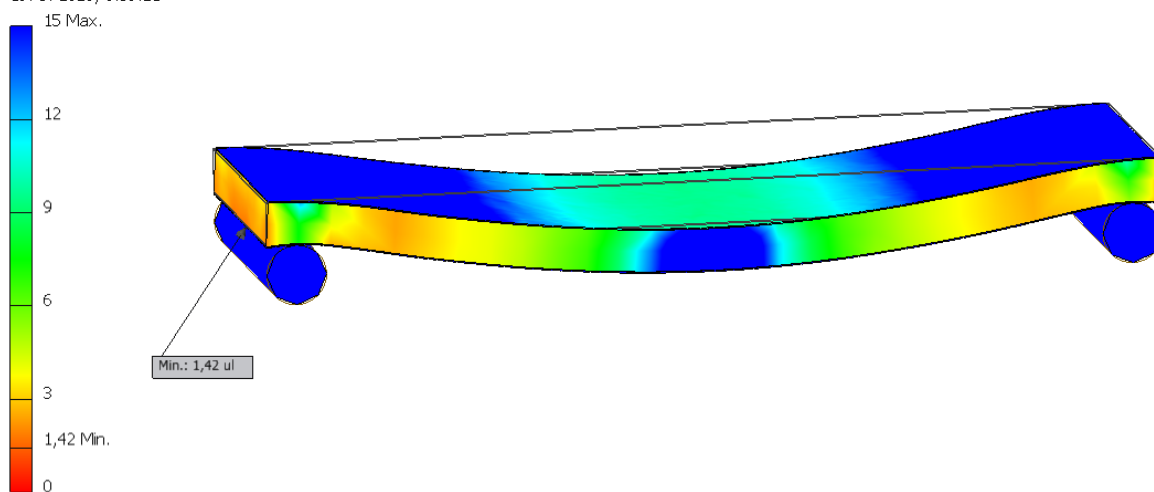


Obrázek 40 Výsledek simulace sendvičového panelu s PVC pěnou – maximální napětí

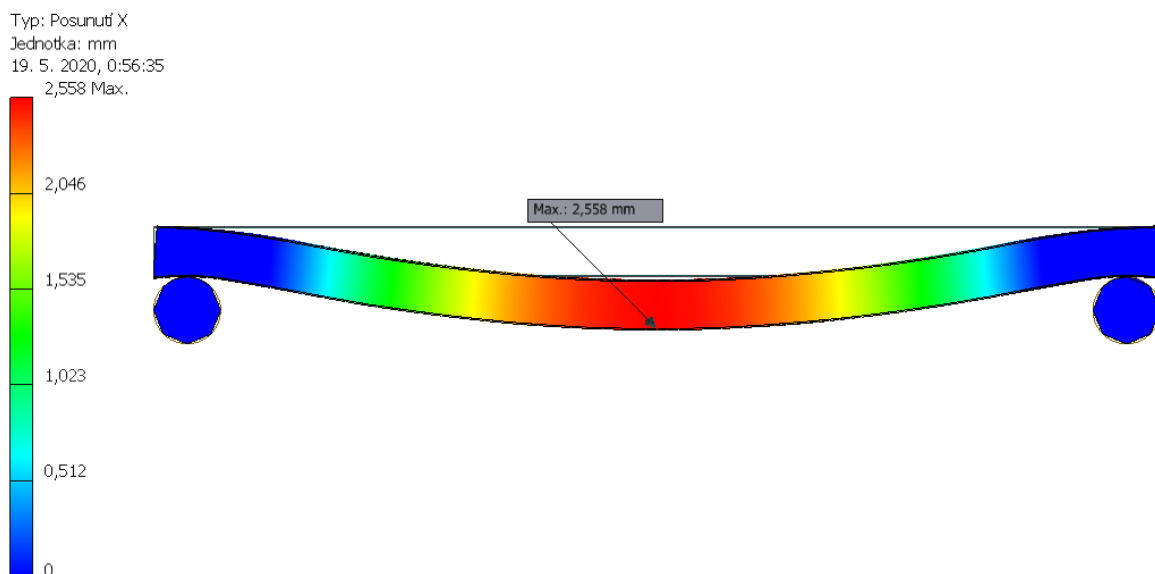
Typ: Součinitel bezpečnosti

Jednotka: ul

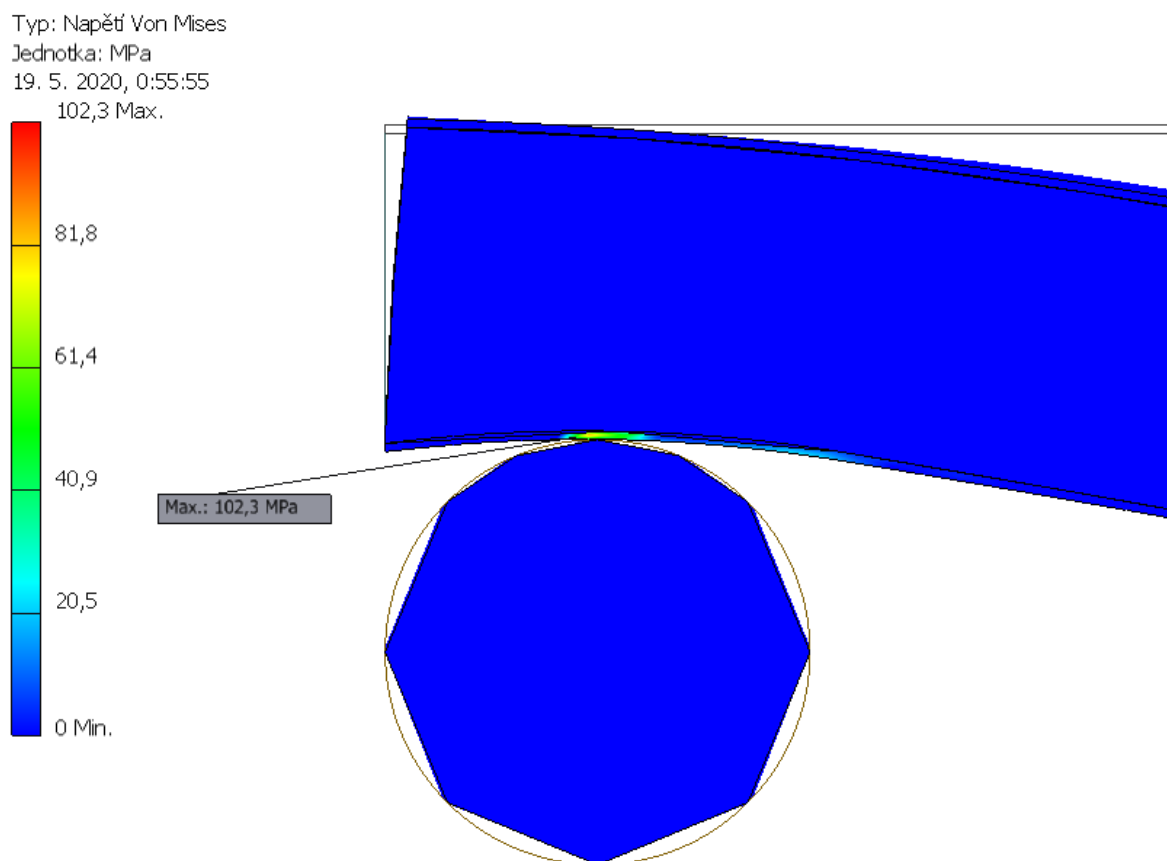
19. 5. 2020, 0:39:21



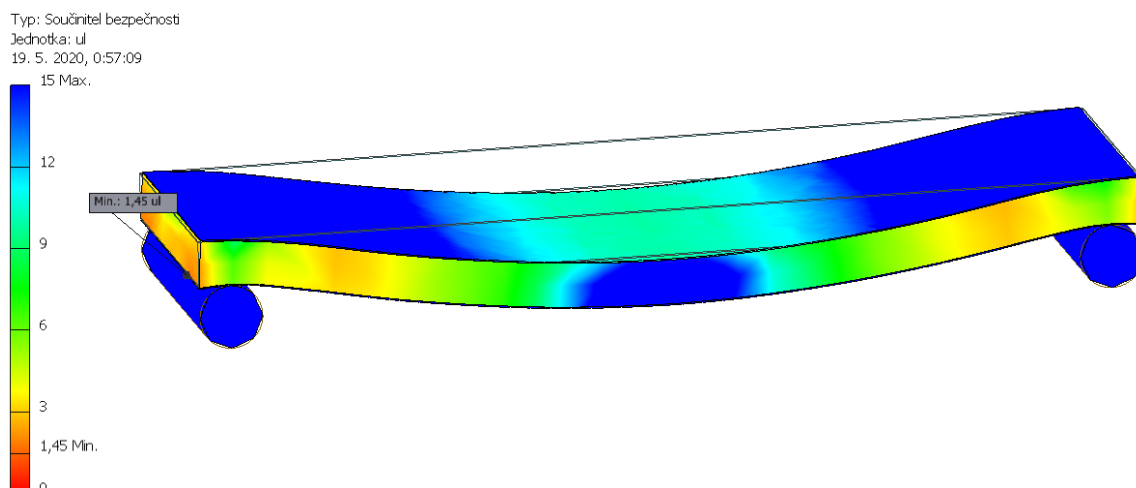
Obrázek 41 Výsledek simulace sendvičového panelu s PVC pěnou – souč. bezpečnosti



Obrázek 42 Výsledek simulace sendvičového panelu s PEI pěnou – průhyb



Obrázek 43 Výsledek simulace sendvičového panelu s PEI pěnou – maximální napětí



Obrázek 44 Výsledek simulace sendvičového panelu s PEI pěnou – souč. bezpečnosti

Výsledky simulací jsou zobrazeny v tabulce č.8. Z výsledků je patrná značná hmotnostní úspora a pokles napětí ve struktuře při použití sendvičových struktur. Nejlepších výsledků dosahuje sendvičový panel s PET jádrem. V porovnání s ostatními sendvičovými panely má sice nejvyšší hmotnost, ale dosahuje nejlepších ohybových vlastností, respektive dochází k nejmenšímu prohnutí ve svislém směru.

Tabulka 8 Porovnání hmotnosti panelů a výsledků simulace po zatížení panelů gravitační silou a svislou silou 1000 N

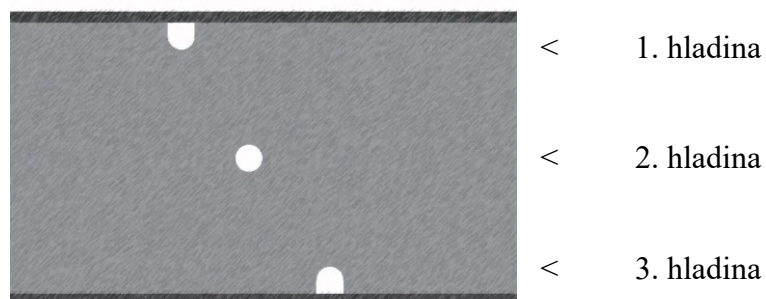
Vzorek 300 x 100 mm	Hmotnost [kg]	Max. průhyb ve svislém směru [mm]	Součinitel bezpečnosti (minimální)	Největší napětí ve struktuře [MPa]
Ocelový plech 2 mm	0,471	3,1801	0,93578	221,205
Sendvičový panel jádro PET	0,071	1,57984	1,0706	100,556
Sendvičový panel jádro PVC	0,054	2,92622	1,415	108,762
Sendvičový panel jádro PEI	0,054	2,55783	1,45246	102,263

7 VLIV INTEGRACE SENZORŮ

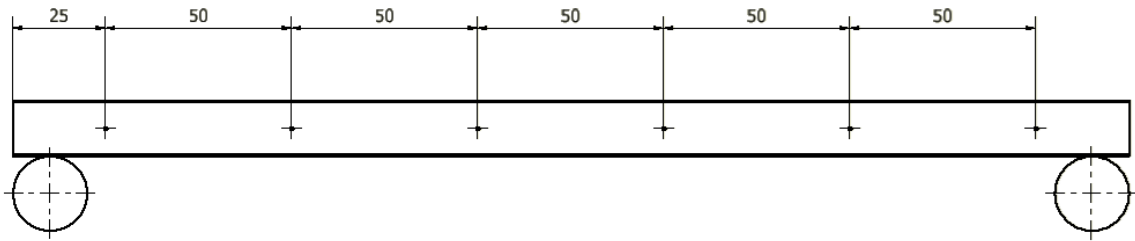
Navržená sendvičová struktura má sloužit nejen k úspoře hmotnosti za stejných nebo lepších mechanických podmínek, ale také ke zlepšení bezpečnostních vlastností automobilu. Aby panely mohly splňovat tyto vlastnosti, musely by se do jejich struktury aplikovat senzory, které by měly za úkol snímat zatížení. V této části jsem se zaměřil na změnu mechanických vlastností sendvičového panelu při integraci senzorů do pěnového jádra panelů. Jelikož v pěnovém jádru musí být pro senzory vyrobena drážka nebo otvor, dojde k narušení struktury a pevnost panelu se může měnit.

7.1 Vliv umístění senzorů v jádře na mechanické vlastnosti

Možnou integraci senzorů do struktury jádra jsem navrhl ve třech hladinách zobrazených na obr. 45. Pro testování jsem navrhl do pěnového jádra šest senzorů s roztečí 50 mm viz obr. 46. Menší rozteče by pro navrženou aplikaci nebyly nutné. Na drážky pro senzory by se při sériové výrobě muselo myslet už při kladení vrstev na sebe. Nejrychlejší výroba drážek by byla pomocí frézování na CNC stroji. Zásadní problém by pravděpodobně byl při výrobě drážky uprostřed pěny. Pěna by se musela skládat ze dvou částí, kde by byla vždy vytvořena polovina drážky. Nebo by se při výrobě samotné pěny musela využívat vyjmutelná jádra, tak aby vznikl prostor pro umístění senzorů. V našich podmínkách bychom drážku v laboratoři vyřizli, avšak kvůli nemožnosti testovat v laboratoři jsem drážky vytvořil do 3D modelů. Průměr otvorů pro senzory jsem zvolil nejmenší možný dle technického listu v příloze bakalářské práce a to 1 mm. Průřez navržených drážek je tedy 1 mm, horní a spodní drážka je však pro usnadnění výroby protažena po okraj.

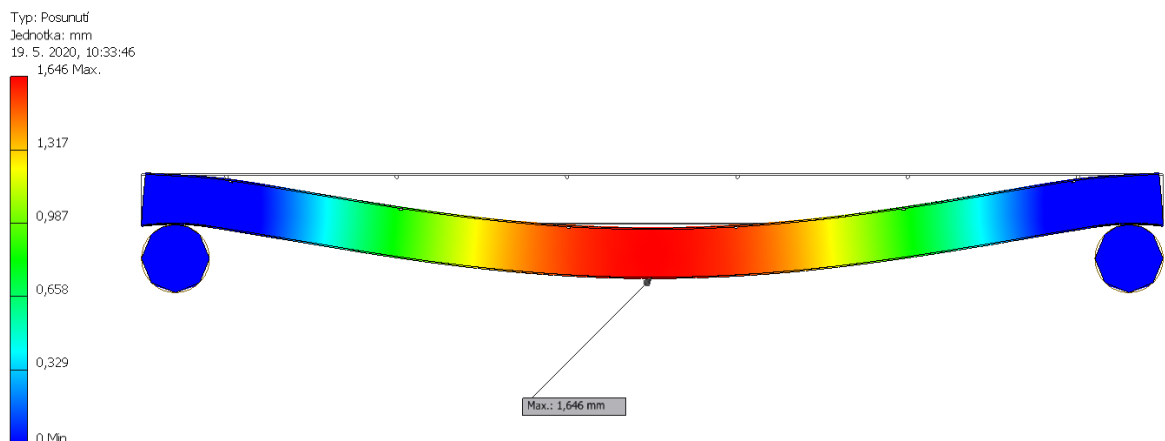


Obrázek 45 Hladiny umístění senzorů

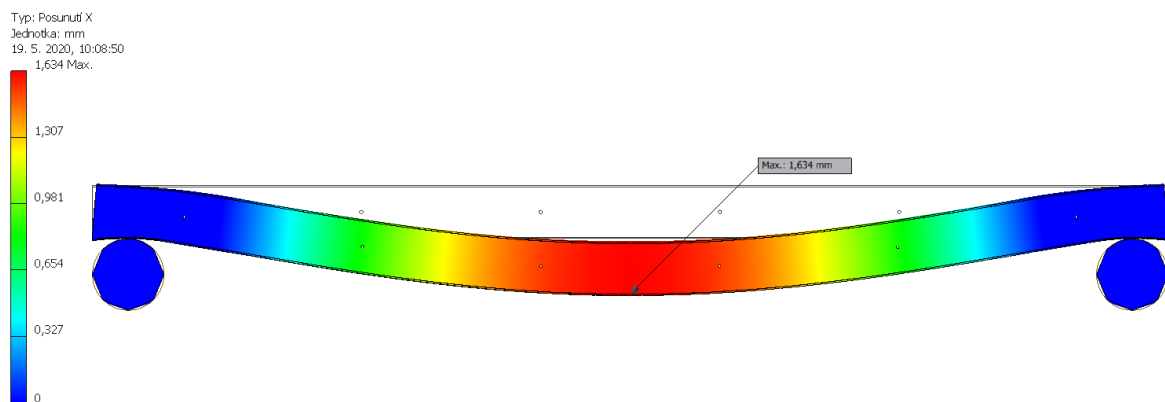


Obrázek 46 Rozteč mezi otvory pro umístění senzorů

Na obr. 47-55 jsou zobrazeny výsledky simulací pomocí stejného třibodového ohybu jako v předchozí kapitole. Testoval jsem stejné sendvičové panely tentokrát ale s drážkami pro senzory, a to ve třech výše zmíněných hladinách. Výsledky všech tří typů sendvičových panelů a tří hladin umístění senzorů se zdají na první pohled totožné. Hodnoty průhybu se však od sebe drobně liší. Porovnání výsledků je zobrazeno v tabulce č. 9.

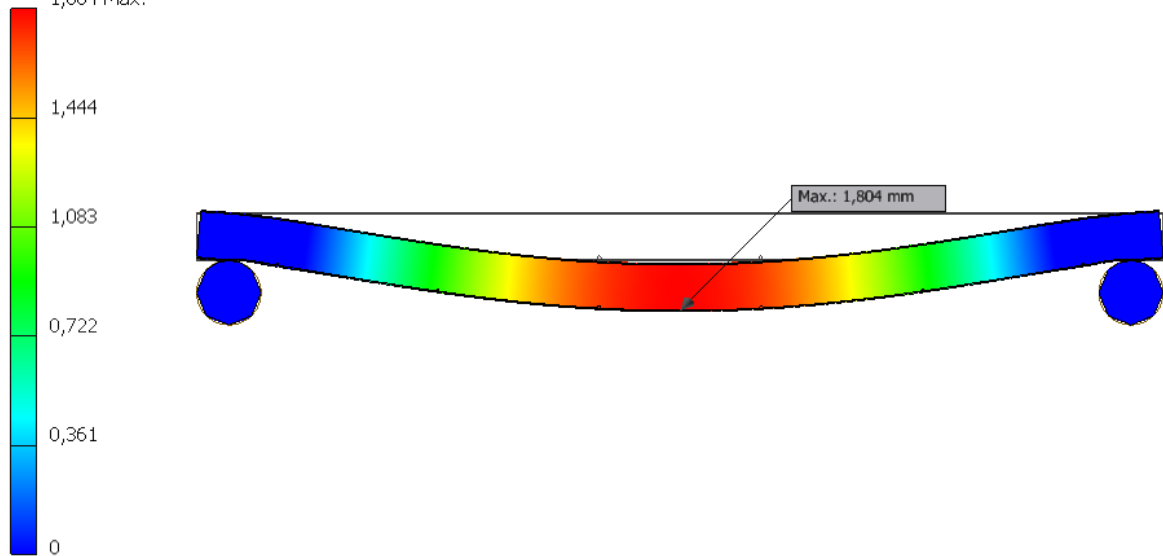


Obrázek 47 Výsledek simulace sendvičového panelu s PET pěnou a se senzory umístěnými v I. hladině – průhyb



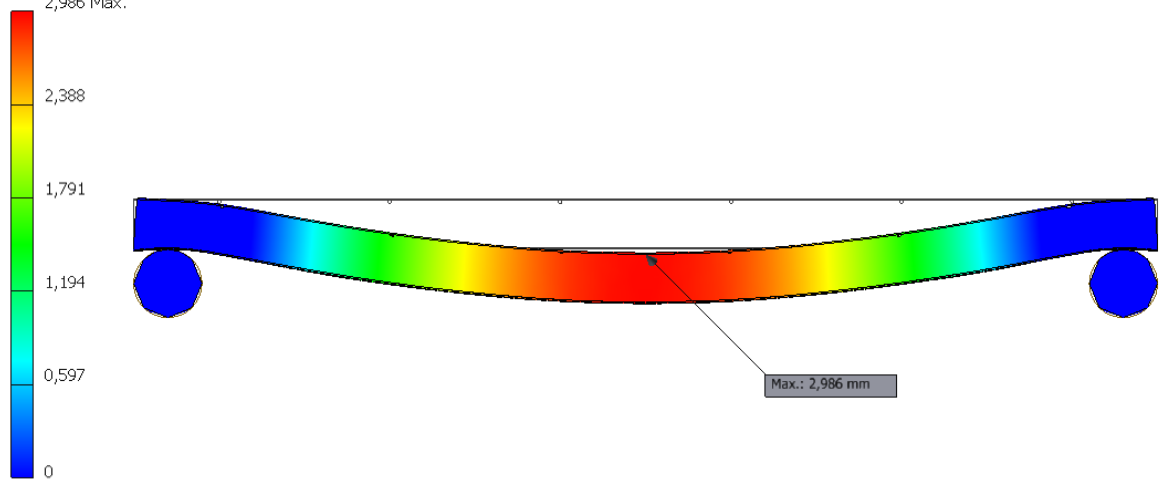
Obrázek 48 Výsledek simulace sendvičového panelu s PET pěnou a se senzory umístěnými v II. hladině – průhyb

Typ: Posunutí X
Jednotka: mm
19. 5. 2020, 10:38:54
1,804 Max.

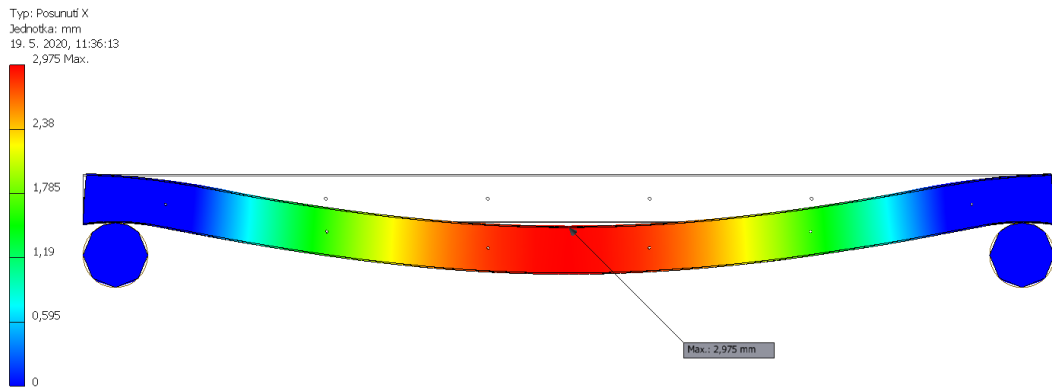


Obrázek 49 Výsledek simulace sendvičového panelu s PET pěnou a se senzory umístěnými v III. hladině – průhyb

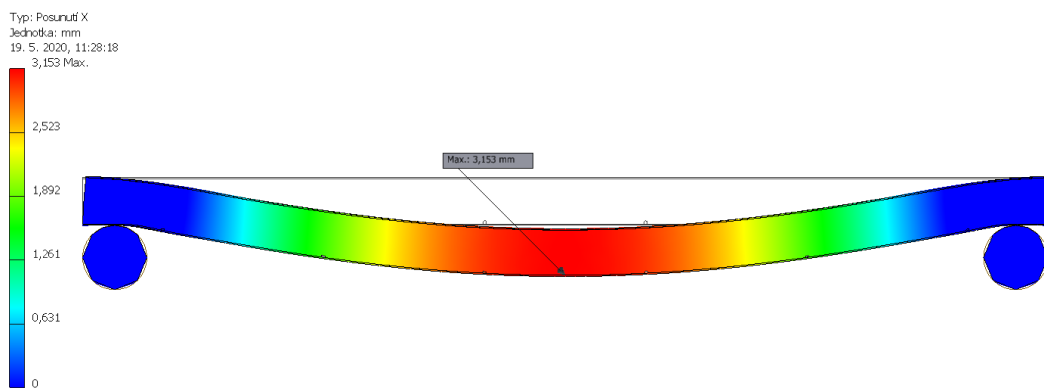
Typ: Posunutí X
Jednotka: mm
19. 5. 2020, 11:14:12
2,986 Max.



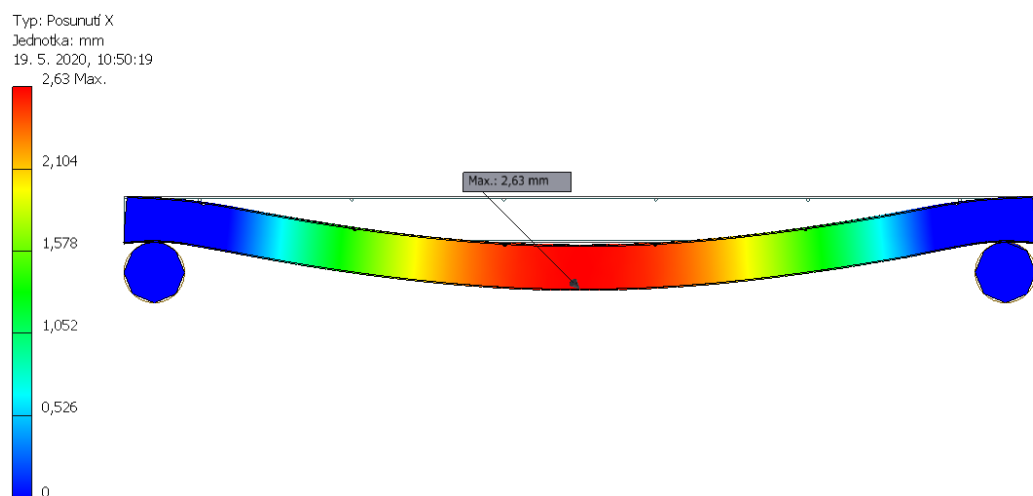
Obrázek 50 Výsledek simulace sendvičového panelu s PVC pěnou a se senzory umístěnými v I. hladině – průhyb



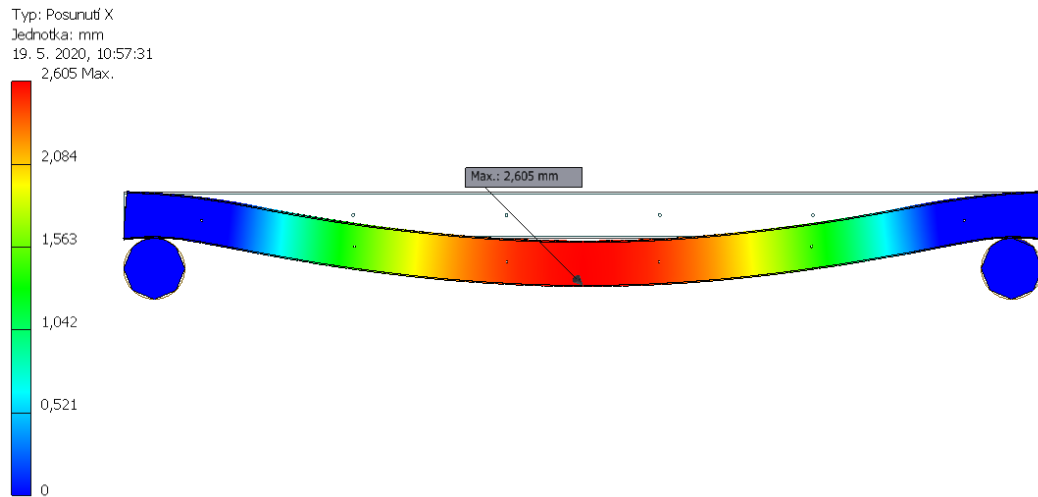
Obrázek 51 Výsledek simulace sendvičového panelu s PVC pěnou a se senzory umístěnými v II. hladině – průhyb



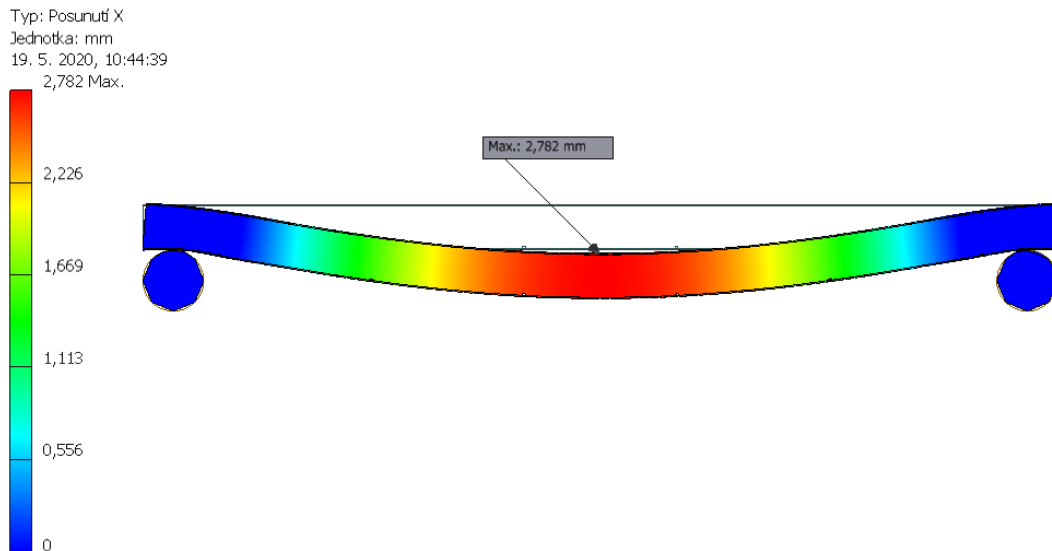
Obrázek 52 Výsledek simulace sendvičového panelu s PVC pěnou a se senzory umístěnými v III. hladině – průhyb



Obrázek 53 Výsledek simulace sendvičového panelu s PEI pěnou a se senzory umístěnými v I. hladině – průhyb



Obrázek 54 Výsledek simulace sendvičového panelu s PEI pěnou a se senzory umístěnými v II. hladině – průhyb



Obrázek 55 Výsledek simulace sendvičového panelu s PEI pěnou a se senzory umístěnými v III. hladině – průhyb

Tabulka 9 Výsledky zatížených panelů s drážkami pro senzory ve třech hladinách

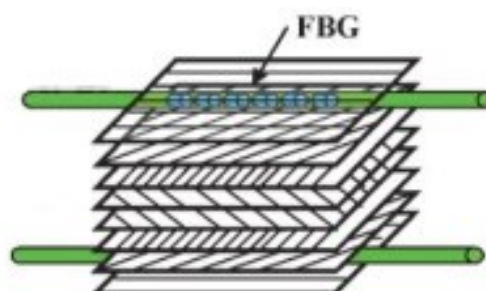
Vzorek	Max. průhyb ve svislém směru [mm]			
	Drážka I.	Drážka II.	Drážka III.	Bez drážky
Sendvičový panel jádro PET	1,646	1,634	1,804	1,57984
Sendvičový panel jádro PVC	2,986	2,975	3,153	2,92622
Sendvičový panel jádro PEI	2,63	2,605	2,782	2,55783

V tabulce č. 9 je vidět, že nejlepších výsledků dosahují drážky umístěné v II. hladině (střed panelu). Pěna se při deformaci stlačuje a otvory ve středu své vrstvy dokáže nejlépe vstřebat díky možnosti stlačení pěny ze všech stran. Drážky ve III. hladině mají největší vliv na průhyb sendvičového panelu. Jelikož ze spodní vrstvy není umístěna pěna, dojde v místech otvoru k „rozevírání“ pěny a dojde tedy k většímu stlačení pěny. Jako kompromis se jeví drážky pro senzory v I. hladině. Při ohybu z horní strany není drážka deformována díky pevné vnější vrstvě a při ohybu se budou boky drážky přitlačovat k sobě. Na vložený senzor by to mělo mít nejmenší negativní vliv skrze stlačení. Vliv drážek pro senzory na strukturu sendvičového panelu je však při porovnání se sendvičovými panely bez drážek minimální. Zásadnějším faktorem pro správné umístění bude tedy snímací schopnost senzorů v daných hladinách. Senzory ve III. hladině budou mít menší detekční schopnosti než senzory v I. a II. hladině, a to díky schopnosti pěny tlumit zatížení. [25]

Samotné senzory se musí do struktury umístit už při výrobě. Je tedy nutné volit senzory, které vydrží bez porušení samotnou výrobu a vytvrzování sendvičové struktury. Jelikož drážky pro senzory na průhybové vlastnosti panelů nemají zásadní vliv, je pravděpodobné, že umístěním senzorů bychom ohybové vlastnosti dokonce zlepšili. Hmotnost panelů by však vzrostla o hmotnost senzorů a použitého lepidla.

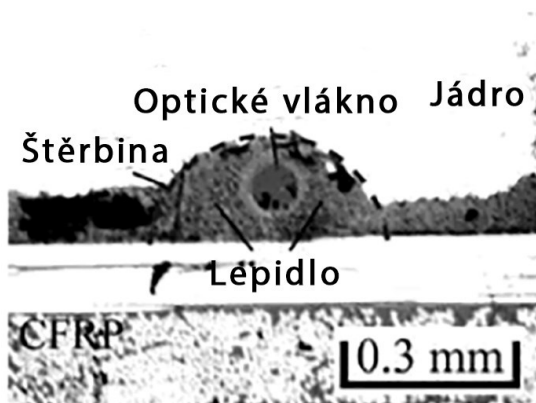
7.2 Návrhy dalších možností integrace FBG senzorů

Umístit senzory do struktury sendvičového panelu lze i na jiná místa než do pěnového jádra. Jelikož vnější vrstvy jsem navrhl z epoxidového prepregu, je možnost senzory umístit přímo do vnější vrstvy jako můžeme vidět na obr. 56. Účinnost a testování téhle varianty můžeme pozorovat v práci [40], která se na tuhle možnost umístění zaměřuje. Testování sice neproběhlo přímo v sendvičové struktuře, ale pouze ve vrstvě prepregu. Můžeme však očekávat obdobné chování i při využití v sendvičové struktuře.

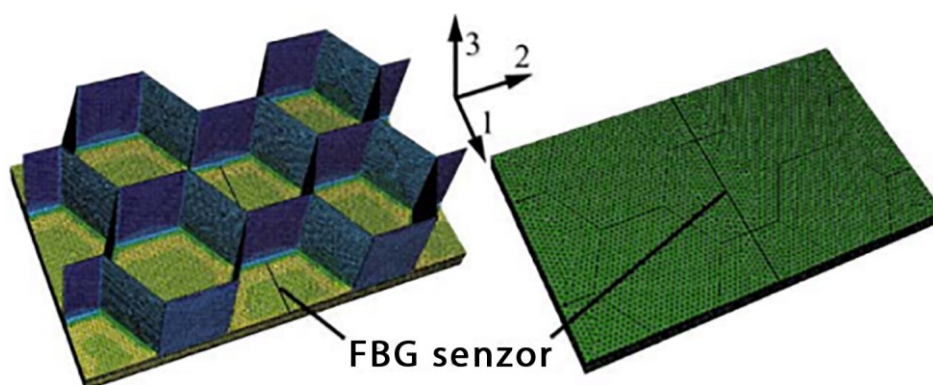


Obrázek 56 Rozložení vrstvených prepregů a zabudovaných senzorů [40]

V práci [42] můžeme vidět testování umístění senzorů i do panelů s voštinovým jádrem, a to konkrétně pod vnější vrstvu (obr 57 a 58). Jelikož mezi jádrem a vnější vrstvou není tolik prostoru, bylo potřeba vyrobít drážky do jádra pomocí řezačky drátu. [41]



Obrázek 57 Drážka pro senzor v sendvičové struktuře s voštinovým jádrem [41]



Obrázek 58 Náhled umístění senzoru v sendvičové struktuře s voštinovým jádrem [41]

Dalšími možnostmi integrace senzorů by mohly být kombinace umístění v různých hladinách nebo v různých směrech. Jelikož jsou však senzory typu FBG velice tenké, je nutné dbát na návrh výrobního procesu sendvičové struktury tak, aby se senzory neponičily.

ZÁVĚR

Cílem bakalářské práce bylo navrhnout součást pomocí hybridního SMART sendvičového panelu do konstrukce automobilu. Navrhl jsem sendvičový panel do úložného prostoru užitkového vozu Transporter. Součástí návrhu byl i vhodný výběr materiálů.

Navrhl jsem celkem tři sendvičové panely se stejnými vnějšími vrstvami o tloušťce 0,4 mm, ale s rozdílnými polymerními materiály jádra o tloušťce 14 mm. Jednalo se o pěny na bázi PET, PVC a PEI. Testované vzorky se rozměrově nelišily. Z výsledků zkoušky tříbodovým ohybem je dle očekávání zcela zřejmé, že sendvičové struktury vykazují značnou hmotnostní úsporu oproti ocelovému plechu tloušťky 2 mm, který jsem zvolil jako zástupce materiálu, z něhož je tvořena karoserie. Navržený panel by však měl kromě hmotnostní úspory napomáhat ke zlepšení bezpečnosti vozidla. Pro takový účel jsem navrhl integrovat do struktury senzory tak, aby mohly měřit mechanické zatížení panelu. Následně by software měl za úkol shromáždit data z jednotlivých sensorů a vyhodnotit, zda je úložný prostor rovnoměrně zatížený či nikoliv. Předěšlo by se tak negativním vlivům nerovnoměrně zatíženého vozidla.

V další části jsem testoval vliv umístění sensorů do pěnového jádra sendvičového panelu. Porovnával jsem rozdíl mezi původním sendvičovým panelem bez sensorů a mezi sendvičovými panely s drážkami pro umístění sensorů ve třech různých hladinách. Z výsledků je patrné, že při tloušťce jádra 14 mm nemají drážky zásadnější vliv na pevnostní, respektive ohybové vlastnosti. Při zmenšování tloušťky pěnového jádra by drážky měly zásadnější vliv. V našem případě by však sendvičové panely s menší tloušťkou nedosahovaly lepších ohybových vlastností než ocelový plech tloušťky 2 mm. V praktické části jsem také zmínil doporučení výrobního procesu a další možnosti integrace sensorů.

Automobilový průmysl už v některých případech sendvičové struktury využívá a mnou navržená aplikace by mohla pomoci zlepšit bezpečnost přepravy. Majitelům vozidel by tak mohla ušetřit náklady na opravy způsobené nerovnoměrným opotřebením dílů kvůli nerovnoměrnému zatížení určitých částí nákladového prostoru automobilu. Možným omezením pro větší integraci sendvičových struktur do konstrukce automobilů mohou být větší náklady pro výrobu těchto součástí oproti zajetým technologiím. Ale s rostoucími požadavky na snížení emisí u automobilů budou možná v budoucnu sendvičové struktury v konstrukci automobilů zastoupeny ve větším měřítku.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] HARA, Deniz a Gökhan O. ÖZGEN, 2016. Investigation of Weight Reduction of Automotive Body Structures with the Use of Sandwich Materials. *Transportation Research Procedia* [online]. **14**, 1013-1020 [cit. 2020-05-22]. DOI: 10.1016/j.trpro.2016.05.081. ISSN 23521465. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2352146516300813>
- [2] PILVOUSEK, Tomáš a Jan ŠANOVEC. Lehké konstrukce automobilů - sendvičové materiály. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2016, (6) [cit. 2020-05-22]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/lehke-konstrukce-automobilu-sendvicove-materialy.html>
- [3] ROCCA, S. V. a A. Nanni. Mechanical Characterization of Sandwich Structure Comprised of Glass Fiber Reinforced Core: Part 1. In: *Composites in Construction 2005 – Third International Conference*. Lyon, 2005. Dostupné z: <http://transportation.mst.edu/media/research/transportation/documents/P-3.pdf>
- [4] Sendvičový panel s hliníkovým jádrem. In: *Forlit & Metal* [online]. [cit. 2020-05-22]. Dostupné z: <https://www.fmetal.cz/cz/sendvicove-panely/>
- [5] Sendvičové konstrukce, 2001. *MM Průmyslové spektrum* [online]. (1) [cit. 2020-05-22]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/sendvicove-konstrukce.html>
- [6] XIONG, Jian et al., 2019. Sandwich Structures with Prismatic and Foam Cores: A Review. *Advanced Engineering Materials* [online]. **21**(1) [cit. 2020-05-22]. DOI: 10.1002/adem.201800036. ISSN 14381656. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1002/adem.201800036>
- [7] Sendvičové materiály pro stavební a automobilový průmysl, 2014. In: *Stavebnictvi3000.cz* [online]. VEGA spol. s r.o. [cit. 2020-05-22]. Dostupné z: <https://www.stavebnictvi3000.cz/clanky/sendvicove-materialy-pro-stavebni-a-automobilovy-prumysl>
- [8] POSPÍŠIL, Jaroslav, 2019. Celokovové kompozitní panely DOLUFLEX–Indaco - jeden výrobek, více možností využití. In: *TVstav.cz* [online]. [cit. 2020-05-22]. Dostupné z: <https://tvstav.cz/clanek/5343-celokovove-kompozitni-panely-doluflex-indaco-jeden-vyrobek-vice-moznosti-vyuziti>

- [9] BECKWITH, Scott W., 2009. Sandwich Core Materials & Technologies – Part II. *SAMPE Journal* [online]. Salt Lake City, **45**(4) [cit. 2020-05-22]. Dostupné z: <https://web.archive.org/web/20110812142802/http://www.sampe.org/news/TechTidbitsJuly09.pdf>
- [10] HexWeb® Honeycomb Selector Guide, 2016. *Hexcel* [online]. Hexcel Corporation [cit. 2020-05-22]. Dostupné z: https://www.hexcel.com/user_area/content_media/raw/HexWeb_SelectorGuide_2017.pdf
- [11] Stěnový sendvičový panel KS1000/1150 FR/LR. In: *Kingspan* [online]. [cit. 2020-05-22]. Dostupné z: <https://www.kingspan.com/cz/cs-cz/produkty/izolacni-sendvicove-panely/stenove-izolacni-panely/stenovy-sendvicovy-panel-ks1150-fr>
- [12] Composite panels for the vehicle construction. In: *Weiss Chemie* [online]. [cit. 2020-05-22]. Dostupné z: <https://www.weiss-chemie.com/en/composite-panels/applications/vehicle-construction/>
- [13] Design composite TOP-series for commercial vehicles. In: *Design composite* [online]. [cit. 2020-05-22]. Dostupné z: <https://www.design-composite.com/en/lightweight-construction/commercial-vehicles>
- [14] SOKOLOVA, Olga, Adele CARRADÓ a Heinz PALKOWSKI, 2010. Production of Customized High-Strength Hybrid Sandwich Structures. *Advanced Materials Research* [online]. **137**, 81-128 [cit. 2020-05-22]. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.137.81. ISSN 1662-8985. Dostupné z: <https://www.scientific.net/AMR.137.81>
- [15] GLARE® Laminate with S-2 Glass® Fiber, 2006. In: *Agy* [online]. USA [cit. 2020-05-22]. Dostupné z: https://www.agy.com/wp-content/uploads/2014/03/GLARE_Laminate-Aerospace.pdf
- [16] HYLITE. In: *Alucobond* [online]. 2019: http://media.alucobond.com/pdf/hylite/HYLITE_Flyer_EN.pdf [cit. 2020-05-22]. Dostupné z: http://media.alucobond.com/pdf/hylite/HYLITE_Flyer_EN.pdf
- [17] HYLITE. In: *3A Composites* [online]. [cit. 2020-05-22]. Dostupné z: <https://www.display.3acomposites.com/hylite.html>

- [18] Hylite. In: *Virtual market place* [online]. [cit. 2020-05-22]. Dostupné z: <https://www.virtualmarket.innotrans.de/en/HYLITE%C2%AE,p1249319>
- [19] Kapitola I. POKROČILÉ KONSTRUKČNÍ MATERIÁLY. In: *Projekt150.ha-vel.cz* [online]. Technická univerzita Ostrava [cit. 2020-05-22]. Dostupné z: <http://projekt150.ha-vel.cz/node/133>
- [20] MAZAL, Mirek, 2018. Budou levná auta opět lehká? Vědci našli způsob, jak lacino vyrobit karbon. In: *Auto-forum* [online]. [cit. 2020-05-22]. Dostupné z: <https://www.autoforum.cz/technika/budou-levna-auta-opet-lehka-vedci-nasli-zpusob-jak-lacino-vyrobil-karbon/>
- [21] SMART (Specific, Measurable, Achievable, Realistic, Time Specific). In: *ManagementMania.com* [online]. Wilmington (DE) 2011-2020, 28.04.2019 [cit. 22.05.2020]. Dostupné z: <https://managementmania.com/cs/smart>
- [22] Stanovení cílů (SMART) a efektivní plánování pomocí cílů. In: *Publi.cz* [online]. [cit. 2020-05-22]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/114/02.html>
- [23] ADÁMEK, Martin a Radimír VRBA. MODERNIZACE VÝUKY SENZOROVÉ TECHNIKY [online]. [cit. 2020-04-23]. Dostupné z: <http://www.umel.feec.vutbr.cz/~adamek/uceb/UVOD.HTM>
- [24] HUSÁK, Miroslav, 2008. *Mikrosenzory a mikroaktuátory*. Praha: Academia. Gerstner. ISBN 978-80-200-1478-8.
- [25] BALAGEAS, D. et al., 2016. Comparison between Non-Destructive Evaluation Techniques and Integrated Fiber Optic Health Monitoring Systems for Composite Sandwich Structures. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* [online]. **11**(6), 426-437 [cit. 2020-05-22]. DOI: 10.1106/MFM1-C5FT-6BM4-AFUD. ISSN 1045-389X. Dostupné z: <http://journals.sagepub.com/doi/10.1106/MFM1-C5FT-6BM4-AFUD>
- [26] FBG senzory mechanického napětí, 2011. In: *Safibra* [online]. [cit. 2020-05-22]. Dostupné z: <http://www.safibra.cz/fbg-senzory-mechanickeho-napeti>
- [27] Mikrodrôt môže pomôcť predísť leteckým katastrofám, 2018. In: *Veda na dosah* [online]. [cit. 2020-05-22]. Dostupné z: <https://vedanadosah.cvtisr.sk/mikrodrot-moze-pomoc-predist-leteckym-katastrofam>

- [28] Fiber Bragg Gratings – The Optical Strain Gauge. In: *FiSens* [online]. [cit. 2020-05-22]. Dostupné z: <https://fisens.com/fbg-sensors/>
- [29] Optické vláknové mřížky (FBG). In: *Boteg* [online]. [cit. 2020-05-22]. Dostupné z: <https://www.boteg.cz/cz/fiber-bragg-grating/#prettyPhoto>
- [30] Working Principle & Characteristics of OTDRs. In: *VIAMI Solutions* [online]. [cit. 2020-05-22]. Dostupné z: <https://www.viavisolutions.com/en-us/working-principle-characteristics-otdrs>
- [31] OTDR Launch Cable Box. In: *Amazon* [online]. [cit. 2020-05-22]. Dostupné z: <https://www.amazon.com/Launch-Cable-Single-UPC-SC%20Eliminator/dp/B081TFJ9CC>
- [32] FLEMING, William J., 2001. Overview of Automotive Sensors. *IEEE SENSORS JOURNAL* [online]. 1(4) [cit. 2020-05-22]. Dostupné z: https://www.jku.at/fileadmin/gruppen/204/Dateien/Lehre/Mikrosystemtechnik/overview_automotive_sensors.pdf
- [33] HORSKÝ, Ondřej, 2010. Volkswagen T5 4Motion - Bestseller 4x4. In: *Automobil* [online]. [cit. 2020-05-22]. Dostupné z: https://www.automobilrevue.cz/rubriky/testy/svezli-jsme-se/volkswagen-t5-4motion-bestseller-4x4_39448.html
- [34] *Auto Hotárek.cz* [online]. [cit. 2020-05-22]. Dostupné z: <https://www.autohotarek.cz/>
- [35] HexPly® Prepregs. In: *Hexcel* [online]. [cit. 2020-05-22]. Dostupné z: <https://www.hexcel.com/Products/Prepregs-and-Resins/HexPly-Prepregs>
- [36] Prepreg Technology. In: *Ethz.ch* [online]. [cit. 2020-05-22]. Dostupné z: https://ethz.ch/content/dam/ethz/special-interest/mavt/design-materials-fabrication/composite-materials-dam/Education/Manufacturing_of_Polymer_Composites/FS2017/Prepreg_Technology.pdf
- [37] What we are made of. *3A Composites: Core materials* [online]. [cit. 2020-05-22]. Dostupné z: <https://www.3accorematerials.com/en/products>
- [38] RAJPUT, Moeen S et al., 2017. Compression of structural foam materials – Experimental and numerical assessment of test procedure and specimen size effects

- [online]. 21(1), 260-288 [cit. 2020-05-22]. DOI: 10.1177/1099636217690500.
ISSN 1099-6362. Dostupné z:
<http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/1099636217690500>
- [39] VACUUM INFUSION. In: *Composite plus* [online]. [cit. 2020-05-22]. Dostupné z:
<http://compositeplus.ee/vacuum-infusion-2/>
- [40] SHIN, Chow-Shing, Shien-Kuei LIAW a Shi-Wei YANG, 2014. Post-Impact Fatigue Damage Monitoring Using Fiber Bragg Grating Sensors. *Sensors* [online]. **14**(3), 4144-4153 [cit. 2020-05-22]. DOI: 10.3390/s140304144. ISSN 1424-8220. Dostupné z: <http://www.mdpi.com/1424-8220/14/3/4144>
- [41] THOMSEN, O.T., E. BOZHEVOLNAYA a A. LYCKEGAARD. Sandwich Structures 7: Advancing with Sandwich Structures and Materials: Proceedings of the 7th International Conference on Sandwich Structures [online]. Denmark: Springer Science & Business Media, 2005 [cit. 2020-05-20]. ISBN 10 1-4020-3848-8. Dostupné z:
https://books.google.cz/books?id=qXFAAAAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=cs&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Apod.	A podobně
ABS senzor	Brzdový senzor
CNC	Číslicové řízení pomocí počítače (Computer Numerical Control)
Hz	Frekvence
GPa	Gigapascal
g/cm ³	Gram na centimetr krychlový
Kg	Kilogram
MPa	Megapascal
FRF	Metody frekvenční odezvové funkce (Frequency Response Function)
m	Metr
mm	Milimetr
N	Newton
Nm	Nanometr
Obr.	Obrázek
OTDR	Optické senzory měřící zpětný rozptyl v časové oblasti (Optical Time Domain Reflectometer)
FBG	Optické vláknové mřížky (Fiber Bragg Grating)
PEI	Polyetheremid
PET	Polyethylen
PP	Polypropylen
PUR	Polyuretan
PVC	Polyvinylchlorid
SMART princip	S – specifikovaný cíl (Specific), M – měřitelnost cíle (Measurable), A – reálná dosažitelnost cíle (Achievable/Acceptable), R – cíl by měl být splnitelný z dostupných zdrojů (Realistic/Relevant), T – přesný časový plán (Time Specific/Trackable)

Souč.	Součinitel
°C	Stupně Celsia
3D	Třírozměrný

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 Schéma konstrukce sendvičového panelu [2]	12
Obrázek 2 Porovnání základních vlastností hliníkového sendvičového panelu oproti homogennímu materiálu [4].....	13
Obrázek 3 Sendvičový panel s pěnovým jádrem [7]	14
Obrázek 4 Sendvičový panel s voštinovým jádrem využívaný v dopravě [4].....	14
Obrázek 5 Sendvičový panel s voštinovým jádrem využívaný v konstrukci nábytku [4]...	14
Obrázek 6 Sendvičový panel s vlnitým jádrem [8].....	15
Obrázek 7 Hexagonální voštinové jádro [10]	16
Obrázek 8 OX-Core voštinové jádro [10].....	17
Obrázek 9 Flex-Core voštinové jádro [10]	17
Obrázek 10 Double-Flex voštinové jádro [10]	17
Obrázek 11 Reinforced Hexagonal voštinové jádro [10]	18
Obrázek 12 Sendvičové panely v nákladním prostoru užitkových automobilů [13].....	19
Obrázek 13 Skládací rampa pro vozíčkáře [13].....	20
Obrázek 14 Podlahový panel auta značky FIAT [1].....	20
Obrázek 15 Sendvičová struktura s obchodním názvem BONDAL [2].....	22
Obrázek 16 Sendvičová struktura s obchodním názvem LITECOR [2]	22
Obrázek 17 Porovnání vlastností sendviče LITECOR oproti hliníku a oceli [2]	23
Obrázek 18 Sendvičová struktura s obchodním názvem GLARE [15]	23
Obrázek 19 Sendvičová struktura s obchodním názvem Hylite [18]	24
Obrázek 20 Příklad lehkých polymerních materiálů na automobilu [19].....	26
Obrázek 21 Příklad využití kompozitních materiálů v automobilovém průmyslu [20]	27
Obrázek 22 Funkce FBG senzoru [29]	31
Obrázek 23 FBG senzor [28]	31
Obrázek 24 Ukázka detekce nárazu pomocí senzorů OTDR [25].....	32
Obrázek 25 Kabeláž ke snímací metodě OTDR dostupná z e-shopu Amazonu [31].....	32
Obrázek 26 Volkswagen Transporter typ T5 [33]	36
Obrázek 27 Nákladový prostor vozu Volkswagen Transporter typ T5 [33]	36
Obrázek 28 3D návrh sendvičového panelu na podlahu užitkového vozu Transporter typ T5/T6	37
Obrázek 29 Pohled na jednotlivé vrstvy sendvičového panelu na podlahu užitkového vozu Transporter typ T5/T6.....	38
Obrázek 30 Základní rozměry navrženého sendvičového panelu	38
Obrázek 31 AIREX® T10 – PET pěna [37].....	40
Obrázek 32 AIREX ® C70.55 – PVC pěna [37].....	40

Obrázek 33 AIREX® R82.60 – PEI pěna [37].....	41
Obrázek 34 Vakuová infuze [39].....	42
Obrázek 35 Náhled sestavy pro simulaci zatížení gravitační silou a silou 1000 N z programu Autodesk Inventor.....	43
Obrázek 36 Výsledek simulace sendvičového panelu s PET pěnou – průhyb	44
Obrázek 37 Výsledek simulace sendvičového panelu s PET pěnou – největší napětí	44
Obrázek 38 Výsledek simulace sendvičového panelu s PET pěnou – souč. bezpečnosti ...	45
Obrázek 39 Výsledek simulace sendvičového panelu s PVC pěnou – průhyb	45
Obrázek 40 Výsledek simulace sendvičového panelu s PVC pěnou – maximální napětí ...	46
Obrázek 41 Výsledek simulace sendvičového panelu s PVC pěnou – souč. bezpečnosti...	46
Obrázek 42 Výsledek simulace sendvičového panelu s PEI pěnou – průhyb	47
Obrázek 43 Výsledek simulace sendvičového panelu s PEI pěnou – maximální napětí....	47
Obrázek 44 Výsledek simulace sendvičového panelu s PEI pěnou – souč. bezpečnosti	48
Obrázek 45 Hladiny umístění senzorů.....	49
Obrázek 46 Rozteč mezi otvory pro umístění senzorů.....	50
Obrázek 47 Výsledek simulace sendvičového panelu s PET pěnou a se senzory umístěnými v I. hladině – průhyb	50
Obrázek 48 Výsledek simulace sendvičového panelu s PET pěnou a se senzory umístěnými v II. hladině – průhyb.....	50
Obrázek 49 Výsledek simulace sendvičového panelu s PET pěnou a se senzory umístěnými v III. hladině – průhyb	51
Obrázek 50 Výsledek simulace sendvičového panelu s PVC pěnou a se senzory umístěnými v I. hladině – průhyb	51
Obrázek 51 Výsledek simulace sendvičového panelu s PVC pěnou a se senzory umístěnými v II. hladině – průhyb.....	52
Obrázek 52 Výsledek simulace sendvičového panelu s PVC pěnou a se senzory umístěnými v III. hladině – průhyb	52
Obrázek 53 Výsledek simulace sendvičového panelu s PEI pěnou a se senzory umístěnými v I. hladině – průhyb	52
Obrázek 54 Výsledek simulace sendvičového panelu s PEI pěnou a se senzory umístěnými v II. hladině – průhyb.....	53
Obrázek 55 Výsledek simulace sendvičového panelu s PEI pěnou a se senzory umístěnými v III. hladině – průhyb	53
Obrázek 56 Rozložení vrstvených prepregů a zabudovaných senzorů [40].....	54
Obrázek 57 Drážka pro senzor v sendvičové struktuře s voštinovým jádrem [41]	55
Obrázek 58 Náhled umístění senzoru v sendvičové struktuře s voštinovým jádrem [41]...	55

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Porovnání ztrátových faktorů sendvičové struktury a volné vrstvy povrchového tlumení [1].....	21
Tabulka 2 Rozdělení mikrosenzorů podle lidských smyslů [24].....	29
Tabulka 3 Rozdělení mikrosenzorů podle mechanických veličin [24].....	30
Tabulka 4 Faktory, které pohánějí integraci senzorů v automobilovém průmyslu (dle automobilového trhu v Severní Americe) [32].....	33
Tabulka 5 Vlastnosti zvoleného materiálu od firmy Hexcel [35] [36].....	39
Tabulka 6 Vlastnosti zvolených pěn od firmy 3A COMPOSITES [37].....	41
Tabulka 7 Porovnání hmotností panelů ze zvolených materiálů pomocí programu Autodesk – Inventor 2019.....	42
Tabulka 8 Porovnání hmotnosti panelů a výsledků simulace po zatížení panelů gravitační silou a svislou silou 1000 N.....	48
Tabulka 9 Výsledky zatížených panelů s drážkami pro senzory ve třech hladinách.....	53

SEZNAM GRAFŮ

Graf 1 Porovnání frekvenční odezvy podlahového panelu s plechem (steel), panelu se sendvičovou strukturou (laminated steel) a panelu s vlnou vrstvou povrchového tlumení (damping treatment) [1]	21
Graf 2 Procentuální zastoupení materiálů v osobních automobilech [19].....	25
Graf 3 Procentuální zastoupení polymerních materiálů v automobilech [19].....	26

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha P I: Technický list: FBG senzor 1150 nm (firma FiSens)

PŘÍLOHA P I: TECHNICKÝ LIST: FBG SENZOR 1150 NM (FIRMA FISENS)



Preliminary Data Sheet

FBG Sensor Chain

First class quality, multi-functional and highly variable fiber Bragg grating (FBG) sensor chains for distributed profile measurements.



Key Features

- All possible reflectivities, wavelengths and grating lengths
- Very high wavelength accuracy
- Innovative laser illumination for unprecedented sensor marking precision
- Special FBG designs
- Arbitrary FBG-positions along the fiber
- Stable up to 900°C

Applications

- Strain measurement
- Temperature measurement
- Force measurement
- Pressure measurement
- Curvature and displacement Detection

FBG Specifications

FBG reflectivity	0,001 – 99%
Grating length	0,1 – 10mm
Wavelength Range	450 – 2000nm
Full Width at Half Maximum	0,2 – 2nm
Wavelength Precision	<0,15nm
Side-Loop Supression	>15dB
Miscellaneous	chirped, apodized, phase-shifted, on-edge

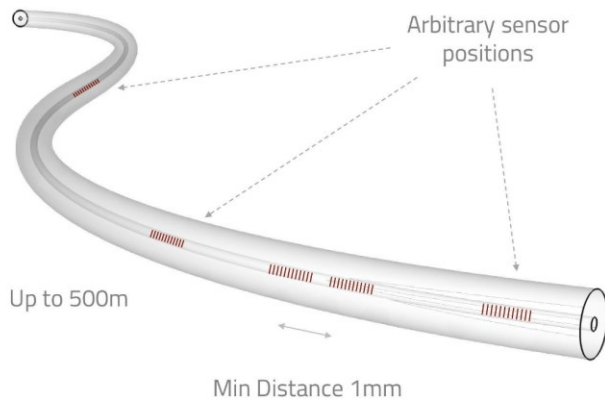
Fiber Specifications

Fiber types	standard SM, pure silica, bend insensitive, polarization maintaining, double-clad, multicore and more
Coating types	polyimide, acrylate, high-temp-acrylate, carbon polyimide

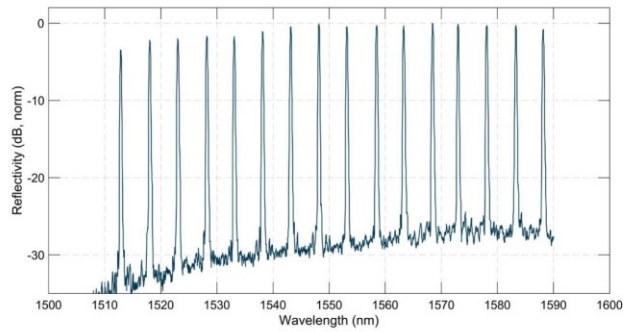
Array Specifications

Positioning	customizable FBG positions along the fiber from minimal adjacent distances >1mm
Dynamic Range	customizable wavelengths addressing light source spectra and measurement goals

Customizable FBG Sensor Chain



Exemplary spectrum of an array with 16 FBGs



FBG Functionalities

