

Přítlačný spojler automobilu jako sendvičový prvek

Tomáš Lunda

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: **Tomáš Lunda**
Osobní číslo: **T17511**
Studijní program: **B3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Technologická zařízení**
Forma studia: **Kombinovaná**
Téma práce: **Přítlačný spojler automobilu jako sendvičový prvek**

Zásady pro vypracování

1. Vypracujte literární rešerši se zaměřením na polymerní kompozity při návrhu přítlačný spojler na automobilu s využitím sendvičové struktury.
2. Pomocí materiálové databáze CES EduPack navrhnete a optimalizujete mechanické vlastnosti sendvičového panelu jako přítlačného spojleru v automobilu.
3. Při optimalizaci se zaměřte na ohybovou tuhost, průhyb a cenu.

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

Seznam doporučené literatury:

1. Ehrenstein Gottfried W.: Polymerní kompozitní materiály. 1.vyd. V ČR, ISBN: 978-80-86960-29-6, 2009.
2. ŠUBA, Oldřich: Dimenzování a navrhování výrobků z plastů, Zlín: Univerzita Tomáše Bati, 2001, skripta.
3. Michael F. Ashby: Materials Selection in Mechanical Design 5th Edition, Butterworth-Heinemann, 2017, ISBN-10: 0081005997, ISBN-13: 978-0081005996, <http://www.elsevier.com>
4. Knižní a časopisecké a zdroje dostupné prostřednictvím knihovny UTB ve Zlíně.

Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Jarmila Vilčáková, Ph.D.**
Centrum polymerních materiálů

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

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, považuji 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

Bakalářská práce se zabývá výběrem materiálů pro výrobu spoileru osobního automobilu jako sendvičového prvku. Teoretická část definuje kompozitní materiály a jádra sendvičových prvků a zabývá se jejich možnými poruchami, druhy namáhání a technologií výroby sendvičových struktur. Praktická část je zaměřena na výběr vhodných materiálů pro návrh sendvičového prvku navrženého pomocí software CES EduPack (Granta, Univerzita Cambridge, UK). Cílem práce bylo optimalizovat návrh sendvičového prvku s ohledem na ohybovou tuhost, průhyb a cenu výrobku.

Klíčová slova: sendvičový prvek, spoiler, ohybová tuhost, průhyb, kompozitní materiál

ABSTRACT

The bachelor thesis deals with the selection of materials for the production of a cars spoiler as a sandwich element. The theoretical part defines composite materials and cores of sandwich structure and deals with their possible failures, types of loading and technologies of sandwich structures production. The practical part is focused on the selection of suitable materials for the design of sandwich element designed using CES EduPack software (Granta, University of Cambridge, UK). The aim of work was to optimize the design of a sandwich element with respect to flexural stiffness, deflection and product price.

Keywords: sandwich element, spoiler, flexural stiffness, deflection, composite material

Tímto bych chtěl mockrát poděkovat paní doc. Ing. Jarmile Vilčákové, Ph.D. za odborné vedení, vřelou pomoc, cenné rady a konzultace při tvorbě mé bakalářské 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 SENDVIČOVÁ STRUKTURA	12
1.1 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY	12
1.2 DRUHY JADER SENDVIČOVÝCH PRVKŮ	14
1.3 BALZOVÉ JÁDRO.....	14
1.4 POLYMERNÍ PĚNY	15
1.5 VOŠTINY	17
1.6 KOREK	18
1.6.1 Produkce korku	18
1.6.2 Použití korku	19
1.7 3D TKANINY	19
1.8 VYUŽITÍ SENDVIČOVÝCH JADER	20
1.9 POUŽITÍ SENDVIČOVÝCH STRUKTUR.....	20
1.10 AUTOMOBILOVÝ PRŮMYSL.....	21
1.11 ŽELEZNIČNÍ PRŮMYSL	21
1.12 STAVEBNÍ PRŮMYSL	22
1.13 LETECKÝ PRŮMYSL	22
1.14 LODNÍ PRŮMYSL.....	23
2 MECHANIKA	24
2.1 PRŮŘEZOVÝ MODUL	24
2.2 PEVNOST A TUHOST V OHYBU.....	24
2.3 YOUNGŮV MODUL	25
2.4 SÍLA POTŘEBNÁ K PŘETRŽENÍ.....	25
2.5 PRŮHYB.....	26
3 TECHNOLOGIE VÝROBY KOMPOZITNÍCH STRUKTUR	28
3.1 STŘÍKÁNÍ (SPRAY LAY-UP).....	28
3.2 RUČNÍ KLADENÍ (HAND LAY-UP).....	29
3.3 VFI (VACUUM FOIL INFUSION)	30
3.4 NAVÍJENÍ VLÁKEN	31
3.5 PULTRUZE	32
3.6 RTM – VYSOKOTLAKÉ VSTRÍKOVÁNÍ (RESIN TRANSFER MOULDING).....	32
3.7 VARTM – VYSOKOTLAKÉ VSTRÍKOVÁNÍ ZA POMOCÍ VAKUA (VACUUM ASSISTED RESIN TRANSFER MOULDING)	33

3.8	SPECIÁLNÍ ZAŘÍZENÍ – AUTOKLÁV.....	34
4	TECHNOLOGIE VÝROBY SENDVIČOVÝCH KONSTRUKCÍ.....	36
4.1	VAKUOVÉ VYTVRZOVÁNÍ.....	36
4.2	VYHŘÍVANÉ LISOVÁNÍ.....	36
4.3	VYTVRZOVÁNÍ V PECI	37
5	SYNERGICKÝ EFEKT	38
6	PEEL TEST	39
6.1	CLIMBING DRUM PEEL TEST.....	39
6.2	DCB-TYPE PEEL TEST	40
6.3	PEEL TEST STLAČENÝM VZDUCHEM.....	40
7.1	TYPY LEPENÝCH MATERIÁLŮ	41
7.2	TYPY LEPIDEL	41
7.3	PEVNOST LEPENÉHO SPOJE	41
7.4	OKOLNÍ VLIVY PŮSOBÍCÍ NA LEPENÝ SPOJ	42
8.1	VADY S VLIVEM NA ŽIVOTNOST	43
8.1.1	Delaminace.....	43
8.1.2	Vzduchové bubliny	43
8.1.3	Neslepené plochy	43
8.1.4	Trhlíny.....	43
8.2	VADY SENDVIČOVÝCH KONSTRUKCÍ	44
8.2.1	Zlomení sendviče	44
8.2.2	Zvlnění sendviče	44
8.2.3	Lokální stlačení	44
8.2.4	Delaminace a zborcení jádra	44
9	ZKOUŠKY SENDVIČOVÝCH MATERIÁLŮ	45
9.1	ZKOUŠKA OHYBEM.....	45
II	PRAKTICKÁ ČÁST.....	47
10	CÍL PRAKTICKÉ ČÁSTI BAKALÁŘSKÉ PRÁCE.....	48
12	GEOMETRIE SENDVIČOVÉHO PANELU.....	50
13	VYBRANÉ MATERIÁLY Z CES EDUPACK	51
14.1	VZOREK Č. 1.....	53
14.2	VZOREK Č. 2.....	58
14.3	VZOREK Č. 3.....	63
14.4	VZOREK Č. 4.....	68
14.5	POROVNÁNÍ VZORKŮ A VYHODNOCENÍ.....	72
ZÁVĚR	74	
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	75	

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	78
SEZNAM OBRÁZKŮ	81
SEZNAM TABULEK.....	82
SEZNAM GRAFŮ	83

ÚVOD

Sendvičové prvky byly objeveny kolem roku 1820. První významnější použití bylo zaznamenáno již v průběhu 2. světové války. Byly použity v Anglii u letounů „de Havilland Mosquito“. Využití sendvičových prvků mělo nahradit nedostatek původních materiálů pro výrobu letounů. Tyto prvky byly aplikovány na průčelí, která byla vyrobena z dýhy a jádro z balzového dřeva.

Díky 2. světové válce se začaly objevovat první teoretické poznatky o sendvičových prvcích. V 50. letech 20. století byla výroba zaměřena na voštinové materiály. Voštinové jádro bylo používáno hlavně v leteckém průmyslu. Během 60. let se začaly vyrábět různé pěnové hmoty, které začaly vytlačovat voštiny. V začátcích výroby se sendvičové prvky orientovaly spíš na izolační schopnosti, proto se v hojném množství používal jako jádro polystyren a polyuretan. Později se začaly vyrábět tvrdší pěnové hmoty, které mají ale vyšší hustotu. Od té doby jsou sendvičové prvky velmi rozšířené, protože nabízí velmi flexibilní řešení. Sendviče nacházejí uplatnění i v jiných odvětvích průmyslu. V automobilovém průmyslu se využívají pro závodní speciály jako součásti karoserie, kapot, střech a spoilerů. V železničním průmyslu se používají jako nástupní rampy pro vozíčkáře, dveře a stěny. V lodním průmyslu mohou dokonce tvořit trup lodí. Ve stavebním průmyslu se používají hlavně ke stavbě panelových hal, kde samotný panel je sendvič.

I. TEORETICKÁ ČÁST

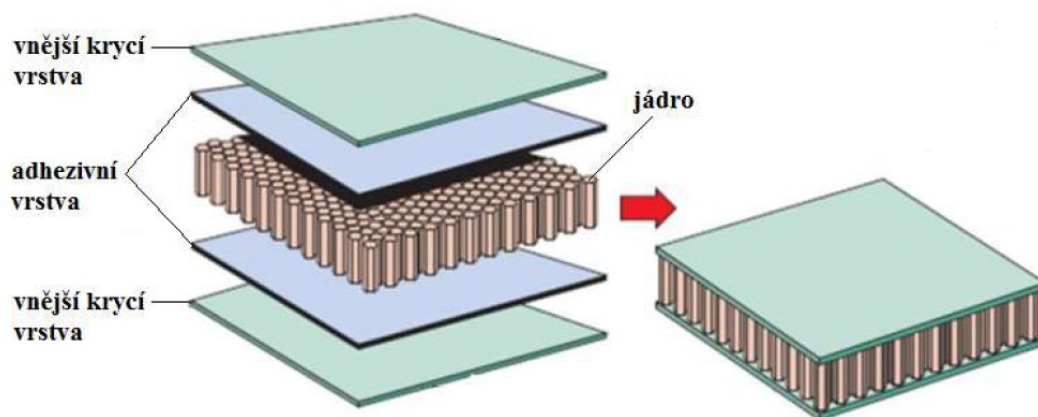
1 SENDVIČOVÁ STRUKTURA

Sendvičové struktury řadíme mezi kompozitní materiály. Skládá se ze dvou různých kompozitů, díky kterým získáme materiál vysoké kvality s výbornými mechanickými vlastnostmi. Skládá se ze 2 vnějších vrstev a 1 vnitřní vrstvy – jádra. Materiál vnější vrstvy se obvykle vyznačuje vysokou tuhostí. Materiál jádra dodává sendvičovému prvku pevnost ve smyku a tlaku. Díky těmto vlastnostem vznikne prvek s vysokým modulem pružnosti [1].

Vnější vrstvy jsou s jádrem spojeny pomocí lepidel nebo past. Vhodný výběr lepidel se řídí především dle použití sendvičového prvku. Nejvíce záleží na vhodných mechanických, a tepelných vlastnostech a dobré adhezí mezi vnějšími vrstvami a jádrem [16].

Vlastnosti sendvičových struktur jsou určeny především jádrem a jeho vlastnostmi. Mezi hlavní výhody patří především vysoká tuhost a pevnost nebo nízká hmotnost. Dále také tlumí vibrace a hluk, má skvělou odolnost vůči šíření různých trhlin, je odolný vůči rázům nebo teplu či ohni [3]

Jako vnější vrstvu můžeme použít například kompozitní materiály nebo hybridní kompozity. Pro vnitřní vrstvu můžeme použít různé polymerní pěny nebo voštiny. [5]



Obrázek 1: Skladba sendviče [16]

1.1 Kompozitní materiály

Letečtí inženýři, výrobci automobilů a designéři například sportovního vybavení (oštěpy apod.) mají jednu věc společnou. Chtějí materiály, které mají skvělé mechanické vlastnosti jako je tuhost, pevnost, houževnatost a především nízká hmotnost. První možnost

volby jsou lehké slitiny: slitiny na bázi hliníku, hořčíku nebo titanu. Výzkumy těchto slitin se zaměřují především na zlepšení jejich vlastností. Ale všechny tyto základní polymery mají mnohem nižší hustoty. Ani nejsou tak tuhé. Například keramika je mnohem tužší a zejména ve formách malých částic nebo tenkých vláken je mnohem pevnější. Tato fakta jsou využívána ve strukturálních hybridech, které obvykle označujeme jako částicové a vláknité kompozity [30].

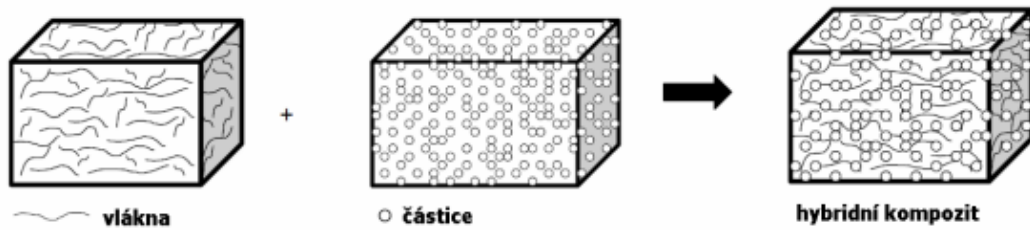
V zásadě lze kombinovat dva a více materiálů, aby vznikl kompozit. Dále musí splňovat minimálně tři kritéria. Mohou být smíchány v různých podobách, přičemž každá složka kompozitu musí být zastoupena v dostatečných velikostech, alespoň 5 %. Abychom mohli nazvat materiál kompozitem musí mít jednotlivé složky kompozitu znatelně odlišné vlastnosti. Třetí kritérium se týká syntetických kompozitů. Ty jsou nejčastěji produkovány spojováním a smícháním složek různými prostředky. Proto slitina, která obsahuje dvě fáze mikrostruktury, je produkována během tuhnutí z homogenní taveniny, není klasifikována jako kompozit [30].

V drtivé většině případů se kompozit sestává z jedné či více nespojitých fází spojených v jedné spojitě fázi. Spojitá fáze se nazývá matrice a nespojitá fáze je výztuha či vyztužující materiál, případně plnivo. Kompozity jsou tříděny dle typu materiálu dané matrice (sklo, polymer, kov). Popřípadě také podle velikosti a tvaru nebo uspořádání výztuže či plniva [24].

Dvoufázové kompozitní materiály se dělí do dvou hlavních kategorií: kompozity vyztužené vlákny a kompozity plněné částicemi. Kompozitní materiály vyztužené vlákny dělíme na dlouhovláknové a krátkovláknové a mají specifickou tuhost a pevnost. Důležité je rovněž rozhraní rozdělující komponenty – interakce (P+M) na rozhraní fází. Délka vláken a jejich poměr, objemový podíl vláken nebo orientace vláken mají značný vliv na vlastnosti vláknového kompozitu. Dále se nesmí zapomenout na adhezi vláken a matrice. V kompozitech plněných částicemi jsou v matrici rozptýleny částice nejrůznějších velikostí a tvarů v nahodilém uspořádání. Pokud je v těchto kompozitech distribuce částic zcela náhodná, jsou kompozity brány za kvazi-izotropní a kvazi-homogenní [2, 23, 21].

1.1.1 Hybridní kompozity

Hybridní kompozit vznikne tehdy, pokud se vloží dva a více typů výztuže do samostatné matrice nebo směsi matric. Vznikají často spojením částicového a vláknového kompozitu [3].



Obrázek 2: Složení hybridního kompozitu [3]

Do hybridních kompozitů řadíme kompozity s vláknovou výztuží obsahující částicová plniva upravující vlastnosti matrice. Také jsou takto označovány systémy, které kombinují různé typy vláknových výztuží, např. tkaniny složené z kevlarových (Kevlar fiber), uhlíkových (Carbon fiber) či skelných vláken (Glass fiber) [4].

Existují dva způsoby, jak lze kombinovat výztuže, aby vznikl hybridní kompozit. První možnost je takzvaný laminát. Je to materiál, který vzniká vrstvením jednotlivých typů výztuže na sebe. Druhý způsob je dokonalé promíchání rozdílných výztuží v matrici. Přidávají se buď naráz, nebo postupně do matrice nebo do směsi matric [19].

V hybridních kompozitech je spousta možností, které mohou ovlivnit konečné mechanické vlastnosti materiálu. Mezi nejvýznamnější patří hmotnostní nebo objemový poměr jednotlivých vyztužovacích složek. Dále se nesmí zapomenout na vlastnosti výztuží a matrice, smykovou pevnost, orientaci výztuže nebo množství defektů celého kompozitu. Pomocí kombinace jednotlivých výztuží lze snadno určit potřebné mechanické vlastnosti ($\sigma=150\text{MPa}$). Díky tomu mají hybridní kompozity předpoklady pro široké použití [20].

1.2 Druhy jader sendvičových prvků

Mezi vnější vrstvy přenášející zatížení na tah a tlak se umísťuje jádro, které přenáší smykové zatížení. Jádra sendvičových prvků jsou vyráběna z různých typů materiálů a konstrukcí. Záleží na tom, jaké máme požadavky na celý prvek. Jaké chceme výsledné vlastnosti sendvičového prvku, podle toho volíme vhodný materiál, typ konstrukce jádra a tloušťku jádra.

1.3 Balzové jádro

Balza je velký, rychle rostoucí strom. Roste v Jižní Americe, hlavně v Ekvádoru (95% celkové komerční produkce). Tento přírodní kompozit se musí nejdřív vysušit. Po vysušení

má hustotu 40 – 340 kg/m³ (obvykle 150-160 kg/m³). Výhody použití balzového dřeva je to, že nehoří, jen pomalu doutná. Teplem neměkne jako polymerní pěny. Vyznačuje se také menší tepelnou vodivostí. Má buňky uzavřené, takže sendvičové prvky lze vyrábět například technikou infuze pryskyřice [7].



Obrázek 3: Balzové dřevo [7]

1.4 Polymerní pěny

Pěny jsou hybridy pevné látky a plynu. Mají spojitou termoplastickou nebo reaktoplastickou matici. V matici je objemový podíl 50-90% dispergovaná plynová fáze. Polymerní pěny jsou heterogenní, proto se považují za kompozitní systém [17].

Polymerní pěny se vytváří vytlačněním taveniny polymeru do vakuové komory. Dále například vakuovou expanzí, tlakovým foukáním plynu do polymerní taveniny nebo jednoduchým mícháním. Struktura pěn má buď otevřené nebo uzavřené buňky [18].

Mezi nejvýznamnější vlastnosti pěny patří výborný poměr tlakové pevnosti k hmotnosti, který je kombinací buněčné struktury a mechanických vlastností materiálu, ze kterého je vyrobeno buněčné těleso (pevná látka). Mezi další vlastnosti pěn patří schopnost pohlcovat rázovou energii nebo tlumit kmity. Vlastnosti pěn jsou ovlivněny především objemovým poměrem plynu, podílem tloušťky stěny a velikosti buňky. Pěny jednoho stejného polymeru se můžou vyrábět v mnoha modifikacích. V závislosti na tloušťce pěny se hodnoty modulu pružnosti nachází v rozmezí 0,5 – 500 MPa [11].

Pěny se vyrábí z různých syntetických polymerů, z polystyrenu (PS), polyuretanu (PUR), polyetherimidu (PEI) nebo třeba z polyvinylchloridu (PVC) [11].

Nejčastěji se používají pěny o hustotách v rozmezí 40 – 200 kg/m³ a v tloušťkách od 5mm do 50mm, kdy zaručují nejlepší vlastnosti pro sendvičový prvek [11].



Obrázek 4: PVC pěny [11]

PVC

Nejpoužívanější pěna pro jádro se vyrábí z PVC. Vlastnosti PVC jsou vhodné pro vyváženou kombinaci dynamických a statických vlastností. Mají také dobrou absorpci vody. Pěny z PVC existují ve dvou typech – síťované (lineárně a příčně) a nesíťované [11].

PUR

Náhrada překližky. Sice je dražší (1100 Kč/kg), ale o dost lehčí ($\rho=800\text{kg/m}^3$). Nevýhodou tohoto materiálu je křehkost. Naopak obrovskou výhodou je opracování na tvar dle potřeby. Využívají se hlavně jako tepelné či zvukové izolace [11].

PEI

Další ze zástupců materiálu pěny s typickými vlastnostmi. Na rozdíl od výše zmíněných má tato pěna odolnost vůči požáru a odolnost vůči vysoké provozní teplotě například stroje. Používá se jako protipožární či tepelná izolace. Rozmezí teplot použití je od -194°C do $+180^\circ\text{C}$ [17].

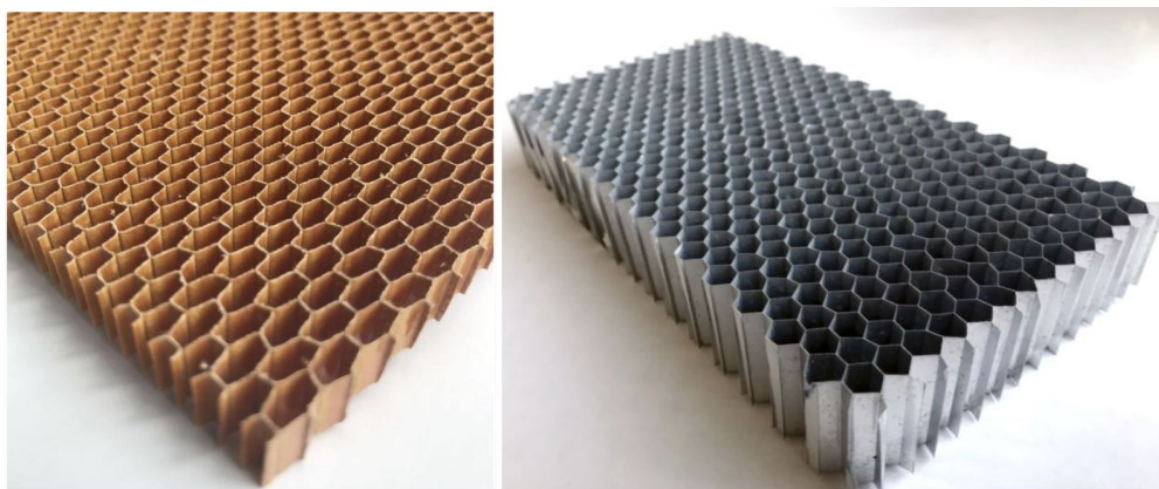
PS

Poslední z takových nejznámějších pěn je polystyren. Vzhledem ke svoji nízké hmotnosti (40 kg/m^3) se využívá pro výrobu jader sendvičových prvků, ze kterých se následně vyrábí plachetnice nebo surfovací prkna. Mezi další výhody patří i nízká cena.

Nesmí se používat ve vysoce pevnostních konstrukčních aplikacích. Nemohou být používány v systémech, ve kterých používáme jako matici polyesterovou pryskyřici [22].

1.5 Voštiny

Voštiny se používají jako jádro sendvičové struktury. Název voština vznikl odvozením z podobnosti s pláství včelího medu ("honeycomb"). Mohou mít různou výšku, velikost nebo tvar buněk. V roce 1938 si hliníkovou voštinu nechal patentovat Norman de Buyne ve Velké Británii. Vyrábí se již od roku 1945 [26].



Obrázek 5: Voština vlevo – z aramidového papíru, vpravo – hliníková [25]

Výroba voštin

Voštiny se skládají z plošného materiálu různými technologiemi. Používají se třeba uhlíkové, aramidové nebo skleněné fólie. Dále můžeme použít i hliníkové fólie nebo textílie.

Moderní výrobní postup je vrapování fólie – stříhání fólie – spojením dvou listů fólie vznikne panel se šestihrannými dutinami. Listy se k sobě spojují nejčastěji pryskyřicí. Následuje sušení a poté řezání panelu v podélném směru a tvoří se již zmíněné voštinové plástve s požadovanou tloušťkou [26].

K vnějším vrstvám se voština přilepuje fólií lepidla, kterou se voština překryje a následně se přiloží vnější vrstva. Poté se fólie při zvýšené teplotě roztaví a spojí voštinu s vnějšími vrstvami [26].

Materiály voštin

Voštiny se můžou vyrábět třeba z aramidových vláken (tzv. Nomex – obchodní název). Slepují se fenolovou pryskyřicí a stěny po vytvrzení mají vzhled papíru. Buňky mají průměr od 3 mm do 5 mm. Normálová tlaková pevnost voštiny z těchto vláken je mezi 1 – 7 MPa.

Další možností z čeho je vhodné vyrobit voštinu je hliník. Tento materiál má skvělý pevnostní a hmotnostní poměr. Jelikož existují různé konfigurace adhézních spojení hliníkové fólie, dá se vytvořit velké množství tvarů buněk voštiny. Nejčastěji se však používají buňky s šestiúhelníkovým tvarem. I přes to, že má tento materiál dobré mechanické vlastnosti a nízkou cenu, nesmí se používat v agresivních prostředích (alkalické, kyselé), ve kterých může dojít do styku s kyslíkem, kde by mohl zoxidovat [25].

1.6 Korek

Díky nízké hmotnosti a skvělým mechanickým vlastnostem jsou dost využívané sendvičové konstrukce s pěnovým jádrem. Jenže pěnová jádra často nemají dostatečné akustické vlastnosti. A na trhu se neustále zvedá poptávka po sendvičových strukturách, které dokáží absorbovat hluk. Proto se začaly vyrábět jádra z korku, které v sendvičové struktuře v kombinaci s uhlíkovým vláknem, dokáží tlumit hluk až o 250%. Dokáže odolávat teplotám až 120°C – dobrý izolant. Korek je také velmi lehký (hustota $\rho=480 - 520 \text{ kg/m}^3$) a pružný, proto se může používat i do zaoblených sendvičových struktur. Tyto struktury mají také zvýšenou odolnost a životnost. Navíc korek je přírodní a obnovitelný zdroj a díky tomu je ekologicky šetrný – recyklovatelný [6].

1.6.1 Produkce korku

Stromy, ze kterých se korek vyrábí se nazývají korkové duby. Nejvíce rostou v oblasti Středomoří. 54% světové produkce je z Portugalska, 36 % je ze Španělska, Alžírsko a také Maroka. Plocha plantáží po celém světě je asi 2,9 milionů hektarů a roční produkce je zhruba 360 tis tun. Pomocí speciálních nástrojů se kůra dubů odřezává. Původní kůra je nekvalitní a odstraňuje se v době, kdy má kmen obvod asi 30 cm. Kůra znovu dorůstá a následně se v intervalech 9-15 let sklízí. Nejvyšší kvalita kůry se sklízí klidně až po 30 letech. [6]

1.6.2 Použití korku

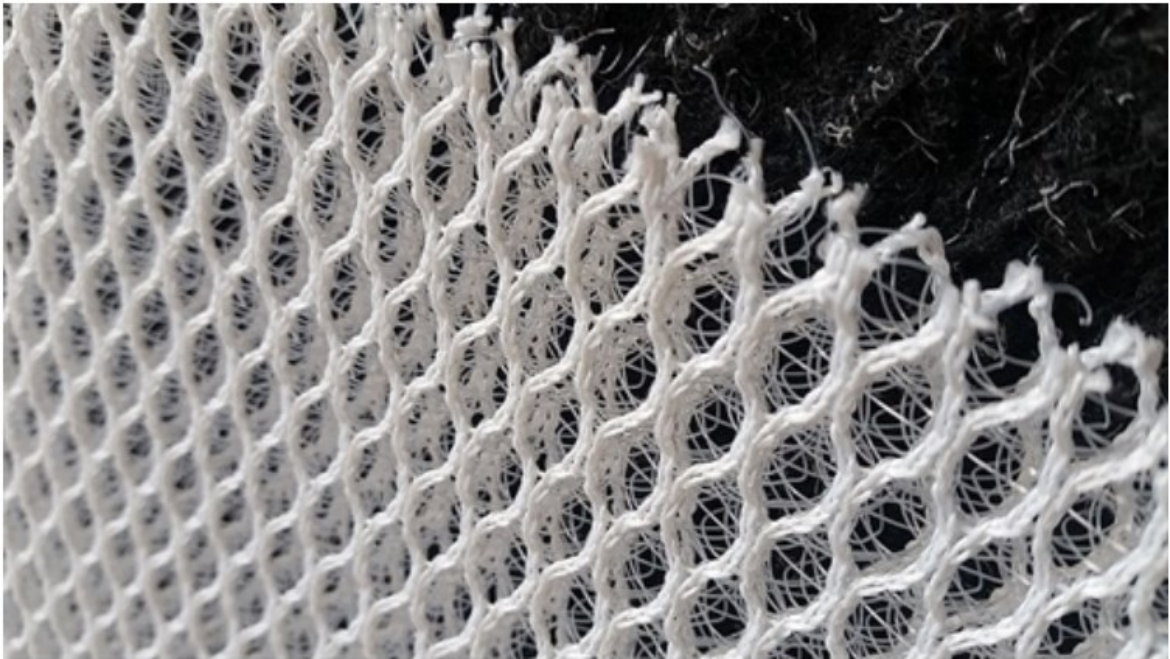
Korek se používá ve sportovních potřebách – surfovací prkna. Dále v průmyslech jako jsou – lodní, dopravní, potravinářský (špunty v lahvích s vínem) nebo kosmický. Používá se taky jako izolace nebo listy větrných turbín. Nebo může taky posloužit jako dekorace nebo její součást.



Obrázek 6: zátka z korku [6]

1.7 3D Tkaniny

3D tkaniny se vytváří pouze se skleněnými vlákny a pryskyřicí. Dodávají se ve stlačeném stavu. Vlákna jsou fixována pojivem, které je rozpustné v pryskyřici. Po kontaktu s rozpouštědlem pryskyřice dojde k rozdělení tkaniny v kolmém směru k jejímu povrchu. Výhodou distančních tkanin je především nižší cena oproti voštinám z hliníkové fólie nebo z aramidových vláken z polyamidu (Kevlar, Nomex, Du-Pont – obch. značky) ve fenolformaldehydové matrici. Voštiny se musí dále obrábět do potřebného tvaru na frézce speciálními jednobřitými nástroji. Distanční tkaniny, které se vyrábí ve formě pásů se uplatňují například při výrobě navíjených nádrží pro ekologicky nebezpečné látky. Uvnitř této tkaniny mohou být instalována čidla, které varují před případným únikem obsahu nádrže do meziprostoru [30].



Obrázek 7: 3D tkanina [30]

1.8 Využití sendvičových jader

Jádra sendvičových prvků mají širokou škálu využití díky velkému rozsahu vlastností jednotlivých typů.

Velké využití najdou v průmyslech: kosmickém, leteckém, automobilovém, vojenském, lodním, stavebním.

Díky nižší hmotnosti mají lepší hybné síly a vyšší efektivitu dopravy. Například v automobilu je 75% spotřebovaného paliva závislého na jeho hmotnosti. Každých 10% ušetřené hmotnosti se využití paliva zvýší o 6-8%. Toto vede ke snížení CO₂ pouštěného do ovzduší [30].

1.9 Použití sendvičových struktur

Sendvičové struktury lze uplatnit v mnoha oblastech průmyslu. Používají se hlavně tam, kde je hlavním požadavkem snížení hmotnosti, zvýšení Youngova modulu, které běžné materiály nedokážou nabídnout. Nejčastějším průmyslem, kde se tyto struktury využívají, jsou letecký a kosmický. Také se hojně využívají v lodním, kolejovém, automobilovém nebo stavebním průmyslu. Čím dál častěji ale získávají speciální uplatnění ve sportovním odvětví, kde se tyto struktury využívají třeba k výrobě lyží, snowboardů, prken na skateboardy, surfovacích prken, pingpongových pálek nebo pro výrobu lodí (kanoe a kajaky) [12].

1.10 Automobilový průmysl

Hlavním důvodem použití sendvičových struktur v automobilovém průmyslu jsou požadavky na co největší snížení hmotnosti automobilů. Největší výhody v používání sendvičových struktur jsou zvýšení bezpečnosti v případě nehody pro posádku vozu, lepší aerodynamický design, snížení zmíněné hmotnosti, vyšší pevnost dílců a odolnost vůči korozi a poškození chemikáliemi. Nejčastějšími výrobky ze sendvičových struktur jsou dveře, podlahy, nárazníky, palubní desky, střechy automobilů nebo autobusů a spoilery u sportovních vozů. Ve vojenské sféře se například používá na podvozku sendvičová struktura s jádrem z hliníkové voštiny, která je odolná proti výbušninám [16].



Obrázek 8: vlevo – spoiler, vpravo – střecha os. Automobilu zn. BMW [32]

1.11 Železniční průmysl

V železniční dopravě se využívají zejména sendvičové struktury s voštinovým jádrem. Používají se třeba jako podlahy, přístupové rampy, dveře, stropy nebo jako bezpečnostní prvky. Ve vysokorychlostních vlacích, metrech, tramvajích nebo osobních vlacích je najdeme třeba i v interiérech – přepážky v jídelních vozech, stěny mezi jednotlivými kupé, stěna oddělující řidiče od cestujících apod. Využívány jsou také kvůli nízké hmotnosti, vysoké pevnosti a tuhosti. Voštinová jádra se využívají hlavně proto, že jsou nehořlavá. Dále mohou struktury sloužit jako zvuková izolace, hlavně ve vysokorychlostních vlacích [25].



Obrázek 9: Dveře od WC ve vlaku jako sendvičový prvek [33]

1.12 Stavební průmysl

Sendvičové struktury se také používají ve stavebním průmyslu. Je to způsobeno díky výborné tepelné a zvukové izolaci. Uvnitř sendvičů se používají zejména pěnová jádra například z PUR pěn. Opět zde platí, že mají vysokou pevnost, nízkou hmotnost, odolnost vůči korozi, vlhkosti nebo UV záření. Ve stavebním průmyslu se dají sendvičové struktury využít téměř kdekoliv. Můžeme je použít jako střechy, stěny, venkovní obložení, kancelářské příčky, schodiště nebo jako různé konstrukční profily pro stavbu výrobních průmyslových budov, skladů nebo montážních hal [23].

1.13 Letecký průmysl

V leteckém a kosmickém průmyslu je používání sendvičových struktur velmi oblíbené, protože jejich největší výhodou je velmi vysoká ohybová pevnost a tuhost při zachování co nejnižší hmotnosti. Struktury se používají pro výrobu opláštění letadel a jejich komponentů – křídla, vrtule, podvozek, podlahy, dveře atd. V interiéru letadla se používají třeba na skříňky na příruční zavazadla, v konstrukci sedadel nebo na palubní mechanismy (páky apod.) [16].



Obrázek 10: Konstrukce sedadel vyrobené ze sendvičového prvku [33]

1.14 Lodní průmysl

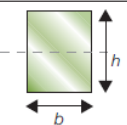
Sendvičové struktury mají také široké využití v lodním průmyslu. Můžeme je použít v závodních člunech, výletních lodích, jachtách nebo také na vrtných plošinách. Vysokou míru použití mají sendviče s pěnovým jádrem, které splňují požadavky na vzpěr a jsou odolné vůči mořské vodě. Lze využít i voštiny vyrobené z hliníku, protože nabízí velmi dobrý poměr pevnosti a hmotnosti. Dále se dají využít v interiéru jako přepážky mezi kajutami nebo na palubě. Můžou také klidně tvořit i celé trupy lodí [12].

2 MECHANIKA

2.1 Průřezový modul

Průřezový modul je teorií únosnosti průřezu a vyjadřuje odpor průřezu proti namáhání v ohybovém momentu [28, 30].

$$Z_p = \frac{b \cdot h^2}{4} [m^3]$$

Section Shape	Area A m^2	Moment I m^4	Moment K m^4	Moment Z m^3	Moment Z_p m^3
	bh	$\frac{bh^3}{12}$	$\frac{bh^3}{3}(1 - 0.58\frac{b}{h})$ ($h > b$)	$\frac{bh^2}{6}$	$\frac{bh^2}{4}$

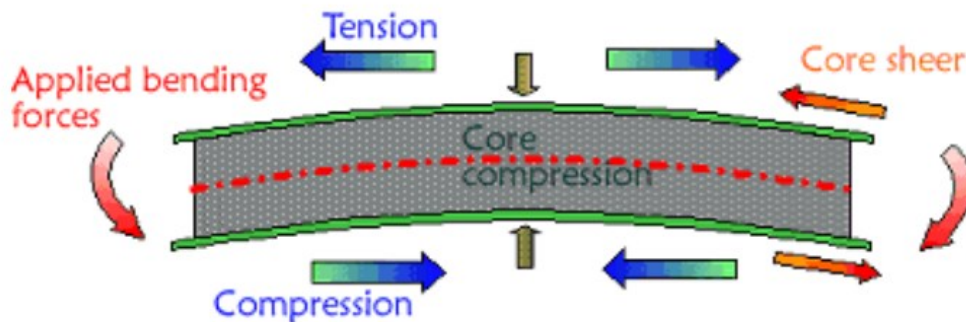
Obrázek 11: Zobrazení možností průřezových modulů [29]

2.2 Pevnost a tuhost v ohybu

Při použití sendvičového materiálu s vhodnou volbou tloušťky docílíme znatelného nárůstu pevnosti a tuhosti v ohybu. Obrovskou výhodou v sendvičové konstrukci je vysoká pevnost a tuhost v ohybu s ohledem na požadovanou nízkou hmotnost. Na rozdíl od celistvého materiálu můžeme pomocí sendvičové konstrukce se stejnou hmotností, jako je materiálu, zvýšit tuhost až 37- krát a pevnost v ohybu až 9 - krát.

Horní vnější vrstva sendvičové konstrukce je zatížena na tlak. Spodní vnější vrstva je zatížena na tah. Takže nejdůležitější vlastnosti jádra je jeho tuhost a pevnost ve smyku. Ale zároveň musí být vnější vrstvy schopné přenést zatížení tlakem, aniž by došlo k porušení. Platí to zejména pro použití lehkých a tenkých laminátových výztuží.

Pevnost sendviče v tlaku ve směru jeho tloušťky je rozhodující zejména pevnost jádra v tlaku, poté i tuhost a tloušťka potahů. S hustotou jádra přímo úměrně roste pevnost v tlaku [29].



Obrázek 12: Působení sil v ohybu sendvičového prvku [29]

Ohybová tuhost sendvičové konstrukce je přímo úměrná druhé mocnině její tloušťky. Výhodou sendviče je, že se zvětšováním tloušťky celého panelu dochází k velmi malému růstu hmotnosti. Zvětšuje se tloušťka jen jádra, nikoliv vnějších vrstev. Jádro obvykle má hustotu kolem $80 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Pevnost v ohybu roste také díky větším vzdálenostem vnějších vrstev. Ale při návrhu panelu je důležité také zkoumat smykovou pevnost jádra [29].

Když porovnáme pevnosti pěn a voštin vyplyne nám, že voštiny mají daleko lepší mechanické vlastnosti než pěny při stejné hustotě. Při volbě vhodného jádra sendvičové konstrukce je nezbytné zohlednit všechny nezbytné faktory, které mohou nepříznivě ovlivnit mechanické vlastnosti celého prvku. Vzorec ohybové tuhosti [27]:

$$K_o = E \cdot I \text{ [kNm]} \quad (1)$$

2.3 Youngův modul

Youngův modul neboli modul pružnosti v tahu, lze definovat jako poměr napětí (σ) a vyvolané deformace (ε) pomocí modulu. Lze vyjádřit vztahem [29]:

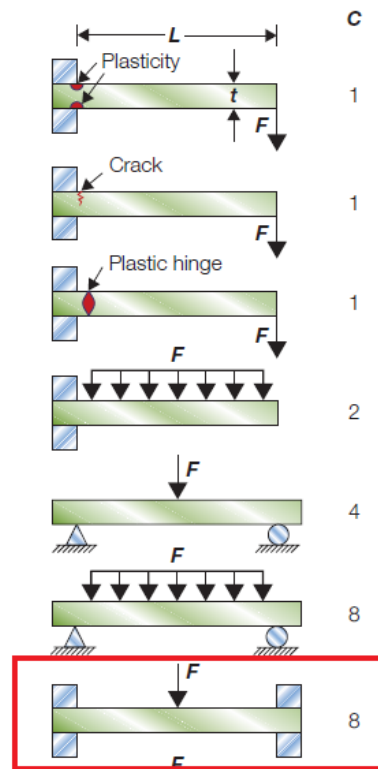
$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \text{ [Pa]} \quad (2)$$

2.4 Síla potřebná k přetržení

Síla potřebná k přetržení je určena jako kritická pro namáhání sendvičového prvku jakoukoliv jinou silou, která nesmí překročit hodnoty síly potřebné k přetržení. V případě překročení potřebné síly k přetržení musíme volit jiné pevnější materiály sendvičového prvku. Vypočítá se rovnicí [29]:

$$F_f = \frac{C \cdot Z_p \cdot \sigma_y}{L} [N] \quad (3)$$

K výpočtu síly potřebné k přetržení používáme variantu nosníku pevně vetknutého do dvou podpor. Je důležité si to určit, protože C je konstanta, která na tom závisí, viz obrázek níž.



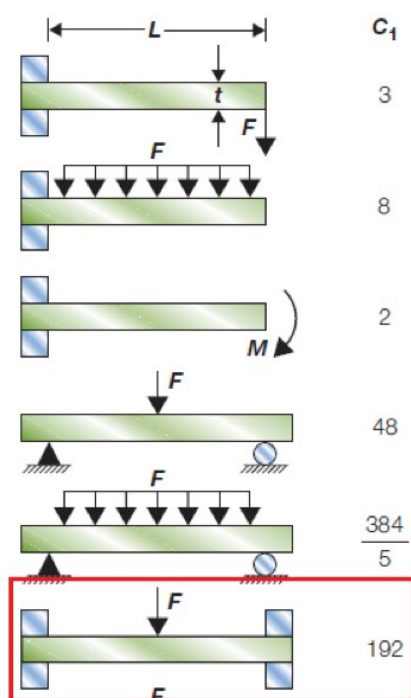
Obrázek 13: Druhy konstant k určení síly potřebné k přetržení (Granta Appendix B) [29]

2.5 Průhyb

Průhyb nám určuje, jak moc se spoiler prohne pod působením síly. Vypočítá se pomocí rovnice [29]:

$$\delta = \frac{M \cdot L^2}{C_1 \cdot E \cdot I} [m] \quad (4)$$

Kde C_1 je opět konstanta, která vychází z uložení nosníku viz obrázek níže.



Obrázek 14: Druhy konstant potřebných k vypočítání průhybu (Granta Appendix B) [29]

3 TECHNOLOGIE VÝROBY KOMPOZITNÍCH STRUKTUR

Existuje mnoho možností, jak ovlivnit výsledné vlastnosti výrobku vyrobeného z laminátových nebo kompozitních sendvičových struktur. Můžeme ovlivnit například tuhost, pevnost, houževnatost nebo tepelnou odolnost, ale také výrobní náklady a cenu za výrobek. K dosažení požadovaných vlastností dosáhneme použitím specifických vlastností různých materiálů nebo způsobem výroby. Kvůli tomu je potřeba posoudit technologický postup výroby vyztužených prvků za velmi podstatný faktor. Určuje nám jeho konečné vlastnosti a ekonomiku výroby [8].

Volba výrobní technologie se řídí několika zásadními faktory:

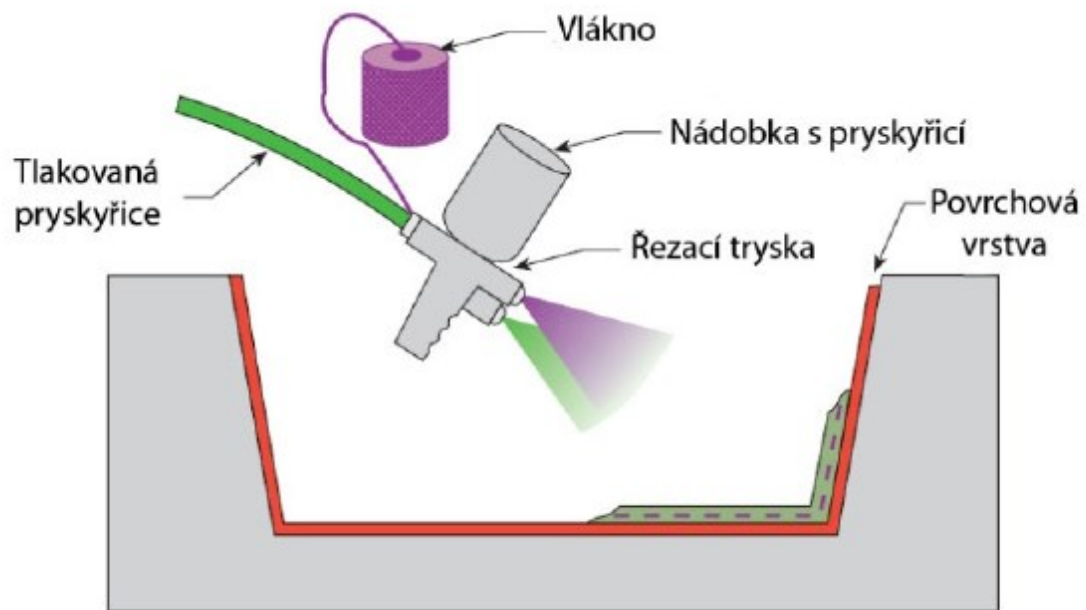
- Sériovost dílce
- Velikost a členitost výrobku
- Požadovaná kvalita povrchu výrobku
- Požadované vlastnosti např.: pevnost, hmotnost, ekonomika výroby

3.1 Stříkání (Spray Lay-Up)

Vlákna se ve stříkací pistoli nasekají a následně smíchají s pryskyřicí. Nejčastěji se používá polyesterová pryskyřice v kombinaci s výhradně skleněnými vlákny. Stříkání patří mezi dlouho používané technologie [3].

Mezi výhody patří nízká cena, a hlavně rychlý způsob nanášení směsi do formy. Nevýhodou je vysoká hmotnost, protože laminát obsahuje velké množství pryskyřice. Dále musí mít pryskyřice nízkou viskozitu, aby vznikl vhodný kompromis mezi mechanickými a tepelnými vlastnostmi výsledného kompozitu. Musí se používat pouze krátká vlákna, tudíž jsou omezeny výsledné vlastnosti kompozitu. Pryskyřice je škodlivější, protože má vyšší obsah styrenu [3].

Stříkání kompozitní struktury se používají u lehce zatěžovaných sendvičových panelů např. u karavanů, aerodynamických krytů nákladních automobilů nebo v domácnosti u van a sprchových van [3].



Obrázek 15: Stříkání [3]

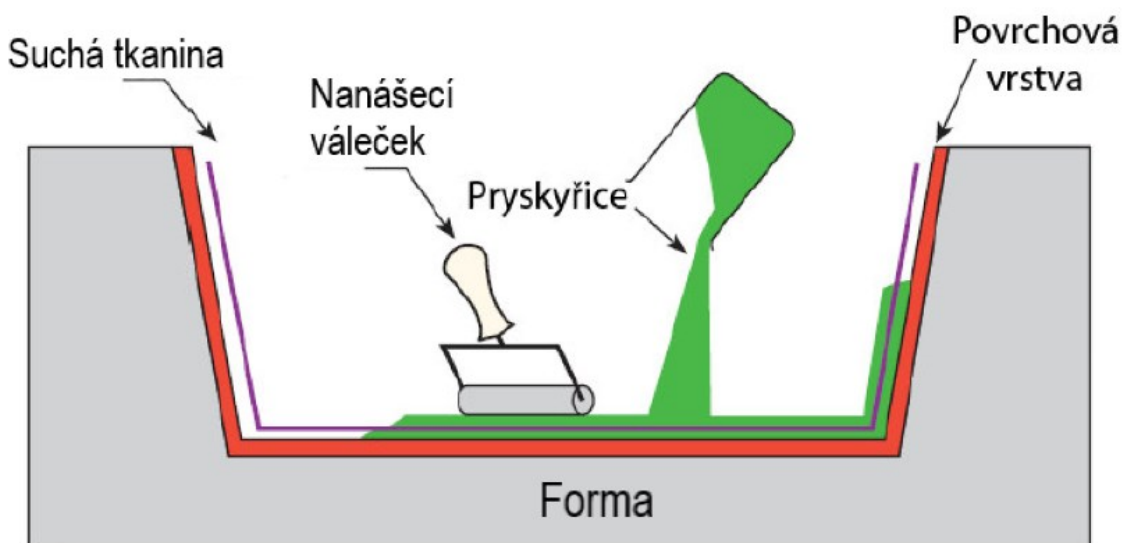
3.2 Ruční kladení (Hand Lay-Up)

Je to nejstarší metoda výroby kompozitních materiálů. Celý proces nanášení pryskyřice a výztuže je prováděn ručně. Kvalita povrchu takto vyrobeného dílce je dobrá jen z jedné strany. S touto nevýhodou je třeba počítat při návrhu výrobků metodou ručního kladení. Po položení výztuže a následném nasycení pryskyřicí je výrobek připraven k vytvrzení.

Benefity ručního kladení jsou minimální náklady na nástroje, jednoduchá výroba a neomezená kombinace tvarů a velikostí.

Nevýhodou ručního kladení je velké množství nerecyklovatelného odpadu. Velmi těžko se dá znovu zpracovat. Další nevýhody jsou dlouhý výrobní čas a potřeba mít zkušené pracovníky. Na nich závisí výsledná kvalita výrobku [3].

Tato metoda je nejvyžívanější v lodním průmyslu.



Obrázek 16: Ruční kladení [3]

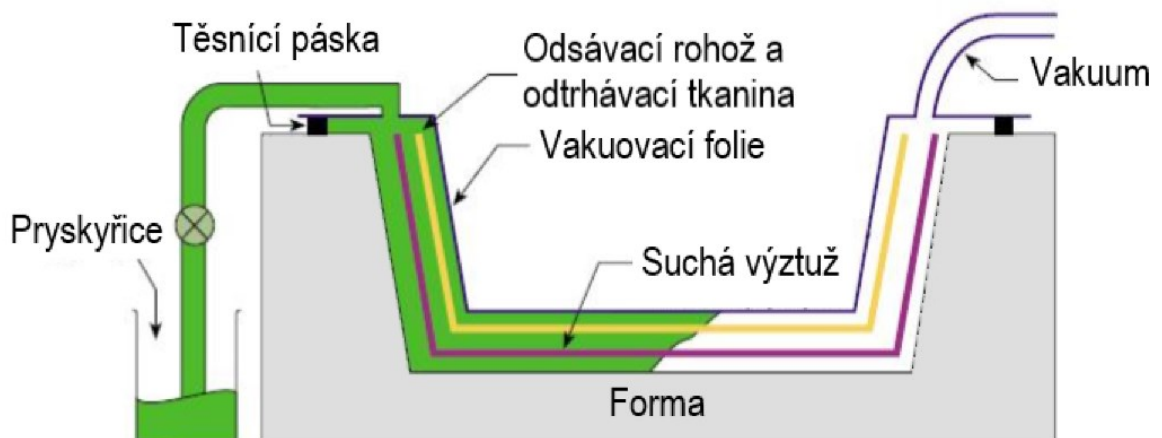
3.3 VFI (Vacuum Foil Infusion)

Vacuum Foil Infusion, v češtině Vakuová infuze pod pružnou fólií, je technologie, která k prosycení suchých vrstev kompozitní struktury, využívá podtlaku. Je to vylepšení ručního laminování. Do formy jsou vkládány materiály pro kompozitní struktury suché. Poté se vkládají různé potrubí a pomocné materiály pro vytvoření ideálního toku matrice a pro vytvoření vakua.

Výhodou této metody je nižší hmotnost, vyšší pevnost a tuhost výsledného produktu. Lepší ochrana zdraví a bezpečnosti obsluhy (během vytvrzování brání fólie úniku těkavých látek pryskyřice). Výsledná kompozitní struktura obsahuje více výztuže oproti ručnímu laminování.

Nevýhodou je vznik většího odpadu pomocných materiálů pro tuto technologii. Obsluha musí být proškolená a zkušená.

Nejčastější použití je v lodním průmyslu, ve výrobě letadel, sendvičové struktury a pevnostně zatížené kompozity [8].



Obrázek 17: VFI technologie [3]

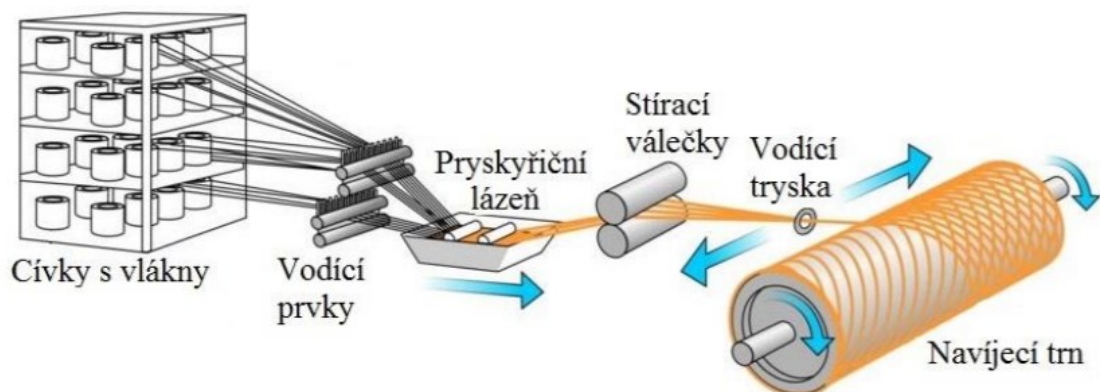
3.4 Navíjení vláken

Tato technologie se používá hlavně pro duté výrobky, které mají obvykle kruhový nebo oválný průřez. Stroje pro navíjení do šroubovice se často přirovnávají vzhledově k soustruhům. Navíjení vláken smočených v pryskyřici se používají ve výrobě rotačních nebo nerotačních nádob s konvexními povrchy.

Výhodou technologie je možnost počítačově řídit navíjení. Lze orientovat vlákna dle zatížení. Není zde proces změny vlákna na tkaninu.

Nevýhodou je použití pouze pro konvexně tvarované komponenty, velké ekonomické nároky na nástroj (trn), použití nízkoviskozní pryskyřice.

Tato technologie se používá při výrobě trubek kruhového nebo konvexního tvaru, při výrobě plynových lahví nebo protipožárních nádob [8].



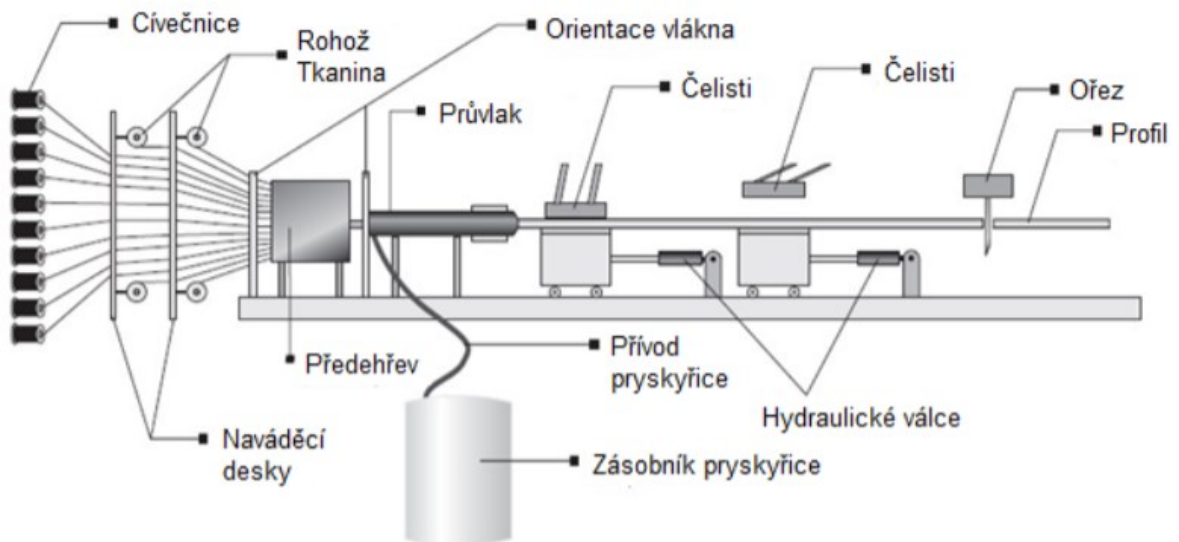
Obrázek 18: Navíjení vláken [3]

3.5 Pultruze

Výztuž je kontinuálně impregnována tekutou UP nebo VE pryskyřicí a vtahována do vytvrzovací a tvarovací hlavy. Pryskyřice je vytvrzena v ohřívané části vytvrzovací hlavy a hotový profil je odtahován pásem nebo pomocí vozíků a následně řezán na potřebnou délku. Stroje nejčastěji mají horizontální uspořádání.

Výhodou je ekonomický rychlý způsob výroby, dá se ovlivnit obsah pryskyřice, má dobré výsledné konstrukční vlastnosti a obsahuje velké poměrné množství výztuže. Nevýhodou je případná vysoká cena vyhřívání matrice.

Technologii lze použít na výrobu sendvičových panelů, křídel bezpilotních letounů, profilů, nosných prvků letadel, střešní konstrukce nebo žebříky a rámy [8].



Obrázek 19: Pultruze [3]

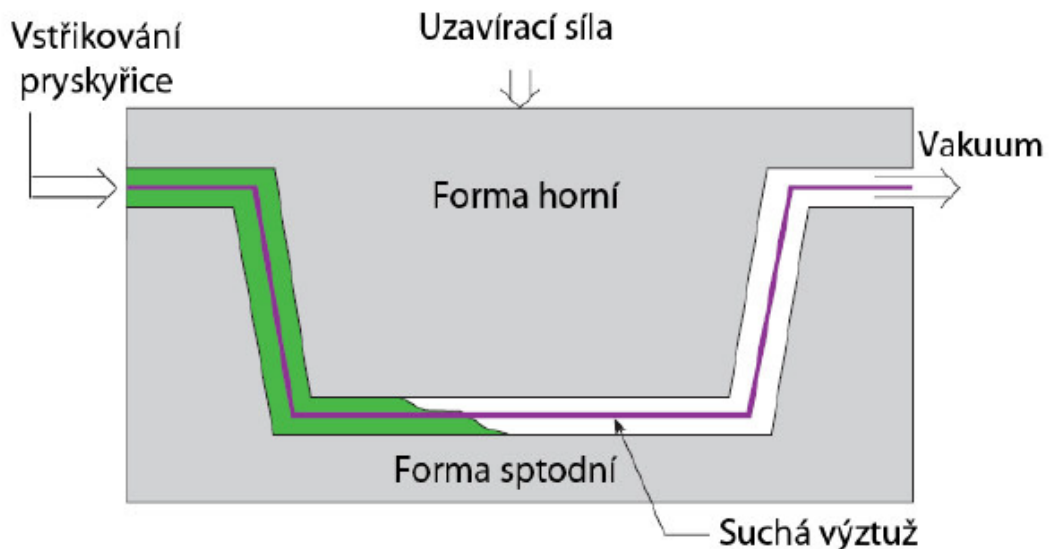
3.6 RTM – Vysokotlaké vstřikování (Resin Transfer Moulding)

Při této technologii se používá uzavřená forma, ve které se při použití VE a UP pryskyřic neuvolňuje do okolního prostoru reaktivní rozpouštědlo. Pomocí nízkotlakých čerpadel se ohřáté tvrdilo spolu s pryskyřicí dopravují do směšovací hlavy před vstřikem směsi do ocelové či hliníkové formy.

Výhodou technologie RTM je vyrobení vzhledových povrchů výrobku z obou stran (hladké). Rozměrově je výrobek přesný a je zde možnost využít programy pro simulaci toku pryskyřice. Nevýhodou je ekonomická náročnost formy – musí být odolná vůči vnitřním

vstřikovacím tlakům. Vyrábí se spíše menší komponenty. Pokud se nastaví špatný vstřik pryskyřice do formy, je výrobek označen jako zmetek a vzniká odpad.

RTM technologie se využívá pro výrobu komponentů do letadel, automobilů nebo vlaků [3].



Obrázek 20: RTM technologie [3]

3.7 VARTM – Vysokotlaké vstřikování za pomoci vakua (Vacuum Assisted Resin Transfer Moulding)

V technologii VARTM se využívá nízkoviskozní pryskyřice. Míchají se většinou s reaktivním ředidlem. Tato vzniklá směs teče do dvoudílné formy, ve které je tzv. preform (předtvarovaná výztuž). Pryskyřice je do formy dopravená vstříknutím i podtlakem. Lze použít i jednodílnou formu, kde je druhá strana tvořena fólií nebo filmem, případně vakem.

Výhodou technologie VARTM jsou nižší náklady na formu, lze vyrobit komponenty větších rozměrů. Standardní formy můžou být upraveny pro tuto technologii. Lze vyrobit sendvičové panely v jedné operaci. Nevýhodou je použití nízkoviskozní pryskyřice, která snižuje mechanické vlastnosti kompozitu. Stejně jako u RTM technologie vzniká odpad při špatně dostříknuté pryskyřici do formy [3].

Tato technologie se využívá u stavby jacht, u panelů vlaků, kamionů nebo autobusů.

3.8 Speciální zařízení – autokláv

Autokláv se používá u velkorozměrných konstrukcí. Jde o nejnákladnější a nejsložitější technologii pro sériovou výrobu. Základním materiálem jsou vždy prepregy, které vyžadují vytvrzování při zvýšených teplotách. Vrstvy kompozitu jsou stejná jako při lisování vakuem. Forma je pokrytá pružnou fólií nebo plachtou a poté se umístí do vyhřívaného autoklávu. Nejprve se provede evakuace podtlakem o hodnotě cca. 0.7 bar a poté se autokláv natlakuje na cca 6 bar. Obsah výztuže tvoří přes 60 % výsledného kompozitu.

Po ohřátí autoklávu na teplotu 120°C – 200 °C nastává vytvrzování pryskyřice. Vznikem přetlaku v autoklávu se více přitlačí vrstvy prepregů k sobě a obsah pryskyřice je minimální. Přetlak je v řádech desetin MPa.

Autoklávem lze dosáhnout vysokého obsahu výztuže. Lze jednoduše a přesně určit obsah pryskyřice. Dále jsou minimalizovány náklady na tkaniny použitím jednosměrných tkanin. Tato technologie je šetrná k zdraví obsluhy. Lze ovlivnit mechanické a tepelné vlastnosti pryskyřice úpravou chemického složení. Autokláv lze použít pro automatizaci výroby.

Bohužel je autokláv ekonomicky méně výhodný – nákladnější materiály, drahá údržba a opravy. Autokláv je pomalý na provoz, má jasně dané vnitřní rozměry (omezené rozměry výrobků).

Technologie se nejčastěji využívá u konstrukčních prvků letadel. V F1 – speciální komponenty závodních monopostů. Dále lze vyrábět sportovní potřeby – lyže, tenisové rakety, atd [8, 16].



Obrázek 21: Autokláv [34]

4 TECHNOLOGIE VÝROBY SENDVIČOVÝCH KONSTRUKCÍ

Ke správné volbě výrobní technologie sendvičové konstrukce je určena charakteristikou výrobku. Musíme znát velikost a členitost výrobku, sériovost dílce, kvalitu povrchu a mechanické požadavky na výrobek (pevnost a tuhost). Dále je důležité zohlednit ekonomické hledisko na výrobu daného dílu.

Známe celkem tři druhy výrobních metod sendvičových struktur: Autokláv, vakuové vytvrzování a lisování [1].

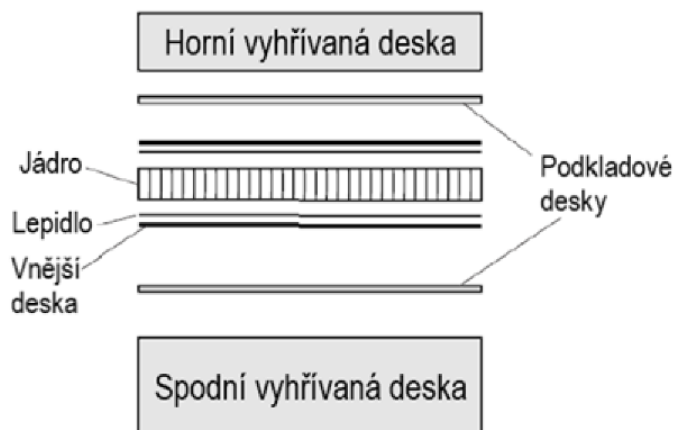
4.1 Vakuové vytvrzování

Tato metoda je vhodná pro rozměrné sendvičové konstrukce. Využívá podtlaku ke spojení všech vrstev sendvičových materiálů během vytvrzování. Celá konstrukce je vzduchotěsně uzavřena mezi vakem a formou. Pomocí vakuové pumpy vysajeme všechnen vzduch z vaku i zachycený vzduch mezi vrstvami sendvičové struktury. Tím pádem se zvýší tlakové síly, které stlačí vrstvy sendvičové konstrukce k sobě. Díky tomu je zabráněno posunutí vláken ve vrstvách a jsou také zpevněny. Po vytvrzení jsou zefektivněny přenosy sil mezi vlákny. Tlakem v okolí je zredukován tlak uvnitř vaku a je krásně rozložen po celé ploše sendvičové konstrukce. Mechanicky bychom takového výsledku vůbec nedosáhli. Výrobek se po vytvrzení vytáhne z formy [1, 16].

4.2 Vyhřívané lisování

Pomocí vyhřívaného lisování se vyrobí sendvičová struktura vložením „sestavy“ mezi podkladové desky a následně se zalisuje. Sestava, která se vkládá do lisu se skládá z dvou vnějších desek, voštinového jádra a dvou vrstev foliového lepidla. Vnější vrstvy sendvičové struktury mohou být prepregy nebo desky vyrobené z kovu. Zalisování pak probíhá na vyhřívaném lisu z důvodu, aby se rozpustilo lepidlo a ze sestavy se stala sendvičová struktura.

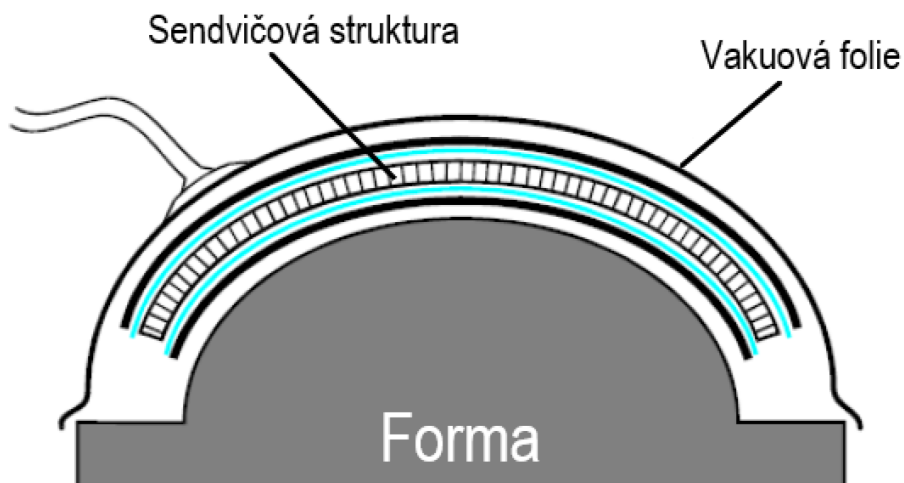
Dále mezi vyhřívané lisování zařazujeme i formování v uzavřené formě. Tuto metodu aplikujeme u sendvičových struktur, ve kterých je potřeba dosáhnout vysokých přesností a dobré povrchové úpravy. V tomto případě lze dosáhnout tlaku a tepla několika způsoby. Nejčastějším způsobem je použití vyhřívaných nástrojů s vnějším mechanickým tlakem nebo nevyhřívaných nástrojů. Lze také provést formování za pokojové teploty, pokud je sendvičová struktura větších rozměrů než topné zařízení [23].



Obrázek 22: Vyhřívané lisování [23]

4.3 Vytvrzování v peci

Stejně jako u lisování potřebujeme vytvořit sendvičovou sestavu ještě před vložením do vakuové pece. Tato sestava se vloží do formy, která má tvar potřebný pro budoucí sendvičovou strukturu. Poté se překryje vakuovou fólií. Takto připravená forma se umístí do vyhřívané pece, kde se vytvrdí. Tato technologie se používá pro vnější vrstvy z prepregu nebo kovových desek a vnitřní vrstvy z voštinového jádra nebo z pěny [16].

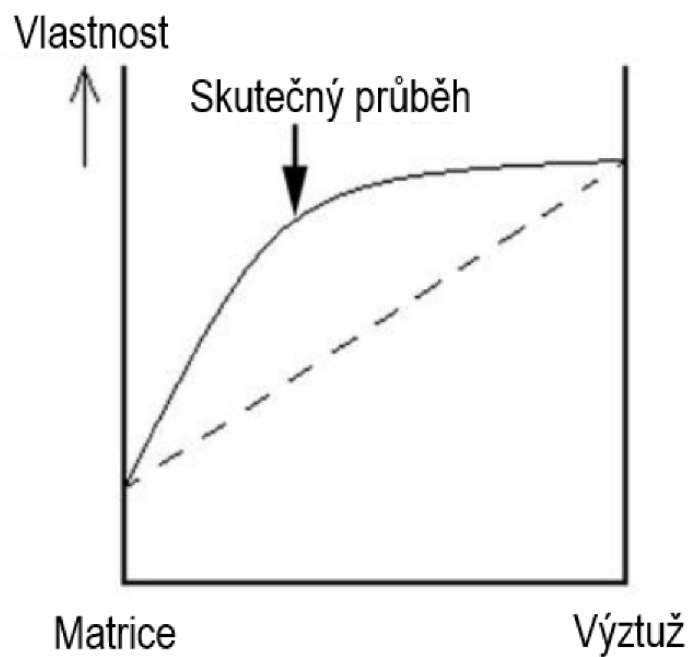


Obrázek 23: Vytvrzování v peci [16]

5 SYNERGICKÝ EFEKT

Synergický efekt se projevuje u kompozitních materiálů, u nichž po sloučení materiálů s odlišnými vlastnostmi vznikne jediná struktura. Pokud se vlastnosti jednotlivých materiálů doplňují, vzniká tak kompozitní materiál s přídavnými nebo lepšími vlastnostmi než mají jednotlivé materiály odděleně.

Klasickým příkladem synergického efektu je kompozit, který se skládá z keramické matrice, která je vyztužena keramickými vlákny. Keramická matrice nebo vlákna jsou samostatně velmi křehké. Po smíchání vznikne kompozit, který je charakteristický mírou houževnatosti nebo-li odolností proti náhlému křehkému porušení. Synergický efekt je velmi důležitý, protože díky němu vznikají materiály se zcela novými materiály [29].



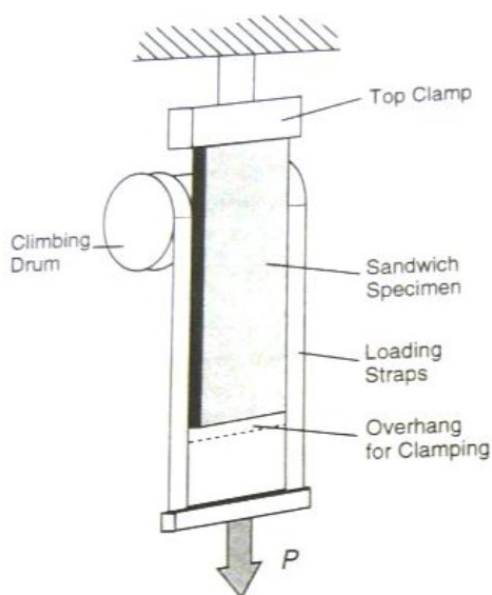
Obrázek 24: Graf synergického efektu

6 PEEL TEST

Tento test se používá ke zjištění odolnosti lepených spojů mezi vnější vrstvou a jádrem sendvičové struktury. Používají se dva způsoby testování. Jeden způsob, Climbing drum, se používá v případech, kdy vnější vrstvy jsou tenké. Kroutící moment odlupování se vypočítává ze sil potřebné k oddělení jádra a vnější plochy a z ohybu vnější plochy. Druhý způsob peel testu je test DCB. Je podobný prvnímu způsobu. Třetí způsob testu je s využitím stlačeného vzduchu k delaminaci vnější vrstvy od jádra. Dva poslední způsoby testů již nevyžadují tenké vnější vrstvy [16].

6.1 Climbing drum peel test

Climbing drum peel test vyžaduje minimální rozměry vzorku o šířce minimálně 76mm a délce minimálně 305 mm. Délka je včetně přesahu vnější vrstvy 25 mm na každém konci. Podoba testu je vyobrazena na obrázku níže [16].



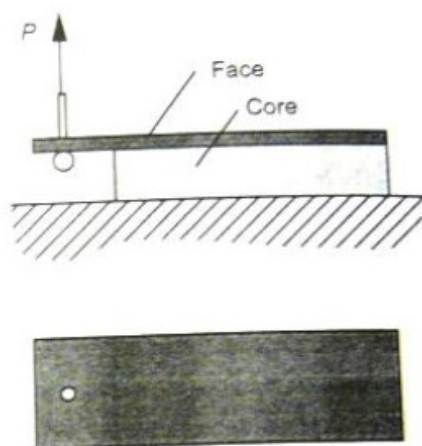
Obrázek 25: Climbing drum peel test [16]

Postup testování

Vložíme sendvičový panel. Vnější plocha se na spodním konci upne k bubnu a horní konec se upne do kleštiny. Panel se zatíží tahem při konstantní rychlosti a ze zkoušeného panelu se stanoví odolnost proti odlupování v délce alespoň 150 mm. Výpočet odlupovacího momentu se vypočítá dle vzorce:

6.2 DCB-Type peel test

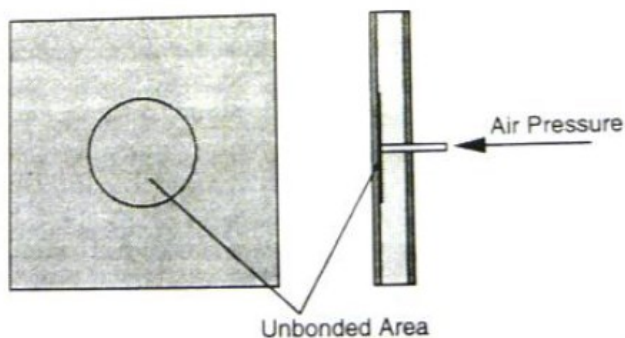
Pomocí frézky vyfrézujeme jádro testovacího vzorku, aby vznikl převis vnější vrstvy. Takto upravený vzorek upneme jádrem směrem dolů. U této metody nerozhoduje tloušťka jádra. Do vnější vrstvy se udělá díra, kterou se provleče tyčka, která je na konci rozšířená, aby nedošlo k volnému průchodu dírou. Poté se za tyčku začne tahat směrem od jádra a sleduje se jakou je potřeba vyvinout sílu, aby došlo k odtrhu vnější vrstvy od jádra [16].



Obrázek 26: DCB-Type peel test [16]

6.3 Peel test stlačeným vzduchem

Tento test je prováděn na vzorku s kruhovou počáteční delaminací ve středu panelu. Na jádru je již vytvořena teflonová vrstva, která vytváří počáteční delaminaci. K této vrstvě je přivedena trubička, díky které se dovnitř sendvičového panelu přivede stlačený vzduch. Tlak vzduchu je řízen pomocí redukčního ventilu. Hodnota tlaku se zaznamenává v okamžiku, kdy dojde odlupování jádra od vnější vrstvy [16].



Obrázek 27: Peel test stlačeným vzduchem [16]

7 TECHNOLOGIE LEPENÝCH SPOJŮ

Při výběru vhodného lepicího systému je potřeba zvážit mnoho faktorů. Mezi ně patří plánované mechanické zatížení lepené spáry, výrobní postup, znalost spojovaných materiálů atd.

7.1 Typy lepených materiálů

Důležitá je znalost lepených podkladů. Důležité informace jsou: povrchové napětí a smáčivost, moduly pružnosti a smykový, tepelná roztažnost a hlavně o jaké materiály se jedná atd.

Dobrá adheze je zaručena dostačujícím smáčením substrátu lepidla. Smáčivost znamená, že lepidlo je schopno roztéct do určité míry po povrchu. Pokud se lepidlo dostane k materiálu na atomovou vzdálenost $< 1\text{mm}$, je adheze dostatečná.

Dobré předpoklady smáčivosti jsou především způsobeny dostatečně suchým a čistým povrchem materiálu, na kterém má lepidlo působit. Dalším předpokladem je nízká viskozita použitého lepidla. Také je důležité vyšší napětí materiálu než lepidla [14].

7.2 Typy lepidel

Základním rozdělením lepidel je dle chemického hlediska na organická (glutinová, kaseinová, škrobová, dextrinová lepidla) a anorganická (vodní sklo, asfaltová, škrobová, silikátová, metalická, keramická lepidla). Hojně se v technických oborech používají lepidla organická [14].

7.3 Pevnost lepeného spoje

Pevnost lepeného spoje se dělí do tří základních skupin a to do strukturálních, nestrukturálních a tlakocitlivých lepidel.

Do strukturálních lepidel patří zejména reaktivní lepidla, která vytváří nerozebíratelný spoj na bázi chemické reakce. Jsou to např.: Epoxidová lepidla, uretanová lepidla nebo akrylátová lepidla.

Do nestrukturálních lepidel řadíme tekutá nereaktivní lepidla, která vytváří spoj na principu tečení a vytváření tzv. adhezních sil. Do této skupiny řadím lepidla disperzní, kontaktní nebo tavná [14].

Poslední skupinou jsou tlakocitlivá lepidla. Jsou to viskoelastická samolepící lepidla. Nejznámějším zástupcem těchto lepidel jsou lepicí pásy nebo PSA lepidla.

7.4 Okolní vlivy působící na lepený spoj

Lepený spoj je vystaven mnoha vnějším vlivům, například teplotě, vlhkosti a různým jiným médiím, UV záření apod. Spára stárne rychleji, pokud je prostředí okolo spoje agresivnější.

Vlastnosti lepidla nebo lepených materiálů může dost ovlivnit přítomnost různých chemických látek. Třeba plasty měknou často působením organických rozpouštědel, pryže (těsnění) špatně odolávají olejům nebo materiály, které obsahují aditiva se mohou za zvýšených teplot přesunout z podkladu do lepidla.

Aby se těmto nešvarům zabránilo, existuje mnoho obsáhlých systémů laboratorních zkoušek, kterými se dá díky simulaci předejít. Bohužel laboratorní testy nejsou schopné plně zastoupit reálné zatížení, proto nejsou absolutně spolehlivé [14].

8 PORUCHY SENDVIČOVÝCH STRUKTUR

U sendvičové struktury je důležité znát všechna možná maxima a potenciál. Spolehlivost sendviče se sleduje celou dobu jak při využívání, tak i při výrobě. Vadou se myslí jakákoliv porucha, která zabraňuje plné využívání sendviče [13].

8.1 Vady s vlivem na životnost

Poruchy vznikají již při výrobě nebo až při používání sendviče. Mezi nejčastější vady, které ovlivňují výslednou životnost patří neslepené plochy, delaminace, nerovnoměrně nanesená pryskyřice nebo bubliny [13].

8.1.1 Delaminace

Vlivem nedostatečné vrstvy lepidla (adheze) dojde k porušení soudržnosti dvou sousedících vrstev sendvičové struktury. Je to způsobeno například nedostatkem pojiva, rychlostí ochlazování nebo teplotou tváření [13].

8.1.2 Vzduchové bubliny

Vzduchové bubliny vznikají ve špatně smíchané výztuži nebo nedostatečným tlakem při lisování vnějších vrstev sendviče. Dále mohou bubliny vznikat v jádru, například v polymerních pěnách. Velikost bubliny mohou mít velikost jen několik mikrometrů, ale také i několik mm [13].

8.1.3 Neslepené plochy

Neslepené plochy vznikají tam, kde je nedostatek lepidla (pojiva). Neslepené plochy mohou také vznikat ve vnějších vrstvách sendviče, kde dojde k přesycení výztuže z jiné vrstvy [13].

8.1.4 Trhliny

Trhliny mohou být různě orientované. Vznikají na povrchu i uvnitř sendviče. Dochází k narušení soudržnosti materiálu a k následnému oslabení mechanických vlastností sendviče. Trhliny vznikají díky teplotnímu pnutí nebo třeba nárazy při provozu, či vysokému náporu vzduchu [13].

8.2 Vady sendvičových konstrukcí

Vlivem únavy, zatěžování nebo působením okolních podmínek (působení vlhkosti) dochází k deformacím sendvičové struktury. Delaminace se na sendviči projeví zobrazením mapy na povrchu jádra. Tato vada je způsobena špatnou přípravou jádra (špatné odmaštění) a malým tlakem během výroby sendviče [31].

8.2.1 Zlomení sendviče

Sendvič by měl být komplexně schopný odolávat smykovým, tlakovým a tahovým napětím. Adhezní vrstva musí zaručit přenos zatížení na jádra [31].

8.2.2 Zvlnění sendviče

Kvůli malému modulu průřezu ve smyku v porovnání se zatěžující silou dochází ke zvlnění sendviče. Vnější vrstvy se zvlíní a jádro mírně zdeformuje [31].

8.2.3 Lokální stlačení

Pokud dochází ke ztrátě stability a propadu sendviče dochází kvůli tomu, že jádro neodolá zvýšené tlakové tuhosti. Může se také stát, že dojde k odlepení vnější vrstvy v místě propadeného jádra [31].

8.2.4 Delaminace a zborcení jádra

Sendvičová struktura nedokáže odrazit jakoukoliv vytvořenou tlakovou sílu z vnějšku. A proto dochází ke zborcení jádra. Delaminace se projeví zobrazením mapy po celé šíři sendviče [31].

9 ZKOUŠKY SENDVIČOVÝCH MATERIÁLŮ

O vhodném použití sendvičové struktury v praxi rozhodují mechanické vlastnosti dané kombinace materiálů. Tímto se podmiňuje vhodnost pro určité funkce sendviče. Zlepšování mechanických vlastností konstrukčních materiálů je motivované jejich vhodným využitím při výrobě strojů a zařízení.

Mechanické zkoušky lze rozdělit do několika skupin – záleží na působení síly na testovací těleso. Máme dva druhy zkoušek: statické a dynamické.

- Zkoušky statické – za zvýšených teplot
- Za snížených teplot
- Za normálních teplot
- Zkoušky dynamické – cyklické
- Rázové

Měřením mechanických vlastností můžeme sledovat chování sendviče. Poté takto získaná data předáme konstruktérovi, který může vyhodnotit případné úpravy sendviče, pokud budou nedostatečné. Dále se dají mechanické vlastnosti využít jako důkaz kvality materiálu a názorná ukázka zákazníkovi, jak to funguje a odolává vůči různým vlivům. Tudíž se dají použít i pro výstupní kontrolu a přejímku materiálů. Nebo se dají využít k výzkumu materiálů, které usilují o konkrétní mechanické chování a vlastnosti [9].

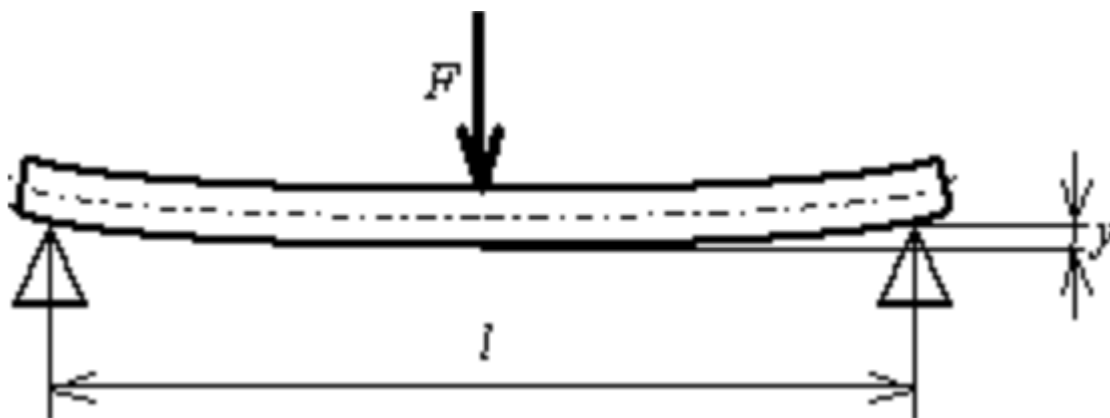
9.1 Zkouška ohybem

Zkouška ohybem patří do statických zkoušek a provádí se za normálních pokojových teplot nebo i za mírně zvýšených teplot.

Ohybový moment vzniklý od příčnicku způsobí, že v horních vláknech průřezu působí tlak a ve spodních vláknech působí tah. Pokud má materiál stejné vlastnosti v tahu i v tlaku, znamená to, že je průřez symetrický a jeho neutrální vrstva je v ose testovaného tělesa. Když nemá materiál stejné vlastnosti v tahu a v tlaku, posunuje se neutrální osa směrem k tužší straně, ve které je během namáhání vyšší pevnost.

Zkouška ohybem má menší význam u houževnatých materiálů než ostatní mechanické zkoušky, protože tělesa se zdeformují, i když nejsou stanoveny výsledné pevnosti. I přesto nedojde k lomu. Zkouška ohybem má význam pro křehké materiály, kde jde určit

deformační schopnost, což při zkoušce tahem není tak úplně možné, protože se napětím vyvolává pouze nepatrné a těžko změřitelné prodloužení [9,10].



Obrázek 28: Zkouška třibodovým ohybem [10]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

10 CÍL PRAKTICKÉ ČÁSTI BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Cílem praktické části bakalářské práce je zjistit pomocí programu CES Selector 2012, který sendvičový prvek je nejvhodnější pro výrobu spoileru automobilu. Při dimenzování sendvičových prvků je kladen důraz na co nejvyšší mechanické vlastnosti (Youngův modul) při zachování co nejnižší hmotnosti (hustoty) s ohledem na co nejnižší výslednou cenu (C_m).

Hlavní body pro dosažení stanovených cílů práce:

- Pomocí materiálové databáze CES EduPack navrhnete a optimalizujete mechanické vlastnosti sendvičového panelu jako přítláčného spojleru automobilu
- Dosažené výsledky simulace v CES diskutujte pomocí tabulek, grafů a výpočtů
- Závěrem se při optimalizaci zaměřte na ohybovou tuhost, průhyb a cenu

11 SOFTWARE CES EDUPACK 2012

Software CES EduPack 2012 je jeden z nejrozšířenějších světových výukových programů. Vydavatelem je společnost Granta. Obsahuje zdroj informací o materiálech, které se využívají například ve strojírenství, leteckém a automobilovém průmysle, designu nebo ve vědě. Nabízí komplexní informační databázi nástrojů, procesů a především materiálů. Specializovaná verze software je určena i pro speciální použití v bakalářském či magisterském studiu.

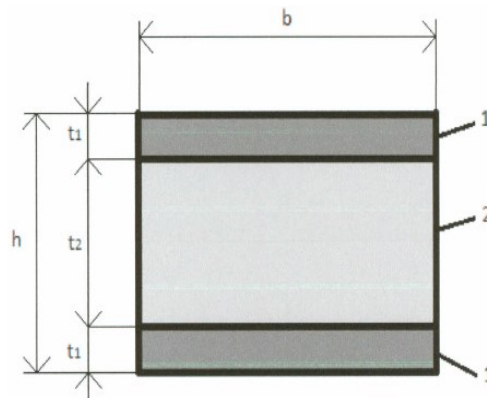
V této práci je software použit hlavně pro simulaci sendvičových prvků pomocí doplňku Synthesizer (Sandwich Panels). Software nabízí jednoduché vyhodnocení mechanických vlastností, které se hodí pro spoiler automobilu, surfovací prkno nebo pro úložné prostory v prostorách kabin letadel.

12 GEOMETRIE SENDVIČOVÉHO PANELU

S využitím nástroje „Synthesizer (Sandwich Panels)“ jsem vytvořil sendvičové profily z vybraných materiálů:

Vybral jsem si model zatížení pevně vetknutého nosníku se silou působící ve středu geometrie a roztečí 1,8m („span“ pro CES EduPack).

- S tloušťkou jádra (t_2) 5 a 10 mm (pro CES EduPack).
- S tloušťkou vnější vrstvy (t_1) 1 a 4 mm (pro CES EduPack).
- Uvažovaná šířka spoileru (b) je pak 70 mm (Obr. 29), pro výpočet K_0 .



Obrázek 29: Schéma sendvičového prvku

13 VYBRANÉ MATERIÁLY Z CES EDUPACK

Tyto materiály jsem nasimuloval pomocí doplňku „Synthesizer (Sandwich Panels)“, jež je součástí CES EduPack 2012. Při dimenzování těchto kompozitů jsem se zaměřil na výběr materiálů s co nejvyššími mechanickými vlastnostmi (např. Youngův modul) při zachování co nejnižší hmotnosti (charakterizované hustotou), které jsou pro tuto aplikaci klíčové.

1. S využitím databáze CES EduPack 2012 jsem vybral v rámci „Hybrids: composites, foam, honeycombs:
 - 2 materiály ze skupiny pěn a voštinových materiálů s relativně nízkou hustotou jako jádro sendvičového profilu (PUR, Al voština)
 - 2 materiály ze skupiny polymerních kompozitů s relativně vysokým Youngovým modulem jako vnější vrstvu sendvičového profilu (Epoxy/S-glass (0° lamina), kompozit uhlíková matrice/uhlíkové plnivo (ozn. Carbon/Carbon ve zkratce C/C)

Typ	Umístění v sendviči
Epoxy/S-glass fiber	Vnější vrstvy
C/C	Vnější vrstvy
Honeycomb Al 5052 (0,05)	Jádro
PUR foam	Jádro

Tabulka 1: Seznam použitých materiálů

2. Nasyntetizované sendvičové profily jsem poté charakterizoval (hodnoty tabelizoval) a graficky vyhodnotil v závislosti:
 - Youngův modul vs. hustota. (Young's modulus vs density)
 - Youngův modul vs. cena/kg. (Young's modulus vs price)
 - Ohybový modul vs hustota (Flexural modulus vs density)
 - Ohybový modul (osa y prázdná) (Flexural modulus)

3. Vliv změny tloušťky kompozitní laminy (t_1) a tloušťky jádra (t_2) na ohybovou tuhost.

Sílu potřebnou k přetržení jsem dopočítal podle vztahu (4) a dosažené hodnoty lze vidět v tabulkách níže.

Celkový průhyb nosníku jsem vyhodnotil podle rovnice (5) a dosažené hodnoty jsou shrnuty v tabulkách níže.

4. Podle CES Selector jsem dopočítal optimální index $f=2t_1/h$, a zaměřil jsem se na výběr materiálu s co nejnižší hodnotou hustoty. Dosažené výsledky jsem diskutoval a vyhodil závěr.

14 DOSAŽENÉ VÝSLEDKY A DISKUZE

14.1 Vzorek č. 1

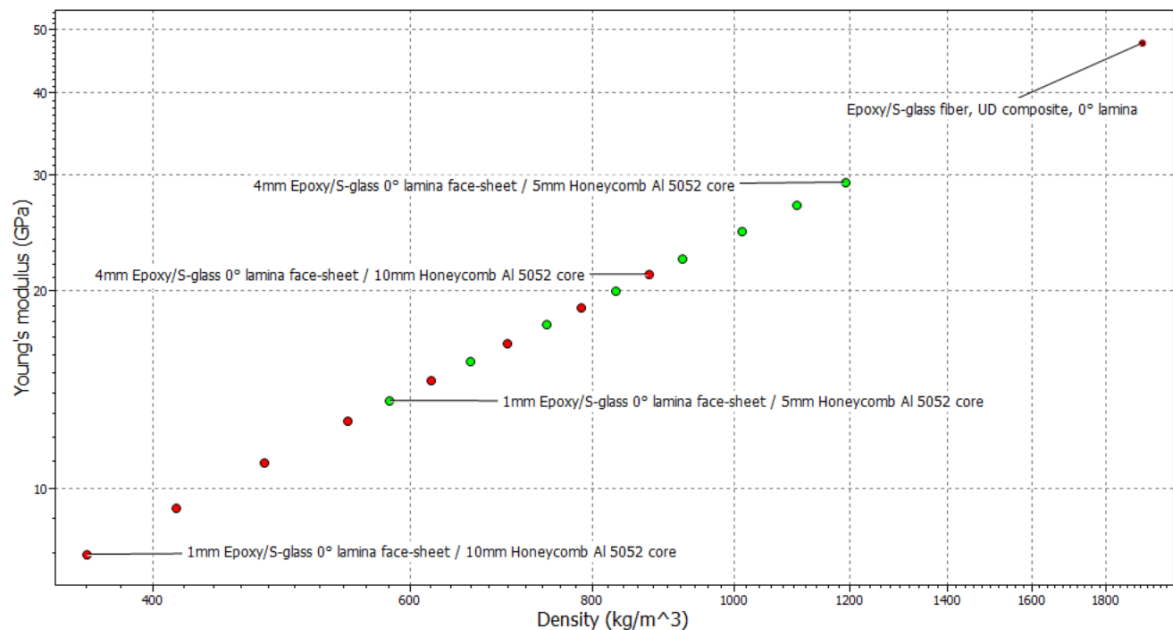
Volba materiálů

Jako materiál vnějších vrstev jsem zvolil Epoxy/S-glass fiber (0° lamina). Jádro sendvičového prvku jsem zvolil hliníkovou voštinu s označením Honeycomb Al 5052 (0.05mm).

TYP
Al 5052 Honeycomb (0.05) 7 a 18mm
Epoxy/S-glass fiber 0° lamina 7 a 18 mm
Epoxy/S-glass fiber 1mm + Al 5052 5mm
Epoxy/S-glass fiber 4mm + Al 5052 5mm
Epoxy/S-glass fiber 1mm + Al 5052 10mm
Epoxy/S-glass fiber 4mm + Al 5052 10mm

Tabulka 2: Vybrané a připravené materiály

Grafické vyhodnocení a charakterizace syntetizovaných sendvičových profilů

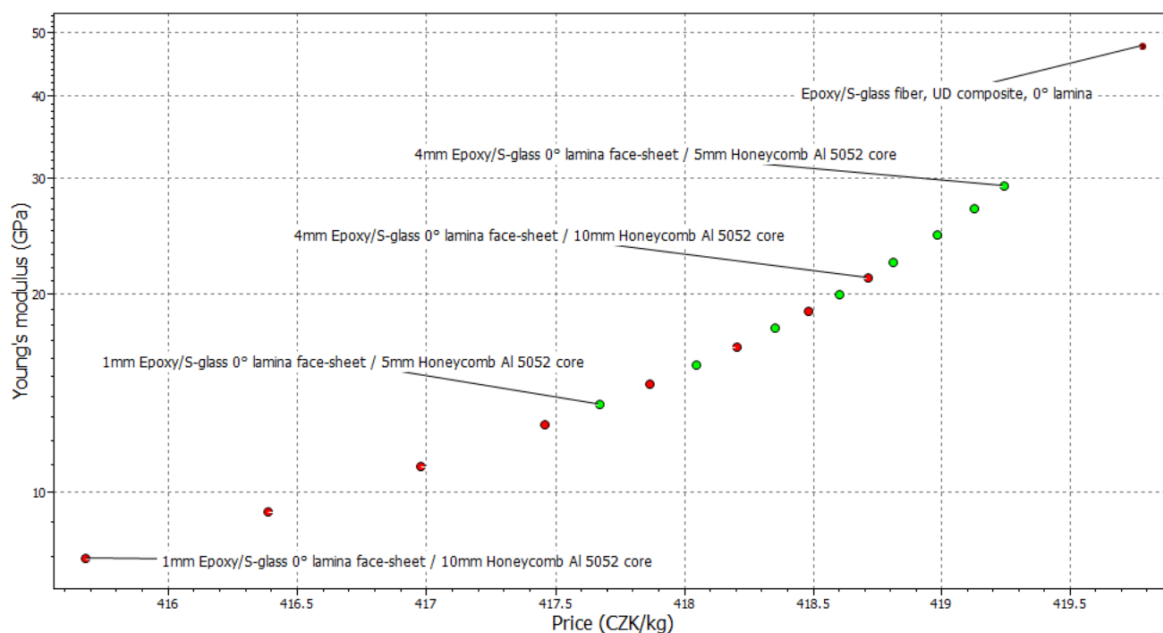


Graf 1: Závislost Youngova modulu na hustotě

Na Grafu 1 vidíme, že s rostoucí tloušťkou vnější vrstvy (1-4 mm), hodnota Youngova modulu vzrůstá až do hodnoty 21,2 GPa při tloušťce jádra 10 mm. V případě že, tloušťku jádra snížíme na 5 mm, tak hodnota Youngova modulu vzroste až na hodnotu 29,4 GPa.

TYP	Hustota [kg/m ³]	Youngův modul [GPa]
Aluminum 5052 Honeycomb (0.05) 5 a 10 mm	51,1	$7,25 \cdot 10^{-4}$
Epoxy/S-glass fiber 0° lamina 1 a 4 mm	1900	47,7
Epoxy/S-glass fiber 1mm + Al 5052 5mm	581	13,6
Epoxy/S-glass fiber 4mm + Al 5052 5mm	1190	29,4
Epoxy/S-glass fiber 1mm + Al 5052 10mm	360	7,95
Epoxy/S-glass fiber 4mm + Al 5052 10mm	875	21,2

Tabulka 3: Vybrané a připravené materiály, jejich Youngův modul a hustota

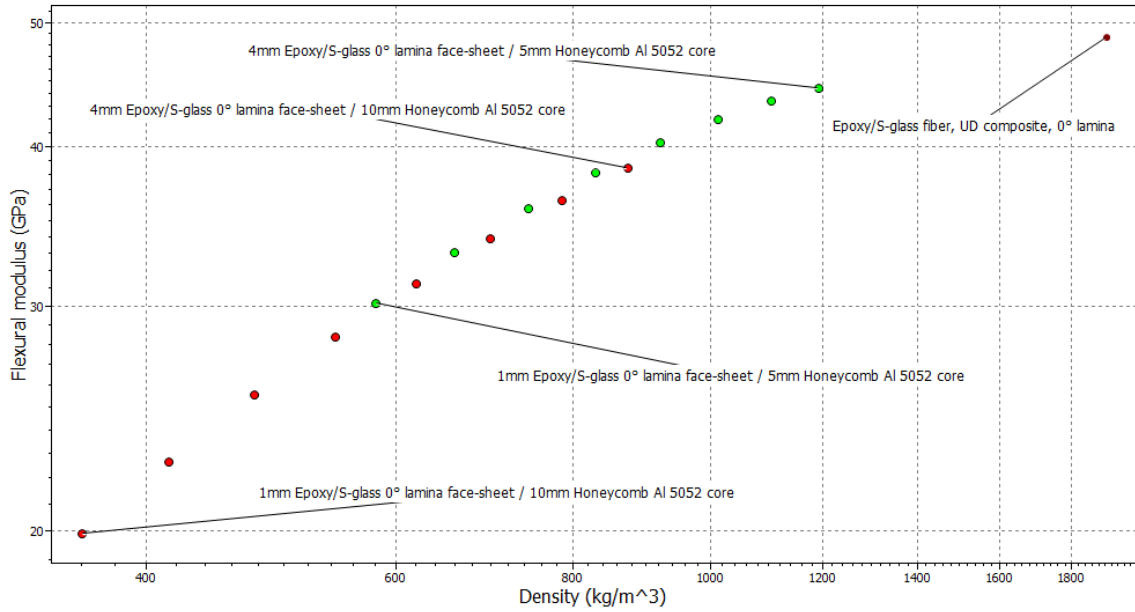


Graf 2: Závislost Youngova modulu na ceně

Graf 2 nám znázorňuje poměr mezi Youngovým modulem a cenou. Jakákoliv konfigurace sendvičového prvku nemá zásadní vliv na cenu. Nejlevnější stojí 416 Kč/kg, nejdražší 419 Kč/kg a čistý kompozit stojí 420 Kč/kg. Je to nepatrný rozdíl.

TYP	Cena [Kč/kg]	Youngův modul [GPa]
Aluminum 5052 Honeycomb (0.05) 5 a 10 mm	366	$7,25 \cdot 10^{-4}$
Epoxy/S-glass fiber 0° lamina 1 a 4 mm	420	47,7
Epoxy/S-glass fiber 1mm + Al 5052 5mm	418	13,6
Epoxy/S-glass fiber 4mm + Al 5052 5mm	419	29,4
Epoxy/S-glass fiber 1mm + Al 5052 10mm	416	7,95
Epoxy/S-glass fiber 4mm + Al 5052 10mm	419	21,2

Tabulka 4: Vybrané a připravené materiály, jejich Youngův modul a cena za kg

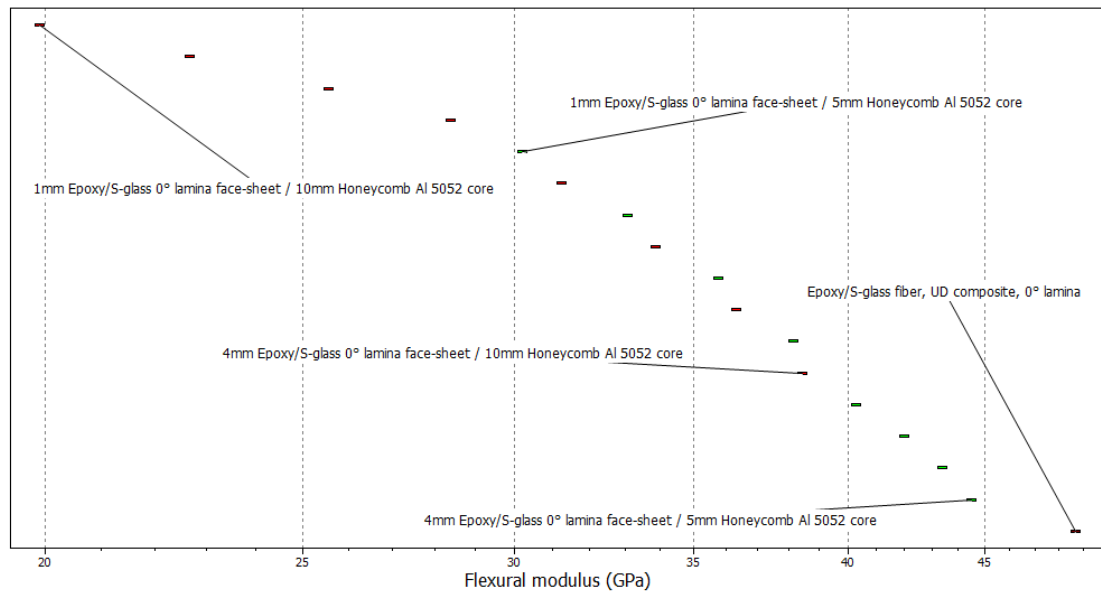


Graf 3: Závislost ohybového modulu na hustotě

Graf 3 znázorňuje poměr mezi ohybovým modulem a hustotou. Se zvyšujícím se ohybovým modulem roste současně i hustota. Opět je vidět, že velký vliv má tloušťka vnější vrstvy. Jádro s tloušťkou 10 mm a kompozitem s tloušťkou 1 mm má hodnotu 19,9 GPa. V případě kombinace jádra s tloušťkou 5 mm a kompozitem s tloušťkou 1 mm je hodnota 30,2 GPa.

TYP	Hustota [kg/m ³]	Ohybový modul [GPa]
Al 5052 Honeycomb (0.05)	51,1	7,25·10 ⁻⁴
Epoxy/S-glass fiber 0° lamina	1900	48,7
Epoxy/S-glass fiber 1mm + Al 5052 5mm	581	30,2
Epoxy/S-glass fiber 4mm + Al 5052 5mm	1190	44,5
Epoxy/S-glass fiber 1mm + Al 5052 10mm	360	19,9
Epoxy/S-glass fiber 4mm + Al 5052 10mm	875	38,5

Tabulka 5: Vybrané a připravené materiály, jejich ohybový modul a hustota



Graf 4: Ohybový modul

V grafu 4 vidíme ohybový modul sendvičových prvků a čistého kompozitu. Nejtužší sendvičový prvek s kombinací 4 mm kompozit a 5 mm jádro má hodnotu 44,5 GPa, což není daleko od čistého kompozitu s hodnotou 48,7 GPa.

Výpočet síly potřebné k přerušení

Podle vzorce (4) uvedeného v zadání a hodnot pevnosti získané z CES EduPack 2012 jsem spočítal sílu potřebnou k přetržení F_f syntetizovaných sendvičových prvků. V tab. 6 jsou uvedeny pro srovnání i síly potřebné k přerušení jednotlivých materiálů, které tvoří výsledné sendvičové prvky.

TYP	Celková tloušťka h [m]	Moment Z_p [m ³]	Yield strength [Pa]	Síla F_f [N]
Al 5052 Honeycomb (0.05)	$7 \cdot 10^{-3}$	$8,58 \cdot 10^{-7}$	$4,24 \cdot 10^4$	0,162
Al 5052 Honeycomb (0.05)	$1,8 \cdot 10^{-2}$	$5,67 \cdot 10^{-6}$	$4,24 \cdot 10^4$	1,068
Epoxy/S-glass fiber 0° lamina	$7 \cdot 10^{-3}$	$8,58 \cdot 10^{-7}$	$1,73 \cdot 10^9$	6593,222
Epoxy/S-glass fiber 0° lamina	$1,8 \cdot 10^{-2}$	$5,67 \cdot 10^{-6}$	$1,73 \cdot 10^9$	43596
Epoxy/S-glass fiber 1mm + Al 5052 5mm	$7 \cdot 10^{-3}$	$8,58 \cdot 10^{-7}$	$1,06 \cdot 10^7$	40,398
Epoxy/S-glass fiber 4mm + Al 5052 5mm	$1,3 \cdot 10^{-2}$	$2,96 \cdot 10^{-6}$	$1,57 \cdot 10^7$	206,368
Epoxy/S-glass fiber 1mm + Al 5052 10mm	$1,2 \cdot 10^{-2}$	$2,52 \cdot 10^{-6}$	$7,03 \cdot 10^6$	78,74
Epoxy/S-glass fiber 4mm + Al 5052 10mm	$1,8 \cdot 10^{-2}$	$5,67 \cdot 10^{-6}$	$1,38 \cdot 10^7$	347,76

Tabulka 6: Síla potřebná k přerušení F_f sendvičových prvků a čistých materiálů

Průhyb materiálu

Při výpočtu průhybu sendviče jsem vycházel z rovnice (5) a dosažené hodnoty jsou shrnuty v tab. 7.

Typ	Průhyb δ [m]
Al 5052 Honeycomb (0.05) 7 mm	0,4230
Al 5052 Honeycomb (0.05) 18mm	0,1645
Epoxy/S-glass fiber 0° lamina 7mm	0,1778
Epoxy/S-glass fiber 0° lamina 18mm	0,0692
Epoxy/S-glass fiber 1mm + Al 5052 5mm	0,0056
Epoxy/S-glass fiber 4mm + Al 5052 5mm	0,0021
Epoxy/S-glass fiber 1mm + Al 5052 10mm	0,0037
Epoxy/S-glass fiber 4mm + Al 5052 10mm	0,0018

Tabulka 7: Průhyb materiálu

Diskuze k vzorku č. 1

Při hodnocení Youngova modulu proti hustotě (Graf 1) sendvičových prvků lze vidět, že samostatná voština má nejnižší hustotu ($51,1 \text{ kg/m}^3$) a současně i nejnižší hodnotu Youngova modulu ($7,25 \cdot 10^{-4} \text{ GPa}$). Hustota je pro výrobu spojleru docela dobrá, ale kvůli nízkému Youngově modulu je nevhodný a mohl by se ve vyšších rychlostech automobilu začít deformovat nebo narušovat. Voština má také nejnižší sílu k přetržení F_f pouhých $0,162 \text{ N}$ v případě tloušťky 7 mm a $1,068 \text{ N}$ v případě 18 mm (Tabulka 6). Opakem je samostatný kompozit: Epoxy/S-glass 0° lamina. Tento kompozit má nejlepší hodnoty Youngova modulu – $47,7 \text{ GPa}$ a síly k přetržení $F_f = 4470,433 \text{ N}$ pro 7 mm ; $F_f = 29559,6 \text{ N}$ pro 18 mm . Bohužel má také největší hustotu – 1900 kg/m^3 , a proto se nehodí jako samostatný materiál pro výrobu spojleru z důvodu vysoké hmotnosti. Průhyb samostatného materiálu je $262,3 \text{ mm}$ ve variantě tloušťky vnější vrstvy 7 mm a 102 mm ve variantě 18 mm . A ze všech sendvičových prvků nasimulovaných ve vzorku 1 je nejvhodnější kombinace s vrstvami $t_1 = 4 \text{ mm}$ a jádrem $t_2 = 10 \text{ mm}$. Tento sendvič má hustotu $\rho = 875 \text{ kg/m}^3$, cenu 419 Kč/kg , nejvyšší sílu k přetržení $F_f = 347,76 \text{ N}$ a průhyb $\delta = 1,8 \text{ mm}$.

14.2 Vzorek č. 2

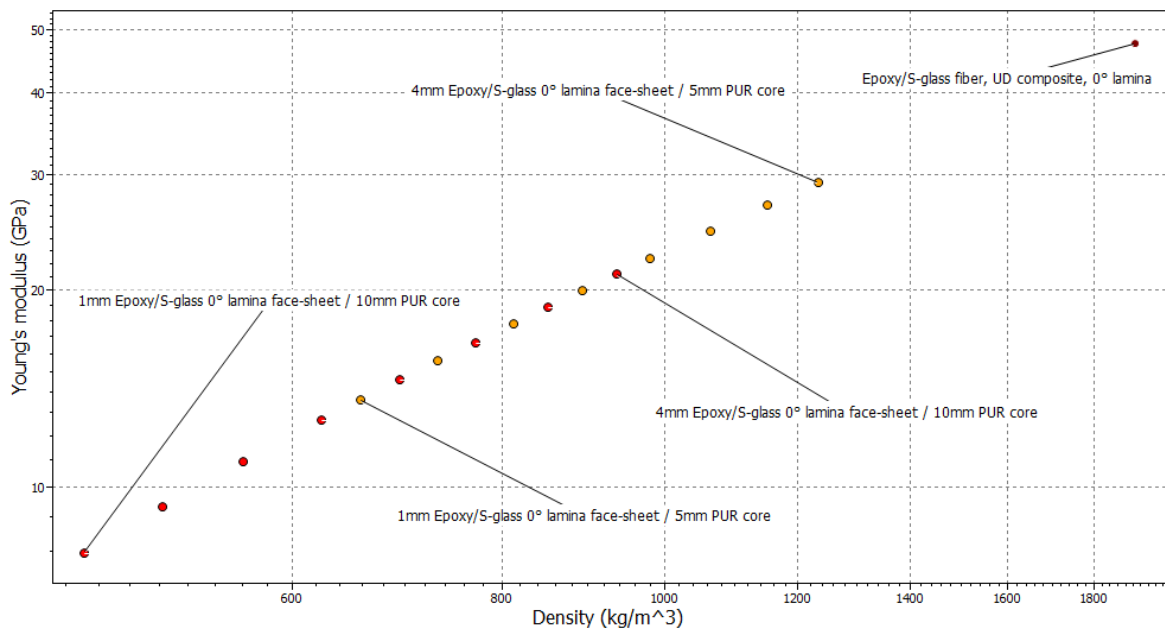
Volba materiálů

Vzorek č. 2 se sestává z vnějších vrstev z Epoxy/S-glass 0° lamina a jádra z PUR pěny (close cells 0,016, což je velikost dutin v pěně).

TYP
PUR foam 7 a 18 mm
Epoxy/S-glass fiber 0° lamina 7 a 18 mm
Epoxy/S-glass fiber 1mm + PUR foam 5 mm
Epoxy/S-glass fiber 4mm + PUR foam 5 mm
Epoxy/S-glass fiber 1mm + PUR foam 10mm
Epoxy/S-glass fiber 4mm + PUR foam 10mm

Tabulka 8: Vybrané a připravené materiály

Grafické vyhodnocení a charakterizace syntetizovaných sendvičových profilů

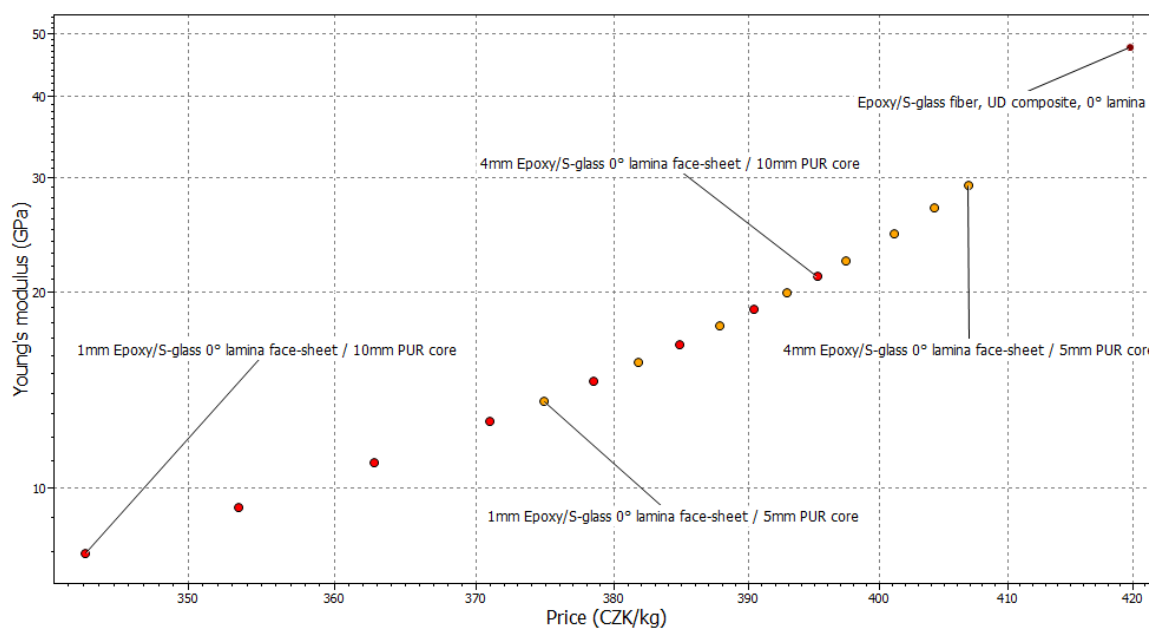


Graf 5: Závislost Youngova modulu na hustotě

Graf 5 nám ukazuje, že při použití jádra z pěny je konstantní nárůst hustoty i Youngova modulu. V případě použití jádra tloušťky 10 mm a vnější vrstvy (1-4 mm) dosahuje nejvyšší hodnoty Youngova modulu 21,2 GPa. V případě použití tloušťky 5 mm je nejvyšší hodnota 29,4 GPa.

TYP	Hustota [kg/m ³]	Youngův modul [GPa]
PUR foam 7 a 18 mm	160	9,95·10 ⁻⁴
Epoxy/S-glass fiber 0° lamina 7 a 18 mm	1900	47,7
Epoxy/S-glass fiber 1mm + PUR foam 5 mm	658	13,6
Epoxy/S-glass fiber 4mm + PUR foam 5 mm	1230	29,4
Epoxy/S-glass fiber 1mm + PUR foam 10mm	451	7,95
Epoxy/S-glass fiber 4mm + PUR foam 10mm	935	21,2

Tabulka 9: Vybrané a připravené materiály, jejich Youngův modul a hustota

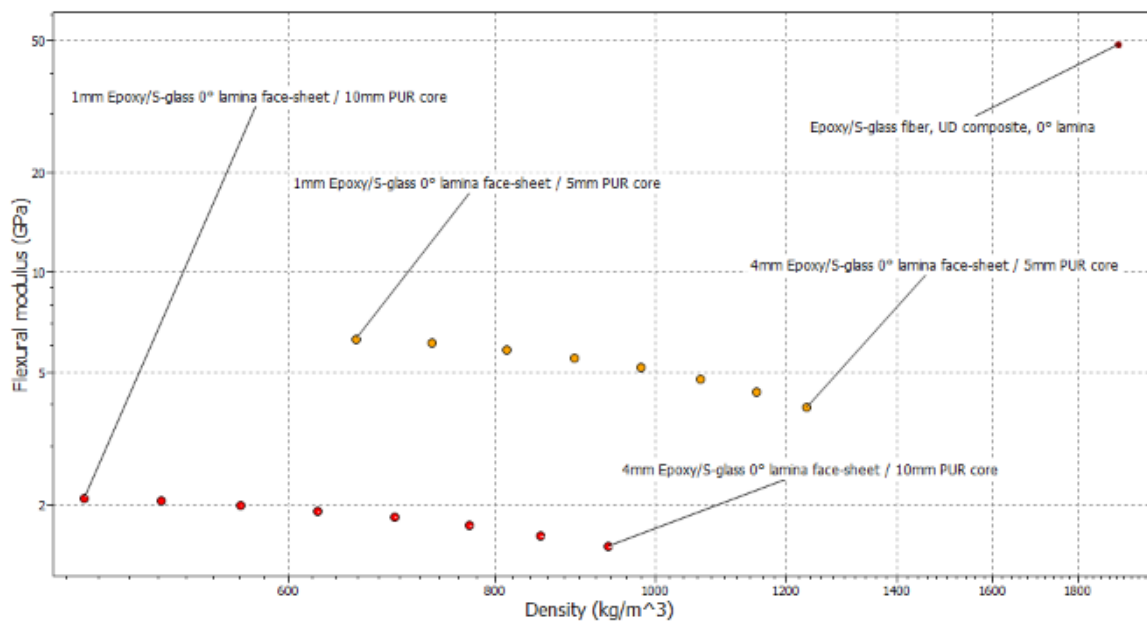


Graf 6: Závislost Youngova modulu na ceně

V Grafu 6 vidíme, že cena má větší rozptyl oproti vzorku 1. Nejlevnější stojí 343 Kč/kg a nejdražší 407 Kč/kg. Stále je to v řádech pouhých deseti korun.

TYP	Cena [Kč/kg]	Youngův modul [GPa]
PUR foam 7 a 18 mm	156	9,95·10 ⁻⁴
Epoxy/S-glass fiber 0° lamina 7 a 18 mm	420	47,7
Epoxy/S-glass fiber 1mm + PUR foam 5 mm	375	13,6
Epoxy/S-glass fiber 4mm + PUR foam 5 mm	407	29,4
Epoxy/S-glass fiber 1mm + PUR foam 10mm	343	7,95
Epoxy/S-glass fiber 4mm + PUR foam 10mm	395	21,2

Tabulka 10: Vybrané a připravené materiály, jejich Youngův modul a cena

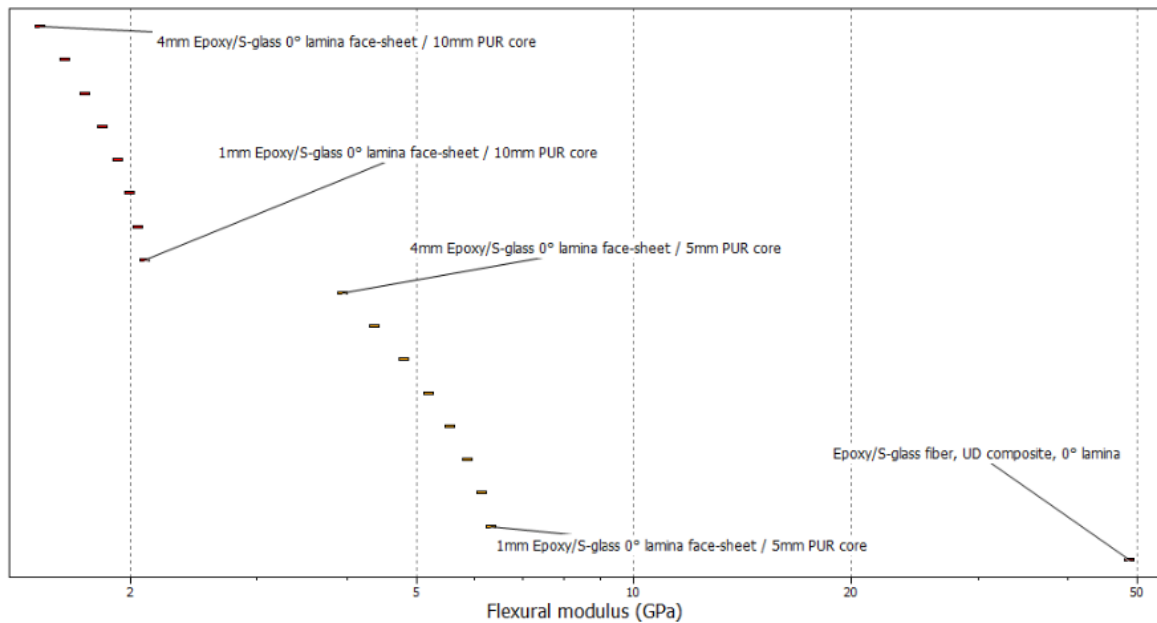


Graf 7: Závislost ohybového modulu na hustotě

Graf 7 nám ukazuje, že použití tenčího jádra zvyšuje hustotu, ale zároveň i ohybový modul.

TYP	Hustota [kg/m ³]	Ohybový modul [GPa]
PUR foam 7 a 18 mm	160	9,95·10 ⁻⁴
Epoxy/S-glass fiber 0° lamina 7 a 18 mm	1900	47,7
Epoxy/S-glass fiber 1mm + PUR foam 5 mm	658	6,33
Epoxy/S-glass fiber 4mm + PUR foam 5 mm	1230	3,94
Epoxy/S-glass fiber 1mm + PUR foam 10mm	451	2,09
Epoxy/S-glass fiber 4mm + PUR foam 10mm	935	1,5

Tabulka 11: Vybrané a připravené materiály, jejich hustota a ohybový modul



Graf 8: Ohybový modul

Graf 8 nám zobrazuje, že tloušťka jádra z PUR pěny má značný vliv na ohybový modul. Čím tenčí vrstva jádra, tím pevnější výsledný sendvičový prvek. Varianta s tloušťkou jádra 10 mm má ohybový modul 2,09 GPa – 1,5 GPa při tloušťkách vnějších vrstev 1 – 4 mm. Varianta s jádrem tloušťky 5 mm má rozsah ohybového modulu 6,33 GPa – 3,94 GPa pro stejné tloušťky vrstev.

Výpočet síly potřebné k přerušení

Podle vzorce (4) uvedeného v zadání a hodnot pevnosti získané ze software CES EduPack 2012 jsem spočítal sílu potřebnou k přetržení F_f syntetizovaných sendvičových prvků. V tab. 12 jsou uvedeny pro srovnání i síly potřebné k přerušení jednotlivých materiálů, které tvoří výsledné sendvičové prvky.

TYP	Celková tloušťka h [m]	Moment Z_p [m ³]	Yield strength [Pa]	Síla F_f [N]
PUR foam (7 mm)	$7,0 \cdot 10^{-3}$	$8,58 \cdot 10^{-7}$	$4,79 \cdot 10^4$	0,183
PUR foam (18 mm)	$1,8 \cdot 10^{-2}$	$5,67 \cdot 10^{-6}$	$4,79 \cdot 10^4$	1,207
Epoxy/S-glass fiber 0° lamina (7 mm)	$7,0 \cdot 10^{-3}$	$8,58 \cdot 10^{-7}$	$1,73 \cdot 10^9$	6593,222
Epoxy/S-glass fiber 0° lamina (18 mm)	$1,8 \cdot 10^{-2}$	$5,67 \cdot 10^{-6}$	$1,73 \cdot 10^9$	43596
Epoxy/S-glass fiber 1mm + PUR foam 5mm	$7,0 \cdot 10^{-3}$	$8,58 \cdot 10^{-7}$	$1,31 \cdot 10^7$	49,926
Epoxy/S-glass fiber 4mm + PUR foam 5mm	$1,3 \cdot 10^{-2}$	$2,96 \cdot 10^{-6}$	$1,94 \cdot 10^7$	255,002
Epoxy/S-glass fiber 1mm + PUR foam 10mm	$1,2 \cdot 10^{-2}$	$2,52 \cdot 10^{-6}$	$8,68 \cdot 10^6$	97,22
Epoxy/S-glass fiber 4mm + PUR foam 10mm	$1,8 \cdot 10^{-2}$	$5,67 \cdot 10^{-6}$	$1,71 \cdot 10^7$	430,92

Tabulka 12: Síla potřebná k přerušení F_f sendvičových prvků a čistých materiálů

Průhyb materiálu

Při výpočtu průhybu sendviče jsem vycházel z rovnice (5) a dosažené hodnoty jsou shrnuty v tab. 13.

Typ	Průhyb δ [m]
PUR foam, 7 mm	0,4778
PUR foam, 18mm	0,1858
Epoxy/S-glass fiber 0° lamina, 7mm	0,2623
Epoxy/S-glass fiber 0° lamina, 18mm	0,1020
Epoxy/S-glass fiber 1mm + PUR foam, 5 mm	0,0070
Epoxy/S-glass fiber 4mm + PUR foam, 5 mm	0,0026
Epoxy/S-glass fiber 1mm + PUR foam, 10mm	0,0046
Epoxy/S-glass fiber 4mm + PUR foam, 10mm	0,0023

Tabulka 13: Průhyb sendvičového prvku a čistých materiálů

Diskuze k vzorku č. 2

Graf 5 a tabulka 9 nám ukazují, že nejnižší hodnotu Youngova modulu má samostatná PUR pěna ($9,95 \cdot 10^{-4}$ GPa) a současně má také nejnižší hustotu $\rho = 160$ kg/m³. Průhyb PUR pěny je 477,8 mm pro 7 mm a 185,8 mm pro 18 mm tloušťku. Ze všech naměřených kombinací sendvičových prvků je nejvhodnější prvek Epoxy/S-glass fiber 4 mm + PUR foam 10 mm s průhybem 0,0026 mm, hustotou 1260 kg/m³, cenou 407 Kč/kg a silou potřebnou k přetržení 255,002 N. Ohybový modul je jen 1,5 GPa, což je několikanásobně méně, než ve vzorku 1. Vybraný vzorek 1 má ohybový modul 38,5 GPa.

14.3 Vzorek č. 3

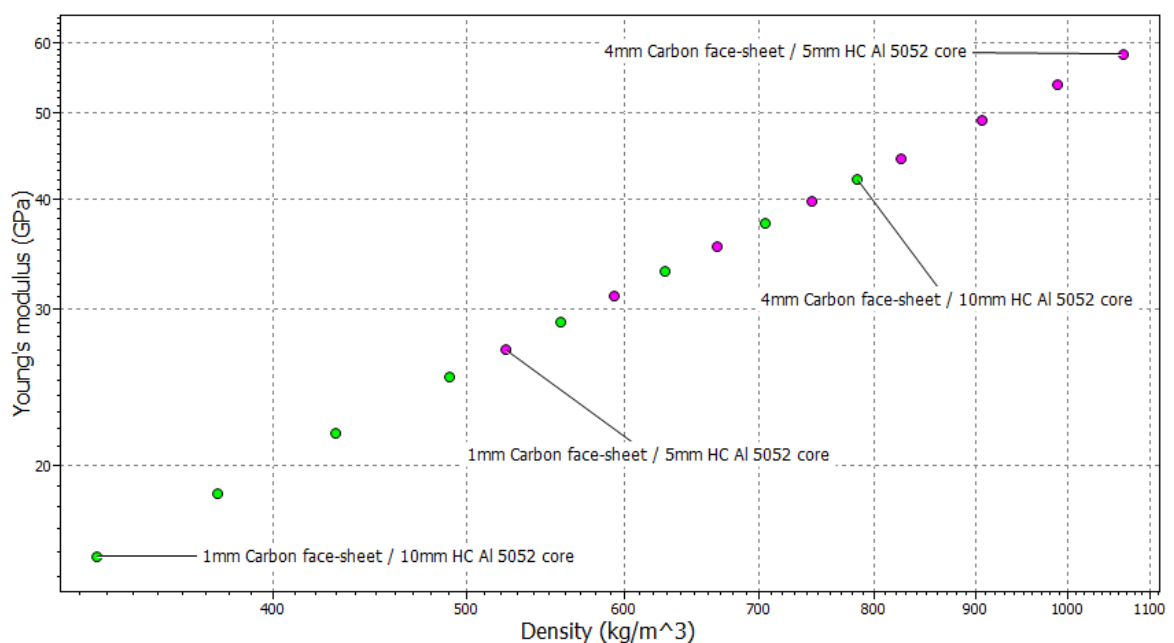
Volba materiálů

Vzorek č. 3 obsahuje vnější vrstvy vyrobené z kompozitu uhlíková matice/uhlíkové plnivo (ozn. Carbon/Carbon ve zkratce C/C) a jádro z hliníkové voštiny Al 5052.

TYP
Aluminum 5052 Honeycomb (0.05) 5 a 10 mm
C/C 1 a 4 mm
C/C 1mm + Al 5052 5mm
C/C 4mm + Al 5052 5mm
C/C 1mm + Al 5052 10mm
C/C 4mm + Al 5052 10mm

Tabulka 14: Vybrané a připravené materiály

Grafické vyhodnocení a charakterizace syntetizovaných sendvičových profilů

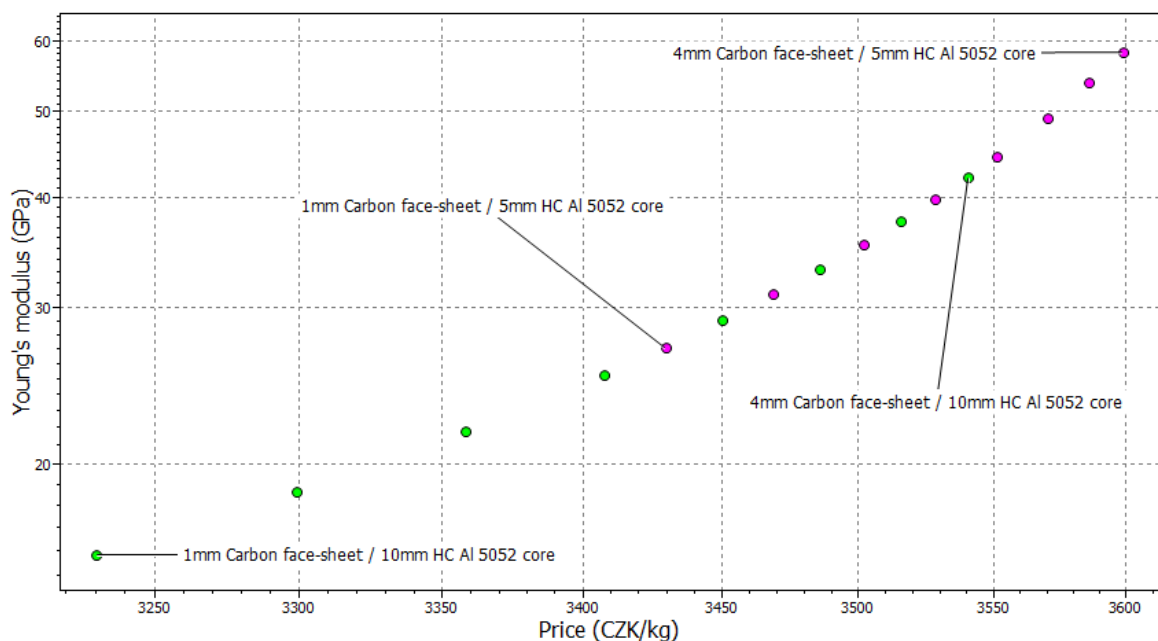


Graf 9: Závislost Youngova modulu na hustotě

Graf 9 opět poukazuje na to, že nárůst Youngova modulu je konstantní. Tloušťka jádra 10 mm a tloušťek vnějších vrstev 1–4 mm dosahuje hodnoty Youngova modulu 42,2 GPa. Tloušťka jádra 5 mm má nejvyšší hodnotu Youngova modulu 58,4 GPa. Čistý kompozit má Youngův modul 94,9 GPa.

TYP	Hustota [kg/m ³]	Youngův modul [GPa]
Al 5052 Honeycomb (0.05) 5 a 10 mm	51,1	$7,25 \cdot 10^{-4}$
C/C 1 a 4 mm	1900	94,9
C/C 1mm + Al 5052 5mm	522	27,1
C/C 4mm + Al 5052 5mm	1070	58,4
C/C 1mm + Al 5052 10mm	326	15,8
C/C 4mm + Al 5052 10mm	784	42,2

Tabulka 15: Vybrané a připravené materiály, jejich hustota a ohybový modul

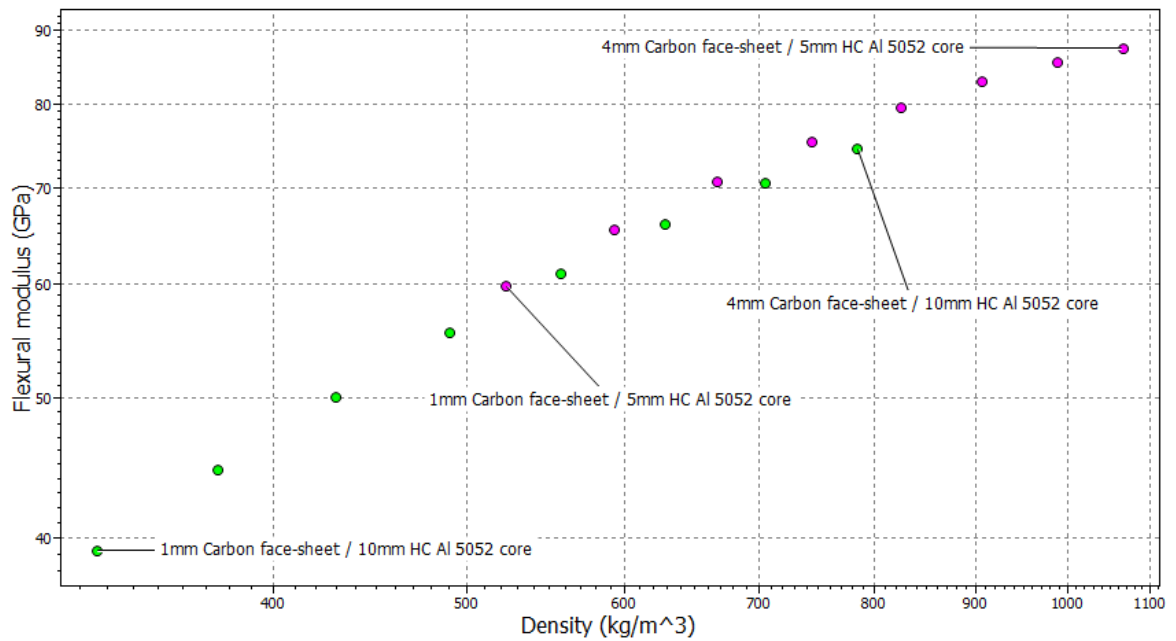


Graf 10: Závislost Youngova modulu na ceně

Cena v grafu 10 se pohybuje od 3230 Kč/kg až do 3660 Kč/kg. Nejdražší je kombinace 4 mm kompozitu a 5 mm jádra. Naopak nejlevnější je kombinace 1 mm kompozitu a 10 mm jádra. Cena čistého kompozitu je 3660 Kč/kg, což není daleko od nejdražšího sendvičového prvku.

TYP	Cena [Kč/kg]	Youngův modul [GPa]
Al 5052 Honeycomb (0.05) 5 a 10 mm	366	$7,25 \cdot 10^{-4}$
C/C 1 a 4 mm	3660	94,9
C/C 1mm + Al 5052 5mm	3430	27,1
C/C 4mm + Al 5052 5mm	3600	58,4
C/C 1mm + Al 5052 10mm	3230	15,8
C/C 4mm + Al 5052 10mm	3540	42,2

Tabulka 16: Vybrané a připravené materiály, jejich cena a Youngův modul

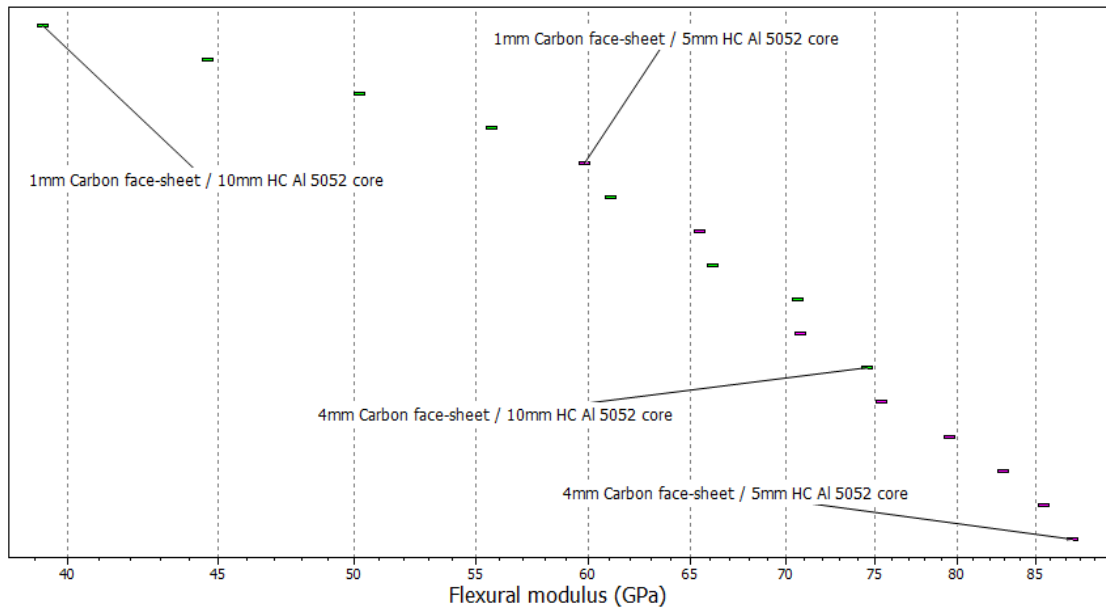


Graf 11: Závislost ohybového modulu na hustotě

V Grafu 11 můžeme vidět, že i zde se opakuje pravidlo, že nižší hustota je hlavně u sendvičových prvků s jádrem tloušťky 10 mm.

TYP	Hustota [kg/m ³]	Ohybový modul [GPa]
Al 5052 Honeycomb (0.05)	51,1	$7,25 \cdot 10^{-4}$
C/C	1700	94,9
C/C 1mm + Al 5052 5mm	522	59,8
C/C 4mm + Al 5052 5mm	1070	87,5
C/C 1mm + Al 5052 10mm	326	39,2
C/C 4mm + Al 5052 10mm	784	74,5

Tabulka 17: Vybrané a připravené materiály, jejich hustota a ohybový modul



Graf 12: Ohybový modul

V Grafu 12 vidíme, že kombinace 4 mm kompozit a 5 mm jádro zaručuje nejvyšší ohybový modul, konkrétně 87,5 GPa. Nejnižší ohybový modul 39,2 GPa je u sendviče 1 mm kompozit a 10 mm jádro. To je docela velký rozptyl.

Výpočet síly potřebné k přerušení

Podle vzorce (4) uvedeného v zadání a hodnot pevnosti získané ze software CES EduPack 2012 jsem spočítal sílu potřebnou k přetržení F_f syntetizovaných sendvičových prvků. V tab. 18 jsou uvedeny pro srovnání i síly potřebné k přerušení jednotlivých materiálů i výsledných sendvičových prvků.

TYP	Celková tloušťka h [m]	Moment Z_p [m ³]	Yield strength [Pa]	Síla F_f [N]
Al 5052 Honeycomb (0.05)	$7 \cdot 10^{-3}$	$8,58 \cdot 10^{-7}$	$4,24 \cdot 10^4$	0,162
Al 5052 Honeycomb (0.05)	$1,8 \cdot 10^{-2}$	$5,67 \cdot 10^{-6}$	$4,24 \cdot 10^4$	1,068
C/C	$7 \cdot 10^{-3}$	$8,58 \cdot 10^{-7}$	$2,35 \cdot 10^8$	895,611
C/C	$1,8 \cdot 10^{-2}$	$5,67 \cdot 10^{-6}$	$2,35 \cdot 10^8$	5922
C/C 1mm + Al 5052 5mm	$7 \cdot 10^{-3}$	$8,58 \cdot 10^{-7}$	$8,81 \cdot 10^6$	33,576
C/C 4mm + Al 5052 5mm	$1,3 \cdot 10^{-2}$	$2,96 \cdot 10^{-6}$	$1,53 \cdot 10^7$	201,11
C/C 1mm + Al 5052 10mm	$1,2 \cdot 10^{-2}$	$2,52 \cdot 10^{-6}$	$5,51 \cdot 10^6$	61,71
C/C 4mm + Al 5052 10mm	$1,8 \cdot 10^{-2}$	$5,67 \cdot 10^{-6}$	$1,24 \cdot 10^7$	312,48

Tabulka 18: Síla potřebná k přerušení F_f sendvičových prvků a čistých materiálů

Průhyb materiálu

Při výpočtu průhybu sendviče jsem vycházel z rovnice (5) a dosažené hodnoty jsou shrnuty v tab. 19.

Typ	Průhyb δ [m]
Al 5052 Honeycomb (0.05) 7 mm	0,4230
Al 5052 Honeycomb (0.05) 18mm	0,1645
C/C 7mm	0,0179
C/C 18mm	0,0070
C/C 1mm + Al 5052 5mm	0,0024
C/C 4mm + Al 5052 5mm	0,0010
C/C 1mm + Al 5052 10mm	0,0015
C/C 4mm + Al 5052 10mm	0,0008

Tabulka 19: Průhyb sendvičového prvku a čistých materiálů

Diskuze k vzorku č. 3

Nejvyšší Youngův modul má čistý kompozit (94,9 GPa). Kompozit má také nejvyšší potřebnou sílu k přetržení. Konkrétně 895, 611 N pro 7 mm variantu a 5922 N pro 18 mm variantu. Díky jeho vysoké hustotě $\rho=1700 \text{ kg/m}^3$ je pro výrobu spoileru příliš těžký. Průhyb samostatného kompozitu je 17,9 mm pro tloušťku 7 mm celého sendviče a průhyb 7 mm pro tloušťku sendviče 18 mm. Ze všech naměřených kombinací sendvičových prvků vyhovuje dle hodnoty průhybu sendvič C/C s tloušťkou 4 mm + Al 5052 voština s tloušťkou 10 mm a s průhybem pouhých 0,8 mm; hustotou 784 kg/m^3 ; cenou 3540 Kč/kg a silou k přetržení 312,48 N.

14.4 Vzorek č. 4

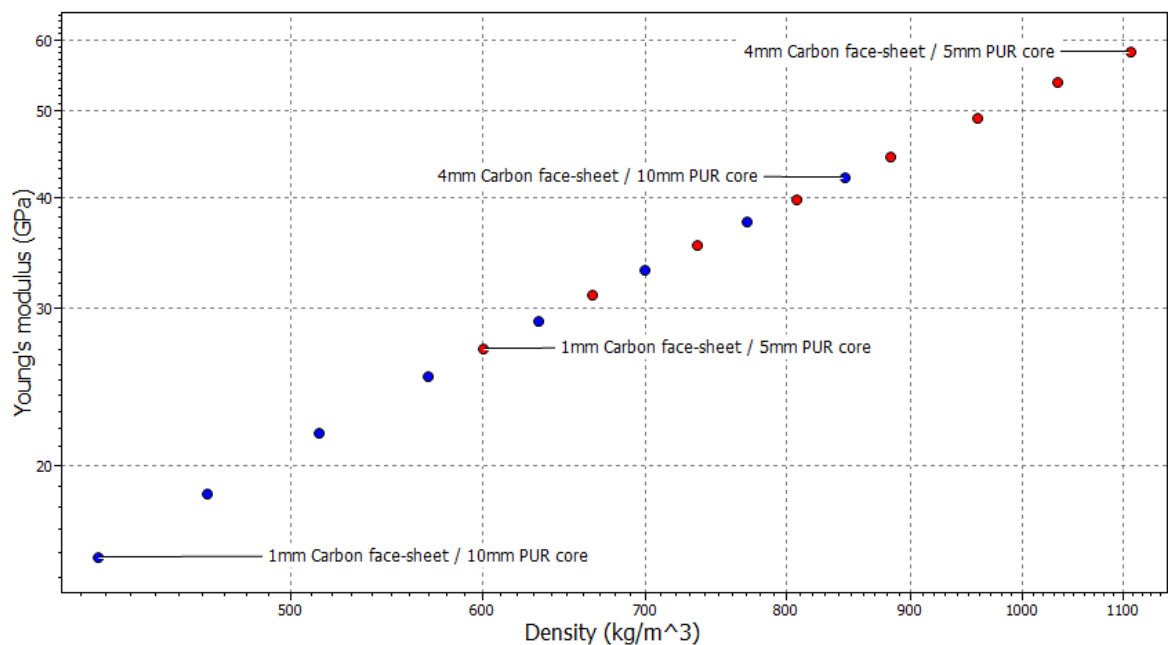
Volba materiálů

Vzorek č. 4 obsahuje vnější vrstvy vyrobené z kompozitu uhlíková matice/uhlík (ozn. jako C/C) a jádro z PUR pěny.

TYP
PUR foam 7 a 18 mm
C/C 7 a 18 mm
C/C 1mm + PUR foam 5 mm
C/C 4mm + PUR foam 5 mm
C/C 1mm + PUR foam 10mm
C/C 4mm + PUR foam 10mm

Tabulka 20: Vybrané a připravené materiály

Grafické vyhodnocení a charakterizace syntetizovaných sendvičových profilů

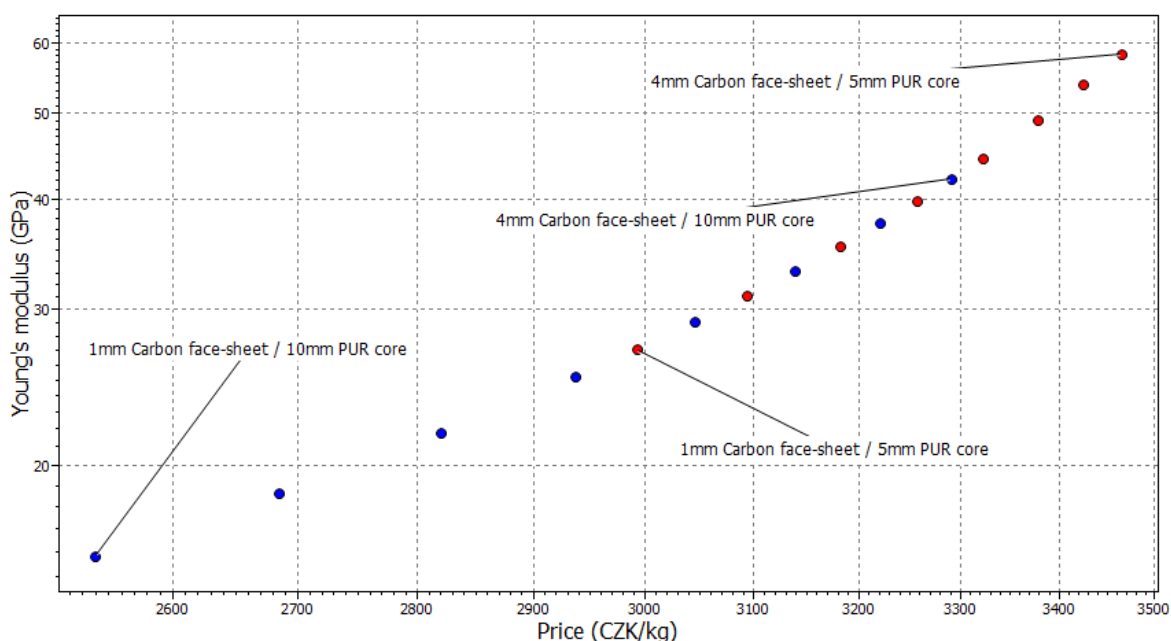


Graf 13: Závislost Youngova modulu na hustotě

Graf 13 ukazuje, že v kombinaci C/C a PUR pěny je nejvyšší Youngův modul (58,4 GPa) pro sendvičový prvek v poměru 4 mm vnější vrstvy a 5 mm jádro. Naopak nejnižší Youngův modul (15,8 GPa) má sendvičový prvek v kombinaci 1 mm vnější vrstvy a 10 mm jádro.

TYP	Hustota [kg/m ³]	Youngův modul [GPa]
PUR foam 7 a 18 mm	160	$9,95 \cdot 10^{-4}$
C/C 7 a 18 mm	1700	47,7
C/C 1mm + PUR foam 5 mm	600	27,1
C/C 4mm + PUR foam 5 mm	1110	58,4
C/C 1mm + PUR foam 10mm	417	15,8
C/C 4mm + PUR foam 10mm	844	42,2

Tabulka 21: Vybrané a připravené materiály, jejich hustota a Youngův modul

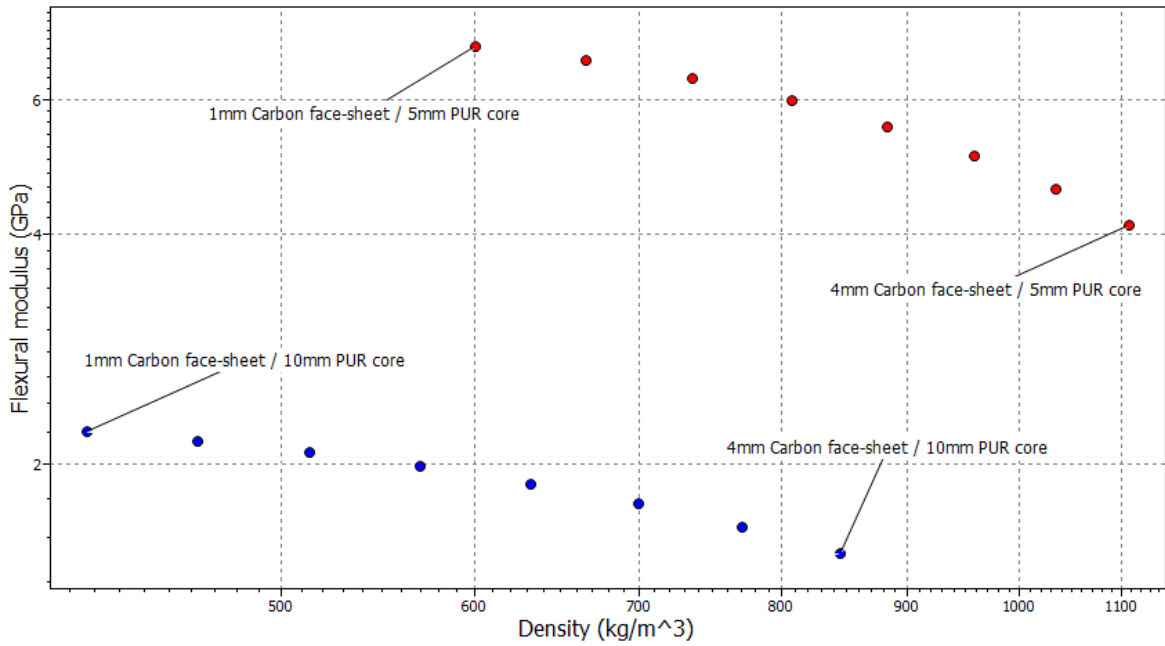


Graf 14: Závislost Youngova modulu na ceně

Graf 14 ukazuje, že jádro z PUR pěny nám způsobuje největší rozsah cen ze všech předchozích vzorků. Nejlevnější stojí 2540 Kč/kg a nejdražší stojí 3460 Kč/kg.

TYP	Cena [Kč/kg]	Youngův modul [GPa]
PUR foam 7 a 18 mm	156	$9,95 \cdot 10^{-4}$
C/C 7 a 18 mm	420	47,7
C/C 1mm + PUR foam 5 mm	2990	13,6
C/C 4mm + PUR foam 5 mm	3460	58,4
C/C 1mm + PUR foam 10mm	2540	15,8
C/C 4mm + PUR foam 10mm	3290	42,2

Tabulka 22: Vybrané a připravené materiály, jejich cena a Youngův modul

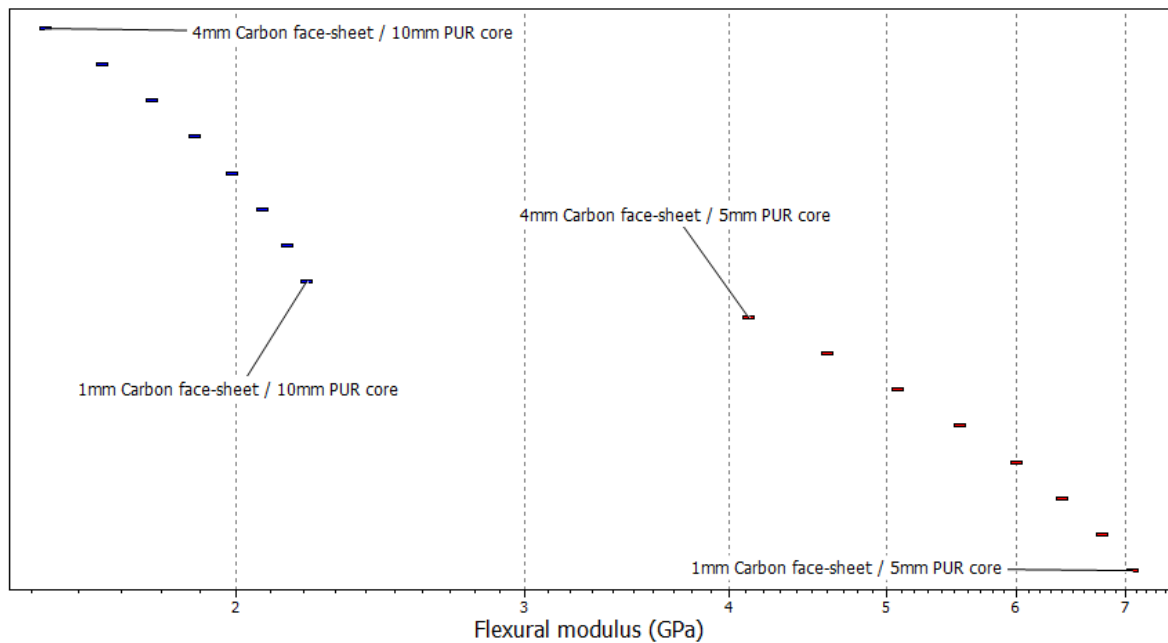


Graf 15: Závislost ohybového modulu na hustotě

Graf 15 znázorňuje, že větší vrstva pěnového jádra snižuje hustotu. Nejnižší hustota pro sendvič s 10 mm jádrem je 417 kg/m³. Nejnižší hustota pro sendvič s 5 mm jádrem je 600 kg/m³.

TYP	Hustota [kg/m ³]	Ohybový modul [GPa]
PUR foam 7 a 18 mm	160	9,95·10 ⁻⁴
C/C 7 a 18 mm	1700	94,9
C/C 1mm + PUR foam 5 mm	600	7,07
C/C 4mm + PUR foam 5 mm	1110	4,12
C/C 1mm + PUR foam 10mm	417	2,21
C/C 4mm + PUR foam 10mm	844	1,53

Tabulka 23: Vybrané a připravené materiály, jejich hustota a ohybový modul



Graf 16: Ohybový modul

Graf 16 potvrzuje, že použití PUR pěny výrazně snižuje jeho ohybový modul. Nejvyšší ohybový modul (7,07 GPa) má sendvičový prvek sestavený z 1 mm kompozitu a 5 mm jádra. Nejnižší ohybový modul (1,53 GPa) má sendvičový prvek ve variantě 4 mm kompozitu a 10 mm jádra.

Výpočet síly potřebné k přerušení

Podle vzorce (4) uvedeného v zadání a hodnot pevnosti získané ze software CES EduPack 2012 jsem spočítal sílu potřebnou k přetržení F_f syntetizovaných sendvičových prvků. V tab. 24 jsou uvedeny pro srovnání i síly potřebné k přerušení jednotlivých materiálů, které tvoří výsledné sendvičové prvky.

TYP	Celková tloušťka h [m]	Moment Z_p [m ³]	Yield strength [Pa]	Síla F_f [N]
PUR foam	$7 \cdot 10^{-3}$	$8,58 \cdot 10^{-7}$	$4,79 \cdot 10^4$	0,183
PUR foam	$1,8 \cdot 10^{-2}$	$5,67 \cdot 10^{-6}$	$4,79 \cdot 10^4$	1,207
C/C	$7 \cdot 10^{-3}$	$8,58 \cdot 10^{-7}$	$2,35 \cdot 10^8$	895,611
C/C	$1,8 \cdot 10^{-2}$	$5,67 \cdot 10^{-6}$	$2,35 \cdot 10^8$	5922
C/C 1mm + PUR foam 5mm	$7 \cdot 10^{-3}$	$8,58 \cdot 10^{-7}$	$4,78 \cdot 10^6$	18,217
C/C 4mm + PUR foam 5mm	$1,3 \cdot 10^{-2}$	$2,96 \cdot 10^{-6}$	$3 \cdot 10^6$	39,433
C/C 1mm + PUR foam 10mm	$1,2 \cdot 10^{-2}$	$2,52 \cdot 10^{-6}$	$3,12 \cdot 10^6$	34,94
C/C 4mm + PUR foam 10mm	$1,8 \cdot 10^{-2}$	$5,67 \cdot 10^{-6}$	$2,23 \cdot 10^6$	56,20

Tabulka 24: Síla potřebná k přerušení F_f sendvičových prvků a čistých materiálů

Průhyb materiálu

Při výpočtu průhybu sendviče jsem vycházel z rovnice (5) a dosažené hodnoty jsou shrnuty v tab. 25.

Typ	Průhyb δ [m]
PUR foam 7 mm	0,4778
PUR foam 18mm	0,1858
C/C 7mm	0,0356
C/C 18mm	0,0139
C/C 1mm + PUR foam 5 mm	0,0013
C/C 4mm + PUR foam 5 mm	0,0002
C/C 1mm + PUR foam 10mm	0,0008
C/C 4mm + PUR foam 10mm	0,0001

Tabulka 25: Průhyb sendvičového prvku a čistých materiálů

Diskuze k vzorku č. 4

Ze všech naměřených kombinací sendvičových prvků vyhovuje dle hodnoty průhybu sendvič C/C s tloušťkou 4 mm + PUR pěna s tloušťkou 10 mm s průhybem 0,1 mm, hustotou 844 kg/m^3 , cenou 3290 Kč/kg a silou nutnou k přetržení 56,2 N.

14.5 Porovnání vzorků a vyhodnocení

Podle porovnávací tabulky 26 jsem zjistil, že z hlediska průhybu dopadl nejlépe vzorek č. 4. Bohužel má nejvyšší hustotu a taky několikanásobně vyšší cenu než vzorek č. 1 a 2. Vzorky č. 3 a 4 jsem musel vyřadit, protože obsahují C/C, který cenu značně navyšuje. Zbývají pouze vzorky č. 1 a 2. Z hlediska optimalizace mechanických vlastností a ceny, nejlepší kombinaci vykazuje vzorek č. 1., který má dobrou hustotu, nízkou cenu a docela vysokou sílu potřebnou k přetržení v porovnání s ostatními vzorky. Průhyb 1,8 mm je stále optimální pro spoiler automobilu.

Typ	Hustota [kg/m ³]	Cena [Kč/kg]	F _f [N]	průhyb δ [mm]
Epoxy/S-glass 4 mm + HC Al 5052 10 mm	875	416	347,76	1,8
Epoxy/S-glass 4 mm + PUR foam 10 mm	935	395	430,92	2,3
C/C 4 mm + HC Al 5052 10 mm	784	3540	312,48	0,8
C/C 4 mm + PUR foam 10 mm	844	3290	56,2	0,1

Tabulka 26: Porovnání všech vzorků

Materiálový index

Materiálový index je podíl Youngova modulu a hustoty. Tento poměr dobře charakterizuje oblasti použití materiálu. Čím větší je materiálový index, tím vhodnější je materiál pro použití k dané aplikaci (namáhané v ohybu) s důrazem na co nejnižší hmotnost materiálu charakterizovaná hustotou.

$$M = \frac{E_{flex}^{\frac{1}{3}}}{\rho} \quad (6)$$

Typ	Materiálový index M [-]
Epoxy/S-glass 4 mm + HC Al 5052 10 mm	3,16
Epoxy/S-glass 4 mm + PUR foam 10 mm	2,96
C/C 4 mm + HC Al 5052 10 mm	4,44
C/C 4 mm + PUR foam 10 mm	4,12

Tabulka 27: Porovnání materiálových indexů

Optimální index

Optimální index je poměr dvou vnějších vrstev ($2 \cdot t_1$) proti celkové tloušťce sendviče (h). Optimální index by měl být při nízké hustotě a vysokém ohybovém modulu.

$$f = 2 \cdot \frac{t_1}{h} \quad (7)$$

Typ	Optimální index [-]
Epoxy/S-glass 4 mm + Al 5052 10 mm	0,89
Epoxy/S-glass 4 mm + PUR foam 10 mm	0,89
C/C 4 mm + Al 5052 10 mm	0,89
C/C 4 mm + PUR foam 10 mm	0,89

Tabulka 28: Porovnání optimálních indexů

ZÁVĚR

Cílem mé práce bylo optimalizovat návrh sendvičového prvku jako přitlačného spojleru v automobilovém průmyslu. Ve své studii jsem se zaměřil na výběr vhodného materiálu z oblasti kompozitů.

V praktické části jsem si podle software CES EduPack 2012 vybral 2 vhodné materiály pro vnější vrstvy (Epoxy/S glass a Carbon/Ccarbon) a 2 materiály pro jádro sendviče (Al voština a PUR pěna). Pomocí grafů, výpočtů a tabulek jsem byl schopen určit nejvhodnější materiál, který má nejlepší poměr hmotnosti, průhybu a ekonomické náročnosti.

Pro běžný automobil jsem vybral pro výrobu spoileru sendvičový prvek s vnějšími vrstvami vyrobené z Epoxy/S-glass (tloušťka 4 mm) a s jádrem z hliníkové voštiny Al 5052 (tloušťka 10 mm). Je cenově dostupný pro širší populaci a nezvýší konečnou cenu automobilu. Navíc proti variantě s PUR pěnou má lepší materiálové číslo (3,16); hustotu (875 kg/m^3) a průhyb (1,8 mm). Cenový rozdíl není tak vysoký. Konkrétně 395 Kč/kg za variantu s PUR pěnou a 416 Kč/kg za variantu s hliníkovou voštinou.

Pro závodní automobil je vhodnější vyrobit spoiler s vnějšími vrstvami z C/C (tloušťka 4 mm) a s jádrem opět z hliníkové voštiny Al 5052 (tloušťka 10 mm). Má materiálové číslo (4,44), nižší hustotu (784 kg/m^3) než v případě pro běžný automobil. Má také nižší průhyb (0,8 mm). Nízký průhyb je důležitý, protože na závodním autě má vyšší namáhání než na civilním. Cena je díky použití C/C bohužel vyšší, konkrétně 3540 Kč/kg, ale z hlediska motorsportu patří k průměru.

Optimální index mají všechny varianty stejný – 0,89. Je to z důvodu, že všechny čtyři vzorky vyšly ve stejné poměrové konfiguraci.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] DAVIES, J. *Lightweight sandwich construction*. Malden. MA: BlackwellScience, 2001. ISBN 06-320-4027-0.
- [2] AGARWAL, Bhangwan D. a Lawrence J. BROUTMAN. *Vláknové kompozity 1. vyd. Praha*. SNTL. 1987, 294 s.
- [3] RUSNÁKOVÁ, Soňa. *Zpracovatelské inženýrství kompozitů: Přednášky TYZIK, FT UTB 2019*.
- [4] JANČÁŘ, Josef. *Úvod do materiálového inženýrství polymerních kompozitů*. 1. vyd. Brno: VUT, 2003, 194 s. ISBN 80-214-2443-5.
- [5] *Mmspektrum.com* [online]. c2011, 2001 [cit. 2019-11-27]. Sendvičové konstrukce. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/sendvicove-konstrukce.html>
- [6] Korek. *Wikipedia* [online]. [cit. 2019-11-27]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Korek>
- [7] Balsa. *Wikipedia* [online]. [cit. 2019-11-27]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Balsa>
- [8] FABRIGER, Daniel. *Technologie výroby sendvičových kompozitních struktur vákuovou infuzí pod pružnou folií*. Zlín, 2011. Diplomová práce. UTB ve Zlíně
- [9] *Mechanické vlastnosti* [online]. [cit. 2019-11-28]. Dostupné z: https://www.opi.zcu.cz/mechanicke_vlastnosti.pdf
- [10] *Jhamernik* [online]. [cit. 2019-11-29]. Dostupné z: <http://jhamernik.sweb.cz/vlastnosti.htm>
- [11] GURIT. *Gurit* [online]. [cit. 2019-11-30]. Dostupné z: <https://www.gurit.com/Our-Business/Composite-Materials>
- [12] CALVERA. *Stavba a prodej motorových lodí, hausbótů, pramic, kánoí a kajaků. Prodej lodních motorů, laminačních materiálů. Opravy laminátových výrobků*. [online]. [cit. 2019-12-10]. Dostupné z: <http://uvody.com/>
- [13] *HexWeb™ HONEYCOMB SANDWICH DESIGN TECHNOLOGY: Failure modes* [online]. December 2000. [cit. 2020-03-15]. Dostupné z: https://www.hexcel.com/user_area/content_media/raw/Honeycomb_Sandwich_Design_Technology.pdf

- [14] KLUSALOVÁ, Jitka. *Srovnání lepicích systémů pro sendvičové panely dopravních prostředků*. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2017, 59 s. 19 s příloh. Dostupné také z: <http://hdl.handle.net/10563/40696>. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Fakulta technologická, Ústav inženýrství polymerů. Vedoucí práce: Mrkvičková, Simona.
- [15] 5M. *Lepidla 5M* [online]. [cit. 2019-12-13]. Dostupné z: <https://www.5m.cz/produkty/lepidla>
- [16] ZENKER, D. *SandwichConstructions*. Londýn: Emas, 2000, 439 s.
- [17] POSTERUS. *Bunkové telesá* [online]. [cit. 2019-12-18]. Dostupné z: <http://www.posterus.sk/?p=7871>
- [18] POSTERUS. *Bunkové telesá* [online]. [cit. 2019-12-18]. Dostupné z: <http://www.posterus.sk/?p=7861>
- [19] MACHEK, Václav; SODOMKA Jaromír. *Polymery a kompozity s polymerní matricí: Nauka o materiálu 4. část*. Vyd. 1. Praha: ČVUT, 2008. 86 s. ISBN 978-80-01-03297-4.
- [20] BAREŠ, Richard A. *Kompozitní materiály*. Praha 1: SNTL – Nakladatelství technické literatury, n.p., 1988. 328 s.
- [21] EHRENSTEIN, Gottfried W. *Polymerní kompozitní materiály*. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009. 351 s. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [22] DIAB. *Foam core materials in the marine industry* [online]. [cit. 2020-02-26]. Dostupné z: <http://www.diabgroup.com/>
- [23] VINSON, Jack R. *The behavior of sandwich structures of isotropic and composite materials*. Vyd. 1. Lancaster, Pa.: Technomic Pub. Co., c1999, xvi, 378 p. Knižnice strojírenské technologie. ISBN 15-667-6699-0.
- [24] DAŇOUREK, K. *Kompozitní materiály: Druhy a jejich užití*. Liberec, 2007. Publikace. Technická Univerzita v Liberci, Fakulta Technologická
- [25] ZENKERT, Nordic Industrial Fund. Ed.: D. *The handbook of sandwichconstruction*, CradleyHeath, WestMidlands: Engineering Materials Advisory Services Ltd. (EMAS), 1997, 370 p. ISBN 09-478-1796-4.

- [26] BITZER, T. *Honeycomb technology*. V UK 1. vyd. Glasgow: Springer-Science+Business Media, 1997, 230 s. ISBN 978-94-010-6474-3.
- [27] ŠUBA, O. *Mechanické chování těles*. 5. vyd. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2010, 101 s., ISBN 978-80-731-8907-5.
- [28] ŠUBA, O. *Mechanika polymerů a kompozitů*. 1. vyd. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2011, 110 s., ISBN 978-80-745-4015-8.
- [29] ASHBY, M. F. *Mechanical selection in mechanical design*. 5. vyd. Amsterdam; Boston; Heidelberg; London; New York; Oxford; Paris; San Diego; San Francisco; Singapore; Sydney; Tokyo; Elsevier, 2017, 646 s., ISBN 978-00-810-0599-6
- [30] ASHBY, M. F., JOHNSON, K. *Materials and design: the art and science of materiál selection in product design*. 2. vyd. Amsterdam, Elsevier, 2010, 331 s., ISBN 978-18-561-7497-8.
- [31] ASM International. (2001). *ASM handbook: Volume 21*. Materials Park, OH: ASM International
- [32] G-Power. (2018). *G-Power BMW M4 GTS* [online]. Dostupné z: <https://www.g-power.com/en/brand>
- [33] 5M Kunovice. *Železniční vozidla* [online]. Dostupné z: <https://www.5m.cz/odvetvi/zeleznicni-vozidla>
- [34] Plastic. *Technologie*. [online]. Dostupné z: <http://www.plastic.cz/technologie-autoklav-cz>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Kg	kilogram
m ³	metr krychlový
σ	napětí
MPa	megapascal
P+M	plnivo + matrice
Kč	koruna česká
°C	stupeň Celsius
3D	trojrozměrný (prostorový)
CO ₂	oxid uhličitý
atd.	a tak dále
apod.	a podobně
Z _p	průřezový modul
b	šířka sendvičového prvku
h	výška sendvičového prvku
M	moment
E	Youngův modul
I	kvadratický moment plochy
ε	deformace
F _f	síla potřebná k přerušení
C	konstanta při daném zatížení
L	délka spoileru
N	Newton
Pa	Pascal
kNm	kilonewtonmetr
C ₁	konstanta

m	metr
VFI	vacuum foil infusion
UP	polyesterová pryskyřice
VE	epoxidová pryskyřice
RTM	resin transfer moulding
VARTM	vacuum assisted resin transfer moulding
F1	formule 1
DCB	double cantilever beam
tzv	takzvaně
PSA	pressure sensitive adhesive
UV	ultrafialové
mm	milimetr
C_m	cena
t_2	tloušťka jádra
t_1	tloušťka vnější vrstvy
Pu	polyurethan
Al	hliník
CF	carbon fiber
GF	glass fiber
KF	kevlar fiber
S-glass	skelná vlákna
GPa	gigapascal
tab.	tabulka
δ	průhyb
č.	číslo
ρ	hustota

M	materiálový index
f	optimální index
F	síla
K_0	ohybová tuhost
σ_y	ohybové napětí
HC	honeycomb (voština)
Ozn.	označení

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Skladba sendviče [16]	12
Obrázek 2: Složení hybridního kompozitu [3]	14
Obrázek 3: Balzové dřevo [7]	15
Obrázek 4: PVC pěny [11].....	16
Obrázek 5: Voština vlevo – z aramidového papíru, vpravo – hliníková [25].....	17
Obrázek 6: zátka z korku [6].....	19
Obrázek 7: 3D tkanina [30]	20
Obrázek 8: vlevo – spoiler, vpravo – střecha os. Automobilu zn. BMW [32]	21
Obrázek 9: Dveře od WC ve vlaku jako sendvičový prvek [33]	22
Obrázek 10: Konstrukce sedadel vyrobené ze sendvičového prvku [33].....	23
Obrázek 11: Zobrazení možností průřezových modulů [29]	24
Obrázek 12: Působení sil v ohybu sendvičového prvku [29]	25
Obrázek 13: Druhy konstant k určení síly potřebné k přetržení (Granta Appendix B) [29]	26
Obrázek 14: Druhy konstant potřebných k vypočítání průhybu (Granta Appendix B) [29]	27
Obrázek 15: Stříkání [3]	29
Obrázek 16: Ruční kladení [3].....	30
Obrázek 17: VFI technologie [3]	31
Obrázek 18: Navíjení vláken [3].....	31
Obrázek 19: Pultruze [3].....	32
Obrázek 20: RTM technologie [3].....	33
Obrázek 21: Autokláv [34]	35
Obrázek 22: Vyhřívání lisování [23].....	37
Obrázek 23: Vytvrzování v peci [16]	37
Obrázek 24: Graf synergického efektu	38
Obrázek 25: Climbing drum peel test [16]	39
Obrázek 26: DCB-Type peel test [16]	40
Obrázek 27: Peel test stlačeným vzduchem [16]	40
Obrázek 28: Zkouška třibodovým ohybem [10].....	46
Obrázek 29: Schéma sendvičového prvku.....	50

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Seznam použitých materiálů.....	51
Tabulka 2: Vybrané a připravené materiály	53
Tabulka 3: Vybrané a připravené materiály, jejich Youngův modul a hustota	54
Tabulka 4: Vybrané a připravené materiály, jejich Youngův modul a cena za kg.....	54
Tabulka 5: Vybrané a připravené materiály, jejich ohybový modul a hustota	55
Tabulka 6: Síla potřebná k přerušení F_f sendvičových prvků a čistých materiálů	56
Tabulka 7: Průhyb materiálu.....	57
Tabulka 8: Vybrané a připravené materiály	58
Tabulka 9: Vybrané a připravené materiály, jejich Youngův modul a hustota	59
Tabulka 10: Vybrané a připravené materiály, jejich Youngův modul a cena	59
Tabulka 11: Vybrané a připravené materiály, jejich hustota a ohybový modul	60
Tabulka 12: Síla potřebná k přerušení F_f sendvičových prvků a čistých materiálů	61
Tabulka 13: Průhyb sendvičového prvku a čistých materiálů	62
Tabulka 14: Vybrané a připravené materiály	63
Tabulka 15: Vybrané a připravené materiály, jejich hustota a ohybový modul	64
Tabulka 16: Vybrané a připravené materiály, jejich cena a Youngův modul	64
Tabulka 17: Vybrané a připravené materiály, jejich hustota a ohybový modul	65
Tabulka 18: Síla potřebná k přerušení F_f sendvičových prvků a čistých materiálů	66
Tabulka 19: Průhyb sendvičového prvku a čistých materiálů	67
Tabulka 20: Vybrané a připravené materiály	68
Tabulka 21: Vybrané a připravené materiály, jejich hustota a Youngův modul	69
Tabulka 22: Vybrané a připravené materiály, jejich cena a Youngův modul	69
Tabulka 23: Vybrané a připravené materiály, jejich hustota a ohybový modul	70
Tabulka 24: Síla potřebná k přerušení F_f sendvičových prvků a čistých materiálů	71
Tabulka 25: Průhyb sendvičového prvku a čistých materiálů	72
Tabulka 26: Porovnání všech vzorků.....	72
Tabulka 27: Porovnání materiálových indexů	73
Tabulka 28: Porovnání optimálních indexů.....	73

SEZNAM GRAFŮ

Graf 1: Závislost Youngova modulu na hustotě	53
Graf 2: Závislost Youngova modulu na ceně	54
Graf 3: Závislost ohybového modulu na hustotě	55
Graf 4: Ohybový modul	56
Graf 5: Závislost Youngova modulu na hustotě	58
Graf 6: Závislost Youngova modulu na ceně	59
Graf 7: Závislost ohybového modulu na hustotě	60
Graf 8: Ohybový modul	61
Graf 9: Závislost Youngova modulu na hustotě	63
Graf 10: Závislost Youngova modulu na ceně	64
Graf 11: Závislost ohybového modulu na hustotě	65
Graf 12: Ohybový modul	66
Graf 13: Závislost Youngova modulu na hustotě	68
Graf 14: Závislost Youngova modulu na ceně	69
Graf 15: Závislost ohybového modulu na hustotě	70
Graf 16: Ohybový modul	71