

Sendvičové prvky v letectví

Tomáš Zábojník

Bakalářská práce
2021



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

Akademický rok: 2020/2021

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Tomáš Zábojník**
Osobní číslo: **T19274**
Studijní program: **B3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Technologická zařízení**
Forma studia: **Prezenční**
Téma práce: **Sendvičové prvky v letectví**

Zásady pro vypracování

1. Vypracujte literární rešerši se zaměřením na sendvičové struktury s využitím polymerních kompozitů v leteckém průmyslu.
2. Pomocí materiálové databáze CES EduPack navrhnete a optimalizujete sendvičový panel jako úložný prostor v interiéru letadla.
3. Při optimalizaci se 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, skriptá.
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: **5. ledna 2021**
Termín odevzdání bakalářské práce: **21. května 2021**

prof. Ing. Roman Čermák, Ph.D. v.r.
děkan

L.S.

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

Ve Zlíně dne 1. dubna 2021

PROHLÁŠENÍ AUTORA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Beru na vědomí, že:

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

Prohlašuji,

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

Ve Zlíně, dne:

Jméno a příjmení studenta:

.....
podpis studenta

ABSTRAKT

Bakalářská práce se zabývá výběrem vhodného materiálu pro návrh úložného prostoru v interiéru letadla jako sendvičového prvku. V teoretické části jsou popsány kompozitní materiály, druhy vyztužujících vláken, produkty z vláken, jádra sendvičových struktur, aplikace sendvičových konstrukcí, technologie výroby, lepení sendvičových struktur a využití kompozitních materiálů v letectví. Praktická část bakalářské práce se zaměřuje na výběr vhodného materiálu pro sendvičový prvek s pomocí softwaru CES EduPack 2020 (Granta, Univerzita Cambridge, UK). Cílem práce je optimalizovat návrh sendvičového prvku s ohledem na ohybovou tuhost, průhyb a cenu panelu.

Klíčová slova: sendvičový prvek, letectví, kompozitní materiály, sendvičové panely, ohybová tuhost

ABSTRACT

The bachelor thesis deals with the selection of a suitable material for the design of storage space in the interior of the aircraft as a sandwich element. The theoretical part describes composite materials, types of reinforcing fibres, fibre products, cores of sandwich structures, applications of sandwich structures, production technology, bonding of sandwich structures and the use of composite materials in aviation. The practical part of the bachelor's thesis focused on the selection of suitable material for sandwich elements using CES EduPack 2020 software (Grant, University of Cambridge, UK). The aim of this work is to optimize the design of a sandwich element with regard to the bending stiffness, deflection and price of the panel.

Keywords: sandwich element, aviation, composite materials, sandwich panels, bending stiffness

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	9
I TEORETICKÁ ČÁST	10
1 CHARAKTERISTIKA SENDVIČOVÝCH STRUKTUR	11
1.1 VLASTNOSTI SENDVIČOVÝCH KONSTRUKCÍ.....	11
1.1.1 Tuhost a pevnost v ohybu	12
2 VNĚJŠÍ VRSTVA SENDVIČOVÝCH STRUKTUR	14
2.1 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY (POTAHY).....	14
2.1.1 Synergický efekt.....	14
2.1.2 Kompozitní materiál v historii	15
2.1.3 Matrice	15
2.1.4 Vyztužující vlákna	16
2.2 PRODUKTY Z VLÁKEN	17
2.2.1 Druhy vazeb vyztužujících tkanin.....	18
2.2.2 Tkaniny s různou skladbou vláken v útku a osnově	19
2.3 PREPREGY	20
3 JÁDRA SENDVIČOVÝCH STRUKTUR	21
3.1 PĚNY	21
3.1.1 PVC pěna	22
3.1.2 PUR pěna	22
3.1.3 Polystyren.....	22
3.1.4 Polypropylen	22
3.2 VOŠTINA	23
3.2.1 Materiál voštiny	23
3.2.2 Výroba voštinové struktury.....	24
4 APLIKACE SENDVIČOVÝCH KONSTRUKCÍ	25
4.1 STAVEBNÍ PRŮMYSL	25
4.2 ŽELEZNIČNÍ DOPRAVA.....	25
4.3 ZDRAVOTNICTVÍ.....	26
4.4 LETECKÝ PRŮMYSL	26
5 TECHNOLOGIE VÝROBY	28
5.1 SUCHÁ METODA VÝROBY SENDVIČOVÉ STRUKTURY	28
5.1.1 Vakuové lisování.....	28
5.2 MOKRÁ METODA VÝROBY SENDVIČOVÉ STRUKTURY	28
5.2.1 Ruční laminování	28
5.2.2 Stříkání laminátů	29
5.2.3 Vysokotlaké vstřikování RTM (resin-transfer-moulding)	30
5.2.4 Vakuová infuze	30

5.2.5	Lisování v autoklávu	31
6	LEPENÍ VRSTEV SENDVIČOVÉ STRUKTURY	32
6.1	TYPY LEPENÝCH MATERIÁLŮ	32
6.2	DRUHY LEPIDEL	32
6.3	JAK PROSTŘEDÍ OVLIVŇUJE LEPENÝ SPOJ.....	32
7	KOMPOZITNÍ MATERIÁLY V LETECTVÍ.....	34
7.1	HISTORICKÝ VÝVOJ KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ V LETECTVÍ	34
7.2	CIVILNÍ LETECTVÍ.....	35
7.3	ČESKÉ KOMPOZITNÍ LETADLO Z KUNOVIC	36
7.4	LET DO VESMÍRU	36
8	MATERIÁLOVÁ DATABÁZE CES EDUPACK	38
II	PRAKTICKÁ ČÁST	39
9	CÍL PRAKTICKÉ ČÁSTI BAKALÁŘSKÉ PRÁCE.....	40
10	VSTUPNÍ PODMÍNKY SENDVIČOVÉHO PANELU	41
10.2	VÝBĚR VNĚJŠÍ VRSTVY	43
10.3	VOLBA JÁDRA	45
10.4	SYNTÉZA SENDVIČOVÉHO PANELU	46
10.5	VÝPOČTY	48
10.5.1	Průřezový modul	49
10.5.2	Síla potřebná k přetržení	49
10.5.3	Moment v ohybu	50
10.5.4	Kvadratický moment plochy	50
10.5.5	Průhyb	50
10.5.6	Materiálový index	50
10.5.7	Hmotnost panelu	51
10.5.8	Jednotková cena panelu.....	52
ZÁVĚR		54
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....		55
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....		59
SEZNAM OBRÁZKŮ		62
SEZNAM TABULEK.....		63
SEZNAM GRAFŮ		64

ÚVOD

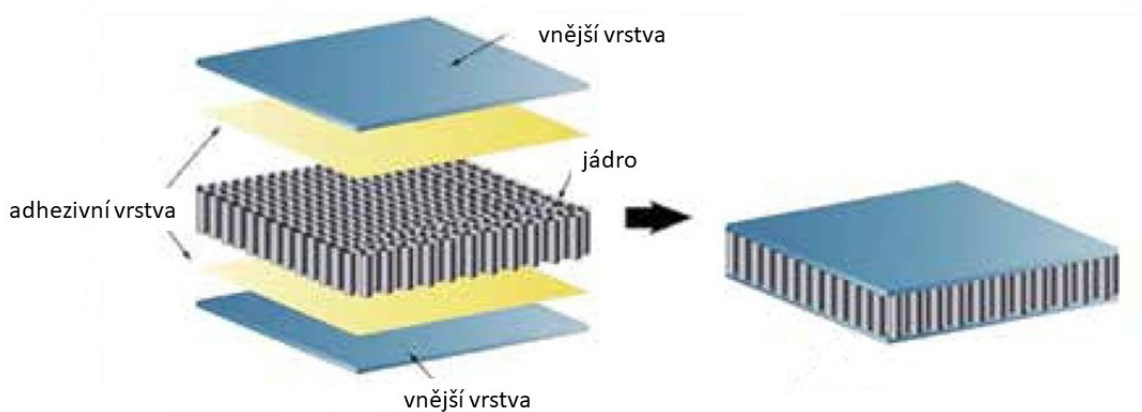
První sendvičová konstrukce letadla byla použita během druhé světové války v letadle anglické výroby s označením de Havilland Mosquito. Toto letadlo mělo téměř celou konstrukci ze dřeva, kdy jako opláštění byla použita břízová překližka s jádrem z balzového dřeva. Díky této koncepci mělo letadlo nízkou hmotnost a dosahovalo vysoké rychlosti, ale zároveň bylo pevné a tuhé. Po konci druhé světové války nastala revoluce v civilním letectví, kdy se neustále zvyšoval počet přepravených cestujících. Letadla z té doby měla konstrukci vyrobenou ze slitin kovů, které už byly zastaralé. Letecké společnosti chtěli přepravit více cestujících rychleji, levněji a proto požadovali od výrobců letadla s větší kapacitou, s ekonomickým a bezpečným provozem. Z tohoto důvodu se letadla začala vyrábět s prvky ze sendvičové struktury. Použitím sendvičů došlo ke snížení celkové hmotnosti letadla, konstrukce byla pevnější, tužší a zvýšila se únavová životnost prvků konstrukce. Díky snížení hmotnosti klesla spotřeba paliva, proto může letadlo přepravit více osob nebo nákladu a zároveň klesla i cena přepravy. Zvýšením tuhosti, pevnosti a životnosti materiálu klesly náklady na opravy, servis a zvýšila se bezpečnost. Sendvičové panely se v leteckém průmyslu používají ve velkém množství. Slouží jako materiál vhodný pro výrobu různých částí letadla např.: křídélko, gondola, náběhová hrana křídla, vodorovné ocasní plochy, kryty motorů, podlahy, stropy, zavazadlové stránky, stěny, dveře, odpočinkový box, svislé ocasní plochy, směrovka. Další uplatnění nachází sendvičové panely u rotorů helikoptér a různých částí raketoplánů. V železniční dopravě se sendviče používají pro výrobu interiérů (podlahy, stropy, dveře), nebo slouží jako absorbéry energie při nehodě. Ve stavebním průmyslu se sendviče uplatňují zejména jako panely pro opláštění hal a skladů. V teoretické části bakalářské práce je nejprve popsána charakteristika a vlastnosti sendvičové struktury. Následně se práce zaměřuje na jednotlivé vrstvy sendvičové struktury, kde jsou uvedeny materiály, ze kterých se vyrábí vnější a vnitřní vrstvy sendviče. V dalších kapitolách jsou uvedeny aplikace a technologie výroby sendvičových konstrukcí. Poslední kapitola se výhradně zaměřuje na vývoj a aplikaci sendviče v leteckém průmyslu. V praktické části bakalářské práce je cílem vytvořit sendvičový panel vhodný pro použití v interiéru letadla se zaměřením na mechanické vlastnosti, minimalizace hmotnosti a snížení nákladů na výrobu.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 CHARAKTERISTIKA SENDVIČOVÝCH STRUKTUR

Sendvičové struktury zařazujeme mezi kompozitní materiály. Sendvičová struktura se vždy skládá ze dvou základních materiálových vrstev. Prvním jsou dvě pohledové vrstvy, které jsou poměrně tenké vzhledem k jádru, ale zároveň tvrdé a pevné. Druhým prvkem sendvičové struktury je jádro, které je lehké a poměrně širší vzhledem k pohledovým vrstvám. Pohledové vrstvy mohou být z ocele, hliníku, dřeva nebo z kompozitu, který je vyztužen vlákny. Jádro může být vyrobeno z balzového dřeva, korku, gumy, pěny, minerální vlny nebo voštiny, která může být z kovu nebo papíru. Všechny tyto vrstvy jsou poté slepeny vhodným lepidlem, které je přizpůsobeno na podmínky budoucího používání výrobku. Velmi důležitá je vazba povrchová vrstva – jádro [1].

Sendvičová struktura nám spojuje vlastnosti tvrdých a pevných pohledových vrstev s jádrem, které je odolné proti smyku. Takovou struktura řadíme k vrstveným konstrukcím [2].



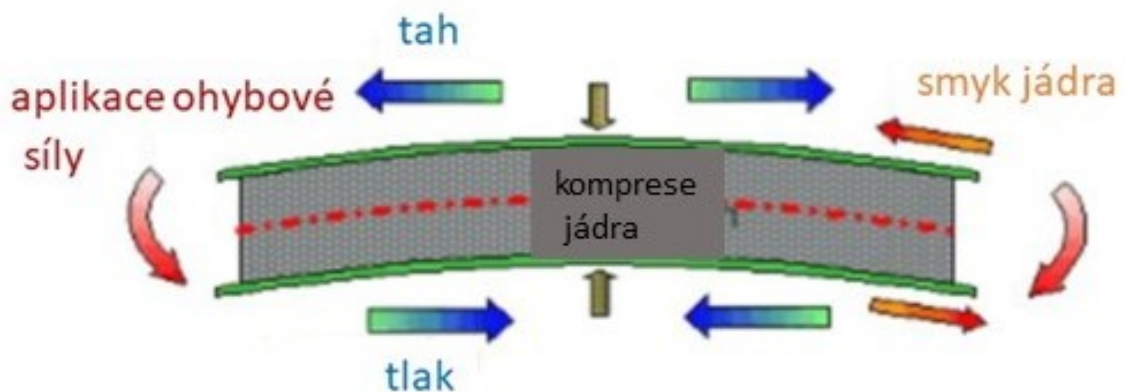
Obrázek 1: Schéma vrstev sendvičové konstrukce [3]

1.1 Vlastnosti sendvičových konstrukcí

Sendvičové konstrukce našli své uplatnění zejména v letecké a dopravní technice, kde se využívá jejich předností, což jsou ohybová pevnost a tuhost při nízké hmotnosti. Sendviče se však objevují i v dalších odvětvích průmyslu. Ohybová tuhost a pevnost nejsou jejich jedinými přednostmi. Mezi další výhody můžeme zařadit únavovou odolnost, odolnost proti šíření trhlin, odolnost proti rázům, tepelnou a akustickou izolaci. Tyto vlastnosti sendviče vychází ze zvoleného materiálu jádra [2, 4].

1.1.1 Tuhost a pevnost v ohybu

Ohybová tuhost sendviče je přímo úměrná druhé mocnině jeho tloušťky. Velkou výhodou je, že s růstem výšky sendviče dochází jen k malému zvětšení jeho hmotnosti. Tento fakt vychází z toho, že se zvětšuje pouze tloušťka velmi lehkého jádra, které má často hustotu okolo $80 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. Hodnota pevnosti v ohybu se také zvyšuje se vzdáleností potahů, ale při dimenzování sendvičové struktury musíme zároveň brát v potaz smykovou pevnost jádra. Obecně platí, že pevnost jádra ve smyku roste s jeho hustotou. O pevnosti sendviče v tlaku ve směru jeho výšky rozhoduje především pevnost jádra v tlaku, ale také tuhost a výška potahu. Pevnost v tlaku se zvyšuje s jeho hustotou. Voštinová jádra mají lepší mechanické vlastnosti, než jádra pěnová při shodné hustotě. Nicméně při výběru vhodného jádra sendviče je nutné zohlednit veškeré faktory, které budou na sendvič v praxi působit [2].



Obrázek 2: Ohyb sendvičové konstrukce [5]

Na obr. 2 můžeme vidět, jak na vnější vrstvy sendviče působí tahové a tlakové síly, zatímco jádrový materiál udržuje velikost průřezu a odolává smykovému zatížení. Jádro zde přenáší smykové zatížení z jednoho potahu na druhý [2].

V tabulce 1 můžete vidět porovnání homogenního materiálu a hliníkového sendvičového panelu se zvětšující se tloušťkou jádra. Z následující tabulky vyplývá, že pokud zvolíme sendvičovou strukturu s vhodnou tloušťkou jádra, poté takto vytvořená struktura dosahuje zvýšení tuhosti až 37krát a pevnosti v ohybu 9krát při pouze nepatrném zvýšení hmotnosti sendvičového panelu oproti homogennímu materiálu.

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

Tabulka 1: Porovnání homogenního materiálu se sendvičem [6]

Tuhost v ohybu

Tuhost v ohybu je dána součinem youngova modulu (E) a kvadratického momentu plochy (I) [7].

$$K_0 = E \cdot I [Nm^2] \quad (1)$$

Youngův modul

Youngův modul nebo také modul pružnosti v tahu se definuje jako poměr napětí v tahu (σ) a poměrného prodloužení (ϵ). Lze vyjádřit vztahem [8]:

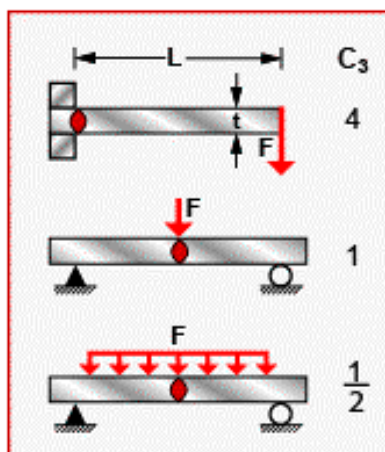
$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} [MPa] \quad (2)$$

Pevnost v ohybu

Pevnost v ohybu je dána následujícím vztahem [CES EduPack 9]

$$\sigma_{pevnost\ v\ ohybu} = C_3 \frac{F \cdot L}{b \cdot t^2} [MPa] \quad (3)$$

Kde b je šířka, t tloušťka, L délka, F zatížení nosníku



Obrázek 3: Konstanty pro výpočet pevnosti v ohybu [9]

2 VNĚJŠÍ VRSTVA SENDVIČOVÝCH STRUKTUR

Pohledové vrstvy sendviče jsou velmi tvrdé a pevné materiály. Nejčastěji používaným materiálem pro výrobu pohledových vrstev jsou lamináty, které jsou vyztuženy skelnými nebo uhlíkovými vlákny [10].

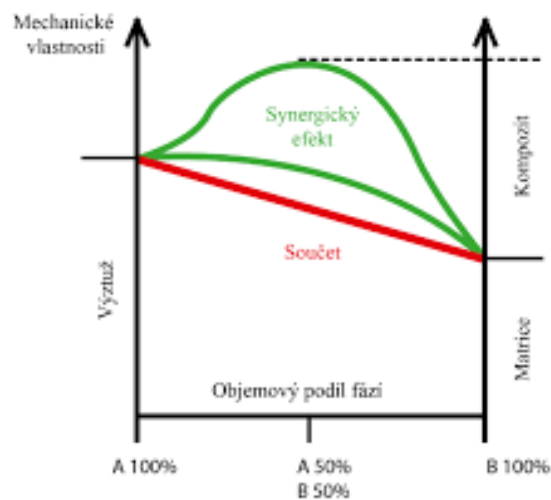
2.1 Kompozitní materiály (potahy)

Kompozit je pojem pro heterogenní materiál, který se skládá ze dvou odlišných materiálových složek, s vzájemně odlišnými mechanickými, fyzikálními a chemickými vlastnostmi. Základní materiálovou složkou kompozitu je matrice, ve které je uložena výztuž [11, 12].

2.1.1 Synergický efekt

Synergický efekt nastává u kompozitních materiálů, které se skládají nejméně ze dvou různých materiálových složek s odlišnými vlastnostmi. Takto vzniklý kompozit má mnohdy lepší vlastnosti, než které by se dali předpokládat pouhým součtem vlastností jednotlivých složek [11].

Příkladem synergického efektu je grafitové vlákno, které má velmi dobré mechanické vlastnosti, ale oxiduje. Můžeme použitím matrici z hliníkové slitiny, která neoxiduje, ale s rostoucí teplotou ztrácí pevnost. Vzniklý kompozit z grafitových vláken s matricí z hliníkové slitiny je do 500 °C pevný díky grafitovému vláknu a zároveň neoxiduje díky vlastnostem hliníkové slitiny [13].



Obrázek 4: Synergický efekt u kompozitních materiálů [14]

2.1.2 Kompozitní materiál v historii

Příroda používá kompozitní materiál již dávno. Skvělým kompozitem jsou kosti, pavoučí vlákno, dřevo. To všechno obsahuje kombinaci pevných a pružných vrstev a dodává výslednému produktu obdivuhodné vlastnosti. Naši předkové využívali kompozity různým způsobem. Historicky první aplikace kompozitního materiálu byla výroba nepálených cihel, které se vyráběly z hlíny a jílu, kde jako výztuž byla použita nasekaná sláma nebo různá vlákna rostlinného původu. Takovéto cihly se používali již 800 let před naším letopočtem v Izraeli [15].

2.1.3 Matrice

Matrice nebo také pojivo je pojem pro materiál, kterým se prosycuje systém vláken tak, že po zpracování vznikne tvarově stálý výrobek. Vzniklá surovina se označuje jako kompozit [10].

Úkolem matrice je zaručení geometrického tvaru, přenos sil a ochrana vláken, tj. [10]:

- Přenos namáhání na vlákna
- Převod namáhání z vláken na vlákno
- Zajištění geometrické polohy vláken a tvarové stálosti výrobku
- Ochrana vlákna před vlivy okolí

U polymerních kompozitů se matrice rozdělují do dvou skupin a to na termosety (reaktoplasty) a termoplasty. Do první skupiny termosetů řadíme reaktivní pryskyřice, které se často používají při výrobě kompozitů. Jsou to kapalné nebo tavitelné pryskyřice, které se buď samostatně, nebo za pomoci tvrdidel vytvrzují. Reaktivní pryskyřice se také mohou označovat jako licí, laminační, impregnační nebo prosycovací pryskyřice. K nejdůležitějším typům reaktivních pryskyřic patří [10]:

- Nenasycené polyesterové pryskyřice
- Epoxidové pryskyřice
- Fenolické pryskyřice

Druhou skupinu tvoří termoplasty, které jsou za normální teploty pevné látky a teprve po zahřátí na teplotu vyšší než 200 °C jsou dostatečně tekuté pro zpracování. Pro vyztužení termoplastů se používají tři druhy vláken tj. [10]:

- Krátká vlákna ($\approx 0,2$ mm) – vyztužení a zesílení matrice při vstřikování
- Dlouhá vlákna (až do 25 mm)
- Nekonečně dlouhá vlákna – termoplasty vyztužené skelnou rohoží

2.1.4 Vyztužující vlákna

K vyztužení matrice a následnému vytvoření kompozitu se používají vlákna s vysokou měrnou pevností, příp. tuhostí. Vyztužující vlákna mohou být skleněná, aramidová, uhlíková a přírodní. Přírodní vlákna jsou např. z bavlny, celulózy nebo azbestu [10].

Skleněná vlákna

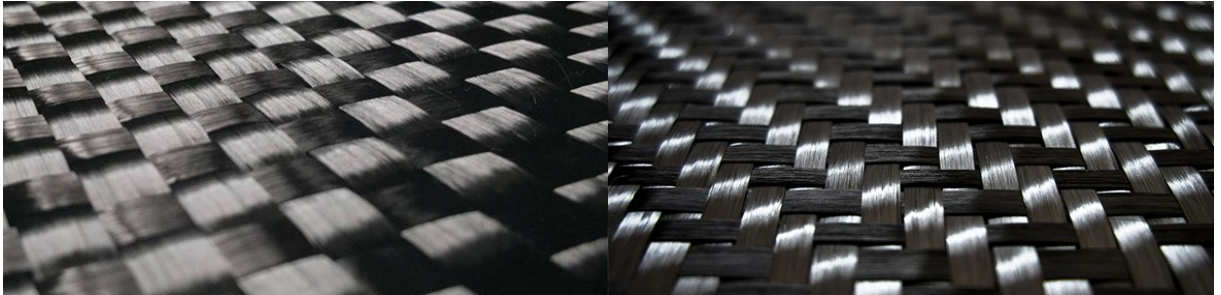
Skleněná vlákna nebo také textilní skleněná vlákna jsou společný název pro vlákno kruhového průřezu obvykle v průměru 3,5 až 24 μ m, které se vyrábí tažením z roztavené skloviny rychlostí až 400 $m \cdot min^{-1}$. Tímto způsobem se vyrábí různé druhy skleněných vláken. Nejběžnější skleněné vlákno se vyrábí z bezalkalické skloviny, označuje se jako E-vlákno, které je velmi dobrým elektrickým izolantem. Sklovina s vyšším obsahem SiO_2, MgO a Al_2O_3 má vyšší pevnost v tahu a vyšší modul pružnosti ve srovnání s E-sklovinou. Označuje se jako R-sklovina. Tato vlákna se používají v letecké a raketové technice, kdy největší využití dosahují pro konstrukci listů rotorů helikoptér. Dále známe C-sklovinu s vysokou odolností proti kyselinám a proti chemicky agresivním látkám. V porovnání s E-sklovinou má C-sklovina horší mechanické vlastnosti. L-sklo je speciálním druhem s vysokým obsahem olova. Olovo zvyšuje nepropustnost rentgenového záření, proto má využití v lékařství, vědeckých přístrojích a vojenské technice [10].

Uhlíková vlákna

Uhlíková vlákna jsou technická vlákna s extrémně vysokou pevností, tuhostí a tepelnou odolností. Uhlíková vlákna se vyrábí ze tří materiálů:

- 1) celulóza – vyrobená vlákna mají méně dokonalou strukturu, používají se jako izolační materiál pro vysoké teploty (motorsport ochrana výfukových svodů)
- 2) polyakrylonitril (PAN) – z tohoto materiálu se uhlíková vlákna vyrábí od roku 1980 a v dnešní době se považují jako standartní vlákna. V porovnání se skelnými vlákny je cena PAN vlákna desetinásobná až stonásobná.
- 3) smola, ze které se nákladným způsobem vyrábí vlákna, jejichž konečná cena je vzhledem k nízké ceně výchozí suroviny příznivá.

Světová kapacita výroby uhlíkových vláken v roce 2004 byla 35 600 tun. Polovina z celkového množství byla využita na průmyslové aplikace (lopatky větrných elektráren, tlakové nádoby, automobilový průmysl, stavba lodí), více než třetinu na aplikace v letectví a šestinu na sportovní vybavení [10].



Obrázek 5: Rohož z uhlíkových vláken [16]

Aramidová vlákna

Aramidová vlákna jsou vlákna na bázi lineárních organických polymerů, které se vyznačují vysokou pevností a tuhostí vláken. Název aramid vzniklo jako zkratka pro „aromatický polyamid“. Používají se ve vojenské technice pro výrobu neprůstřelných vest a panelů, v pneumatikách osobních automobilů nahrazují aramidová vlákna ocelové kordy (letecké pneumatiky), náhrada azbestu ve směsích pro brzdové obložení. Aramidová vlákna se rozdělují do dvou skupin na meta-aramidová a para-aramidová vlákna. Meta-aramidová vlákna jsou známá pod obchodním názvem Nomex. Tento druh vláken se vyznačuje odolností vůči teple, a proto se používají pro výrobu ochranných oděvů, filtrace vzduchu, tepelné izolace a brzdová obložení. Para-aramidová vlákna jsou známá pod obchodním názvem Kevlar a mají dobré mechanické vlastnosti, jako vysoký modul pružnosti, vysokou pevnost v tahu, vysokou odolnost proti otěru a nárazu. Na základě těchto vlastností, se para-aramidová vlákna využívají jako tkanina pro neprůstřelné vesty, helmy a také jako kotevní lana lodí [10].

2.2 Produkty z vláken

Jednotlivá vyztužující vlákna jsou samostatně používána jen výjimečně. Z důvodu lepší zpracovatelnosti se aplikují upravené produkty. Následující pojmy jsou uvedené pro skelná vlákna, ale většinou platí i pro ostatní druhy vláken [10].

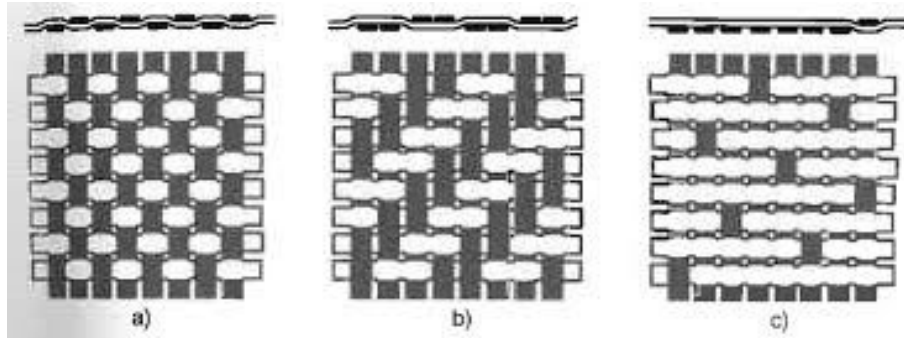
- Příze – vyrábí se spřádáním z vláken a následně se dále zpracovává na tkaniny, pásy a pletené výrobky [10].

- Nitě (skaná příze) – jsou vyráběny jedno- nebo vícestupňově. Struktura nití se skládá z jedné nebo více přízí, které jsou společně spředeny. Další zpracování probíhá podobně jako u příze [10].
- Roving (pramenec) – skládá se z 20 až 60 konců, sdružených z rovnoběžně uložených nestočených vláken, které se navinují na cívku [10].
- Spředený roving – spřádá se z vláken stočených kolem podélné osy [10].
- Rohože ze sekaných pramenců – tato netkaná plošná výztuž se vyrábí z 25 nebo 50 mm dlouhých sekaných vláken nepravidelně plošně uložených. Vláknata jsou uložena do vrstev, naimpregnována pryskyřicí a po vysušení v pásové sušárně spojena tak, že je vyrobenou rohož možné navíjet do rolí [10].
- Rohože z kontinuálních vláken – rohož z nekonečných skleněných vláken, která jsou nepravidelně uložena ve smyčkách v několika vrstvách a navzájem spojena pojivem. Při zpracování se lépe tvarují, než rohože ze sekaných pramenců [10].
- Povrchové (závojové) rohože – netkané plošné výrobky ze skleněných nebo termoplastických vláken, které se vkládají do povrchové vrstvy laminátu s vysokým obsahem pryskyřice, aby se zamezilo možnému vzniku trhlin. Zabraňují prorážení struktury hrubší výztuže na povrch a zesilují tenké vrstvy. Termoplastové povrchové rohože z polyethylentereftalátu zvyšují odolnost proti obrušování, ale jejich nevýhodou je nízká odolnost proti rozpouštědlům, zatímco rohože z C- skloviny, jsou vůči rozpouštědlům odolné [10].
- Krátká vlákna – mletá a na jednotlivá elementární vlákna rozptýlená vlákna o různé délce (0,1 až 5 mm), používaná pro vyztužení termoplastů [10].
- Tkaniny – plošné výrobky z vláken nebo pramenců uložených pravoúhle v útku (podélná vazba) a osnově (příčná vazba), které působí výztužně ve dvou směrech. Při zvýšení množství vláken v osnově vznikají rozdílné typy křížení vláken, které se nazývají vazby [10].

2.2.1 Druhy vazeb vyztužujících tkanin

- Plátňová vazba – jedná se o základní vazbu s jednoduchým zpracováním tkaniny. Při zpracování si zachovává rozměrovou stálost. V místě řezu vzniká malý otřep [10].

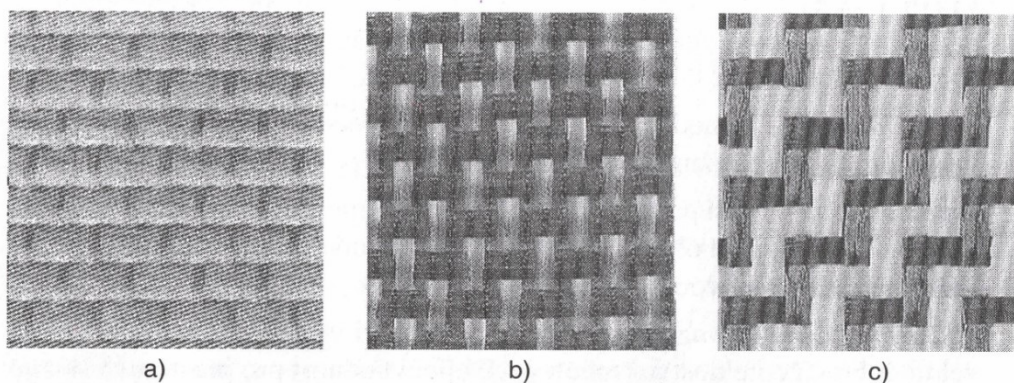
- Keprová vazba – má vyšší tuhost a pevnost laminátu, díky menšímu zvlnění vláken. Tkanina je ohebnější, a proto je vhodnější pro výrobu tvarově složitých prvků, než tkaniny s plátnovou vazbou [10].
- Atlasová (saténová) vazba – vychýlení vláken je menší než u keprové vazby, má velmi dobrou řasitelnost, a proto je vhodná pro prostorově složité prvky. Atlasová tkanina umožňuje dosáhnout kvalitního povrchu [10].



Obrázek 6: a) plátnová vazba, b) keprová vazba, c) atlasová (saténová) vazba [10]

2.2.2 Tkaniny s různou skladbou vláken v útku a osnově

- Jednosměrná tkanina – osnova je fixována pomocí tenkého vlákna v útku. Osnova laminátu může obsahovat více vláken, při zachování stejného podílu pojiva. Vhodné pro aplikace vyžadující vysokou pevnost a tuhost při jednosměrném namáhání (např. výroba lyží) [10].
- Směsná tkanina – v osnově a útku jsou použity odlišné druhy vláken. Tudiž např. v jednosměrné tkanině z uhlíkových vláken můžeme použít útek ze skelné příze, která je ekonomicky výhodnější, než útek z uhlíkových vláken, ale pouze za předpokladu, že není v příčném směru požadována vysoká tuhost [10].
- Hybridní tkanina – tyto tkaniny využívají kladné vlastnosti jednotlivých typů vláken, které kombinují do jedné tkaniny. Můžeme využít rázové houževnatosti aramidového vlákna a spojit je s tuhostí uhlíkových vláken [10].



Obrázek 7: a) jednosměrná tkanina, b) směsná tkanina, c) hybridní tkanina [10]

2.3 Prepregy

Název prepreg je zkratka pro anglický výraz preimpregnated fibres neboli předimpregnovaná výztuž. Jedná se o výrobní polotovar, kdy je tkanina již naimpregnovaná pryskyřicí a odpadá nám složitý a časově náročný krok prosycování výztuže. Prepreg se vyrábí pomocí speciálního zařízení, které zaručuje stále stejné a kontrolovatelné vlastnosti polotovaru, což má velký vliv na kvalitu a vlastnosti budoucího výrobku. Velkou nevýhodou prepregu je, že se musí skladovat při teplotě $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ v mrazicím boxu a to maximálně po dobu 6 měsíců [10].

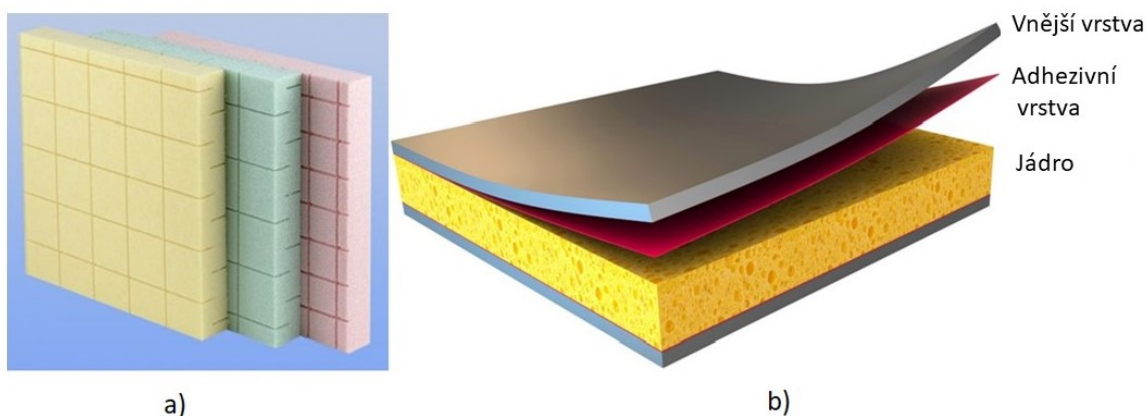
Dílce z prepregu se nejčastěji vyrábí pomocí metody lisování ve vakuu, lisování ve vyhřívané formě nebo v autoklávu. V leteckém průmyslu se uplatnila částečně automatizovaná metoda výroby konstrukčních dílů, kdy přířezy z prepregu se ukládají pomocí číslicově řízených strojů na stěnu formy [10].

3 JÁDRA SENDVIČOVÝCH STRUKTUR

Jádra sendvičových struktury slouží jako výplň mezi dvě pohledové vrstvy, které přenáší smykové napětí. Podle druhu zvoleného materiálu, mají jádra různé vlastnosti např. tlumení rázů, tepelná nebo zvuková izolace. V následující kapitole jsou uvedeny vybrané jádrové materiály a konstrukce [2, 4].

3.1 Pěny

Pěny jsou skupina materiálů, které se nejčastěji používají jako jádro u sendvičových struktur. Polotovar je formou pěnových bloků, které se vyrábí z mnoha druhů polymerů. Většina pěn se vyrábí v podtlakové komoře, kdy se vstříkne plyn do tekutého polymeru a následným růstem bublin v polymeru vzniká pěna [17].



Obrázek 8: a) pěnové bloky, b) schéma sendvičové struktury s pěnovým jádrem [18, 19]

Typy polymerních pěn:

- Polyvinylchlorid – PVC
- Polyuretan – PUR
- Polystyren - PS
- Polypropylen - PP
- Fenolická pěna
- a další

Hustota pěn se pohybuje v rozmezí $1,6 - 960 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. Do hlavních aplikací může zahrnout výroba nábytku, nápojových a jídelních obalů, dětské hračky, těsnění, sportovní potřeby, obuv. Pěny mají schopnost pohlcovat zvuk a nárazy, proto slouží jako zvuková a nárazová

izolace v automobilovém průmyslu. Nízkohustotní pěny se používají jako obalový a transportní materiál [17].

3.1.1 PVC pěna

Polyvinylchlorid někdy známý jako vinyl, je druhým nejvíce zpracovávaným plastovým materiálem na světě hned za polyetylenem. Základní surovina pro výrobu PVC je monomer vinylchloridu, který vzniká rozpadem 1,2 – dichlorethanu. Polymerací do dlouhých řetězců, vzniká bílý prášek nebo granulát. Polymer se poté mísí s různými přísadami, které zlepšují jeho vlastnosti pro námi vybrané použití tohoto materiálu [17].

3.1.2 PUR pěna

Polyuretanová pěna vzniká reakcí chemických látek za použití nadouvadla. PUR pěny při vzniku vytváří uzavřenou mikroskopickou buněčnou strukturu, která má výborné tepelné a zvukové izolační vlastnosti. PUR pěny se rozdělují na měkké a tvrdé. Měkké pěny se používají na reklamní předměty, čalounění nábytku a interiérů automobilů. Tvrdé pěny mají uplatnění ve stavebnictví jako výplně izolačních panelů, foukané izolace střech nebo jádro sendvičových struktur [20].

3.1.3 Polystyren

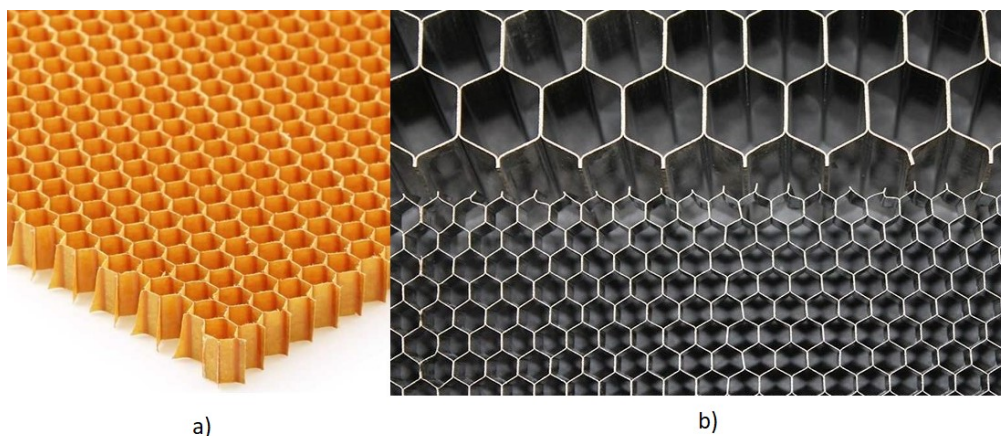
Mezi nejznámější pěny můžeme zařadit polystyren. Vyrábí se vypěněním do kvádrových forem a následným řezáním pomocí odporového drátu na desky a jiné tvary (válce). Mezi výhody můžeme zařadit nízkou cenu. Nevýhodou tohoto materiálu je malá pevnost v tlaku a tedy nevhodnost použít pro konstrukce s velkým zatížením. Polystyren se používá v potravinářství pro výrobu jednorázového nádobí, v nábytku jako výplň sedacích pytlů, ve stavebnictví jako tepelně a zvukově izolační materiál ve formě desek. Slouží také jako jádro sendvičových struktur především ve sportovním vybavení (surfové prkno) [21].

3.1.4 Polypropylen

Polypropylen je považován za nejběžněji používaný plast. Výhodou polypropylenu je velmi dobrá chemická a mechanická odolnost, a proto se s ním setkáváme v chemickém, potravinářském a textilním průmyslu. Používá se pro výrobu vodovodního potrubí, izolace elektrických kabelů, syntetického textilního vlákna, obalový materiál pro potraviny [22].

3.2 Voština

Voštiny jsou jádrové prvky sendvičové konstrukce. Pojem voština je odvozen od šestiúhelníkové konstrukce buněk včelích pláství. Buňky mohou mít v sendvičové konstrukci různou velikost, délku i tvar. Voština přináší množství výhod jako např. dobré mechanické vlastnosti, odolnost vůči nárazu, zvuková izolace.



Obrázek 9: a) aramidová voština, b) voština z hliníku s různou velikostí buněk [23, 24]

3.2.1 Materiál voštiny

Jako vstupní materiál pro výrobu voštiny se používají skleněná, aramidová nebo uhlíková folie. V některých případech se používá kovový materiál (hliník, nerezová ocel, titan). V leteckém průmyslu se nejvíce používají voštiny z hliníku, aramidu nebo PVC [2, 25].

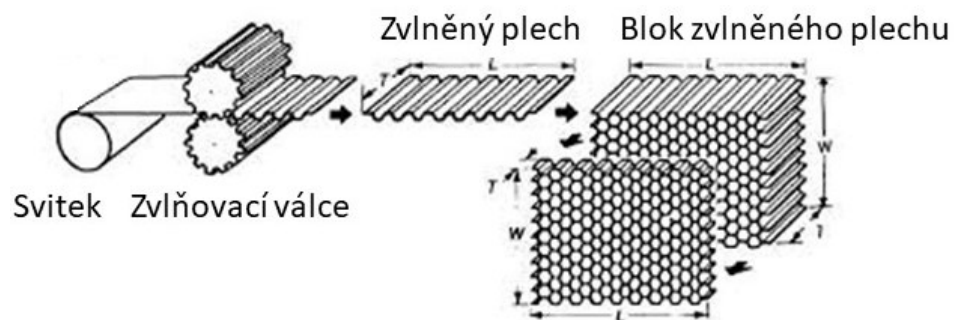
Hliníková voština jako panel má množství výhod. Je lehká, tuhá, nehořlavá, antikorozi. Z tohoto důvodu se používají v různých odvětvích. Ve veřejné dopravě jsou to např. podlahy, dveře, stropy tramvají a vlaků. Ve stavebnictví jsou to především panely, ze kterých jsou postaveny skladové haly [26].

Aramidová voština známá pod obchodním označením Nomex se vyrábí z papíru z aramidových vláken. Jednotlivé vrstvy jsou spojeny pomocí fenolové pryskyřice. Výsledná voština je korozivzdorná, zpomaluje hoření a má dobré tepelně-izolační vlastnosti. Využití nachází v leteckém průmyslu, jako části letadla (interiérové zdi a podlahy, úložné prostory, motorové gondoly) [27].

Papírová voština může tvořit konstrukční prvek nebo obalový materiál, který se vyrábí z papíru o různé gramáži. Takto vytvořená voština dosahuje dobré pevnosti a tuhosti při nízké hmotnosti, je odolná proti nárazům a díky recyklovatelnosti papíru, má malý dopad na životní prostředí. Další výhodou je malá ekonomická náročnost tohoto materiálu. Papírová voština se používá jako výplň dveří, nábytku, výroba kartonových krabic [28].

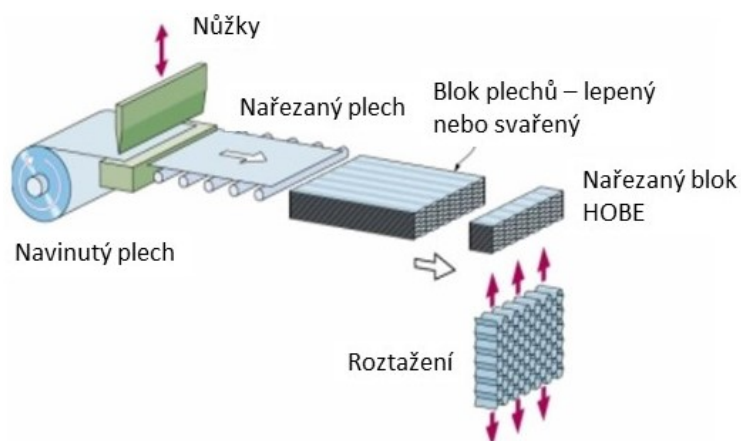
3.2.2 Výroba voštinové struktury

Celosvětově nejpoužívanější metoda pro výrobu voštin je metoda formování. Voština se vyrábí z plošného materiálu, který je navinut na cívce. Z cívky je odvíjen mezi dva válce, kde dojde ke zvrpování (jsou vylisovány příčné vlny), poté se návin rozstříhá na listy. Spojením dvou listů získáváme panel s šestihranými dutinami v příčném směru. Listy se spojují pomocí pryskyřice, nebo se svařují (pokud jsou listy z kovu). Po vysušení pryskyřice, se panely nastříhají v podélném směru. Tímto nastříhané voštiny mohou mít různou tloušťku. Při výrobě sendvičové konstrukce, která se skládá z voštiny a pohledové vrstvy se na voštinu nanese folie, která se za zvýšené teploty roztaví a slepí pohledové vrstvy s voštinou. Vzniká sendvičový panel [25].



Obrázek 10: Metoda výroby voštiny formováním [29]

Druhou metodou výroby voštin je metoda HOBE (honeycomb before expansion). Název této metody může přeložit jako voština před expanzí. Výroba probíhá tak, že z cívky je odvíjen plech, který se nastříhá na určitý rozměr. Plechy se naskládají na sebe a poté se v podélném směru spojí v určitém rozestupu. Spojování se provádí lepením nebo svařením. Takto spojené plechy se rozřežou na určitou tloušťku v kolmém směru na rovinu spojů. Posledním krokem je roztažení plechu od sebe, čímž vznikne hexagonální tvar buněk [2].



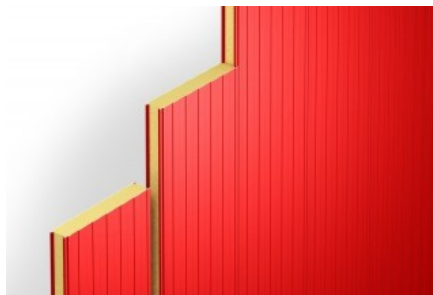
Obrázek 11: Výroba voštiny metodou HOBE [30]

4 APLIKACE SENDVIČOVÝCH KONSTRUKCÍ

Sendvičové konstrukce nachází své využití v mnoha oblastech průmyslu. Jsou využívány především tam, kde se od výrobku požaduje nízká hmotnost, zpevnění konstrukce a další vlastnosti sendviče, které běžně používané materiály nenabízí. Hlavní využití se nachází v letecké a kosmické technice. Dále ve stavebním průmyslu, kolejové nebo automobilové dopravě. Speciální uplatnění nachází ve sportovním odvětví při výrobě oštěpů, lyží, snowboardů nebo tenisových raket. Další výhodou konstrukce sendvičových struktur je, že můžeme kombinovat jádra a pohledové vrstvy z různých materiálů a vyrábět tak panely přímo pro danou potřebu.

4.1 Stavební průmysl

Ve stavebním průmyslu se používá sendvičová struktura jako panel pro opláštění železobetonových skeletů. Tento panel má jádro z polyuretanové pěny, které má velmi dobré tepelně i zvukově izolační vlastnosti při nízké hmotnosti. Tenké pohledové vrstvy z ocele nebo hliníku chrání jádro před působením vlhkosti, nevlídným počasím, ultrafialovým zářením nebo před mechanickým poškozením [31].



Obrázek 12: Stavební panely s pěnovým jádrem a kovovým potahem [31]

4.2 Železniční doprava

V železniční dopravě se sendvičové panely používají při výrobě částí interiéru nebo pro výrobu přední části vlaku. Tato část slouží jako bezpečnostní prvek, kdy během srážky s předmětem pohlcuje velké množství kinetické energie a tak chrání cestující i obsluhu vlaku [32].



a)

b)

Obrázek 13: a) Japonský rychlovlak Šinkansen, b) Interiér vlaku s voštinovou konstrukcí [32, 33]

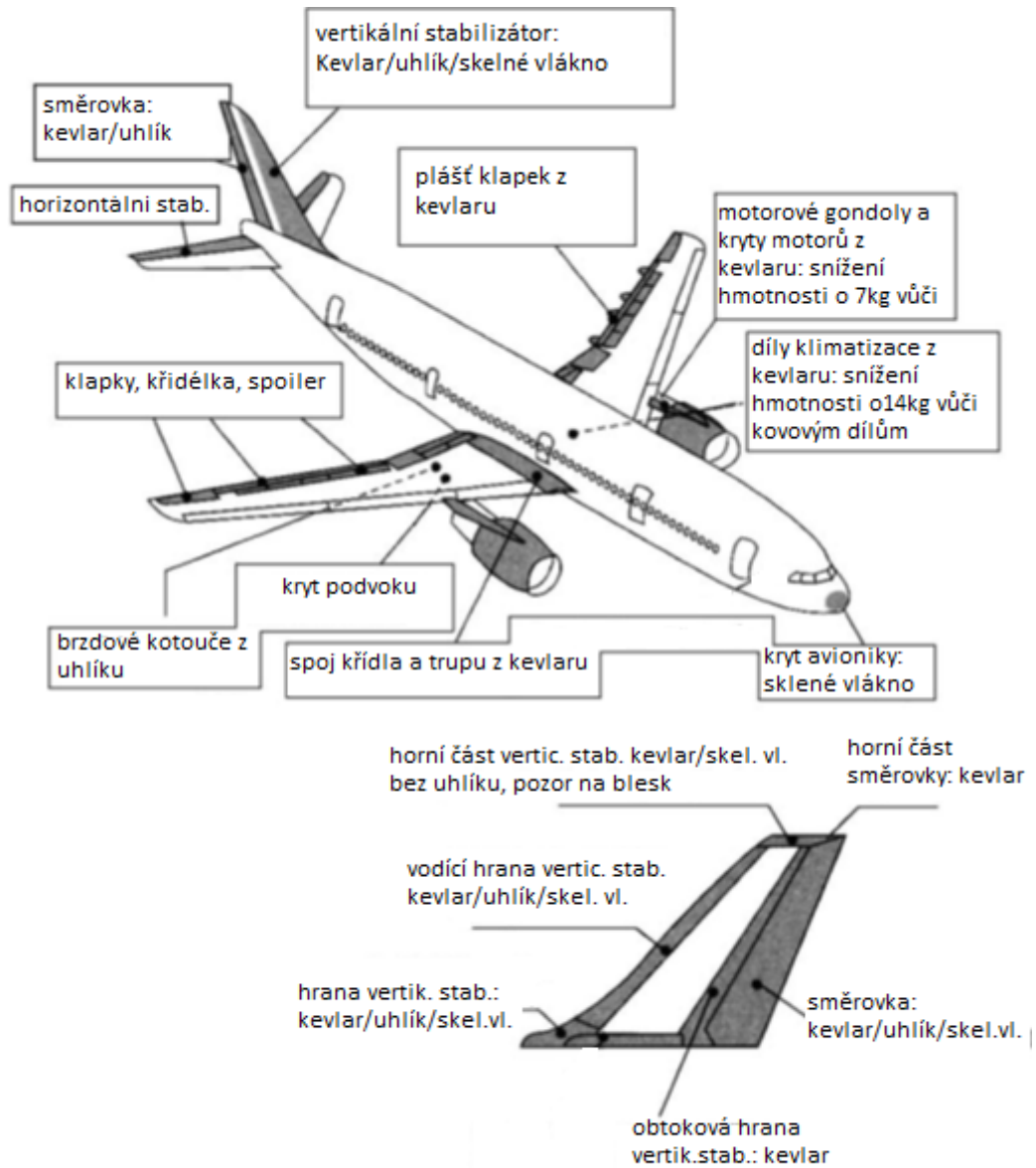
4.3 Zdravotnictví

Pro potřeby zdravotnictví se vyrábí nemocniční lůžka, na kterých mohou pacienti ležet i během rentgenování. Lůžko je vyrobeno ze sendvičového panelu z uhlíkového vlákna s pěnovým jádrem. Díky sendvičové struktuře má lehátko nízký koeficient útlumu rentgenového záření a zároveň dosahuje dostatečné hodnoty ohybové tuhosti a pevnosti při nízké celkové hmotnosti [2].

4.4 Letecký průmysl

Sendvičová struktura je použita při výrobě interiérových stěn, přepážek, krytů podvozkových gondol, výškových a směrových křidélek nebo zavazadlových schránek, které jsou umístěny nad cestujícími. Schránka musí být pevná a dostatečně tuhá, aby unesla hmotnost zavazadel a zároveň lehká pro úsporu celkové hmotnosti letadla a tím snížila náklady na provoz letadla [34].

Dalším příkladem využití sendvičové struktury je ocasní část letadla Airbus A 310-300, která se skládá z potahu z uhlíkových vláken a jádro tvoří aramidová voština. Díky použití sendviče, došlo ke snížení hmotnosti ocasní části o 300 kg, ale také se snížil počet dílů z 2000 na 100 [35].



Obrázek 14: Příklady použití sendvičové struktury na ocasní části Airbusu A 310-300 [36]

5 TECHNOLOGIE VÝROBY

Jak již zaznělo v předchozích kapitolách, sendvičová struktura se skládá ze dvou pohledových vrstev a jádra. Výrobu sendvičové struktury rozdělujeme podle přístupu výroby do dvou skupin. V případě, že je vstupní materiál pro pohledovou vrstvu polotovar (hliníkový plech), je cílem technologického procesu zaručit spojení jádra s pohledovou vrstvou. Tato metoda se označuje jako suchá metoda. Suchá metoda využívá výrobní procesy např. metoda vakuového lisování a kontinuální lisování [37].

Druhý přístup reprezentuje výrobu laminátové vrstvy sendvičového panelu vytvrzením a tvorbou vazby vznikajícího laminátu na jádře. Vstupním materiálem jsou tekuté reaktoplastické pryskyřice, tudíž je tato metoda označována jako mokrá. Výrobní technologie pro mokrou metodu jsou ruční laminování, stříkání laminátů, vysokotlaké vstřikování (RTM), lisování v autoklávu [37].

5.1 Suchá metoda výroby sendvičové struktury

5.1.1 Vakuové lisování

Při této metodě dochází k lisování vrstev sendvičové struktury pomocí vakua. Technologický postup této metody je následovný. Na povrch pohledové vrstvy se nanese vrstva pryskyřice a přiloží se jádro. Následně se jádro zakryje separační folií, na kterou se položí odsávací tkanina a forma se utěsní pomocí fólie a těsnící pásky. Připojením čerpadla se celé forma vakuuje. Dochází ke stlačení formy a odstranění vzduchových bublin v laminátu. Díky atmosférickému tlaku dochází ke zhutnění laminátu. Přebytná pryskyřice je zachycena do odsávací tkaniny. Výhodou této metody je jednoduchost výrobního procesu. Touto metodou se však nedají vyrábět rozměrné dílce [10].

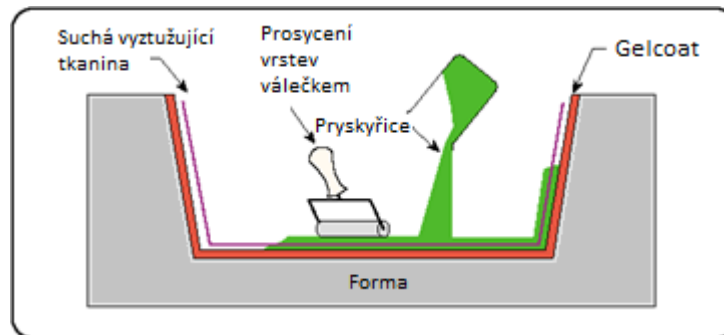
5.2 Mokrý metoda výroby sendvičové struktury

5.2.1 Ruční laminování

Jedná se o velmi jednoduchou a levnou výrobu pohledových vrstev, který je vhodný pro malé série, prototypy a velkoplošné díly. Výztuže ve formě tkanin nebo rohoží jsou vkládány do formy, kde se poté ručně nasatí pryskyřicí pomocí ručního náradí (váleček, štětec). Pryskyřice se vytvrzuje při standardních atmosférických podmínkách.

Výhodou této metody je jednoduchost výrobního procesu, malé náklady na výrobu a výrobní vybavení. K výrobě stačí pouze forma, výztuž, pryskyřice, ruční náradí.

Zápornou stranou této metody je nízká produktivita práce, velké náklady na manuální práci, nízká pevnost laminátu, znečištěné pracoviště. Ruční laminování se využívá na výrobu karoserií dopravních prostředků (autobusy, vlaky) a výrobu lodí [2].

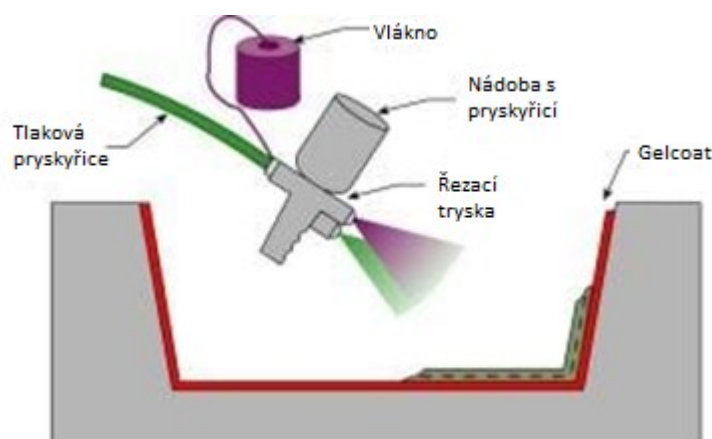


Obrázek 15: Výroba kompozitu ručním laminováním [38]

5.2.2 Stříkání laminátů

Dalším zástupcem jednoduché výroby laminátu je stříkání. Tato technologie se používá při výrobě velkoplošných dílů a pro malosériovou výrobu. Pryskyřice a další složky se nanáší spolu s nasekanými pramenci na formu pomocí stříkacího zařízení. Délka nasekaných pramenců je 20 až 50 mm [10].

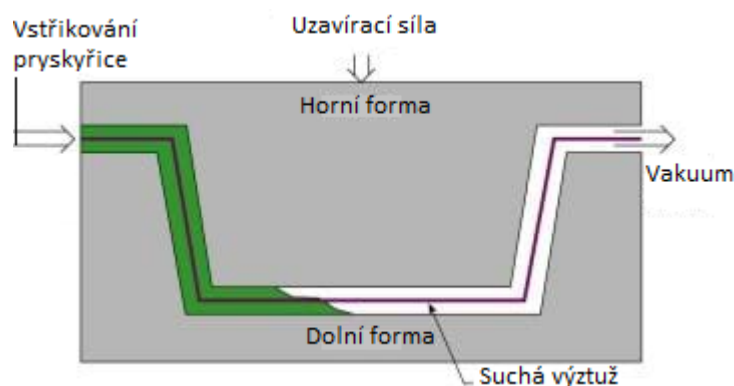
Hlavní výhody této metody jsou nízké náklady na nástroje, rychlý způsob nanášení vláken s pryskyřicí, dlouhodobě používaná a ověřená metoda. Mezi nevýhody můžeme zařadit velkou hmotnost výrobku způsobenou nadměrným množstvím pryskyřice v laminátu. Při výrobě se používají pouze nasekaná vlákna, tudíž výrobek má horší mechanické vlastnosti. Pryskyřice, které jsou používány v nanášecím zařízení, obsahují velké množství styrenu, který je pro obsluhu škodlivý a je nutné používat ochranné pomůcky. Pomocí této metody se vyrábí lehce zatěžované konstrukční panely např. obytné nástavby, kapotáže nákladních vozidel, vany a malé čluny [39].



Obrázek 16: Stříkání laminátů [39]

5.2.3 Vysokotlaké vstřikování RTM (resin-transfer-moulding)

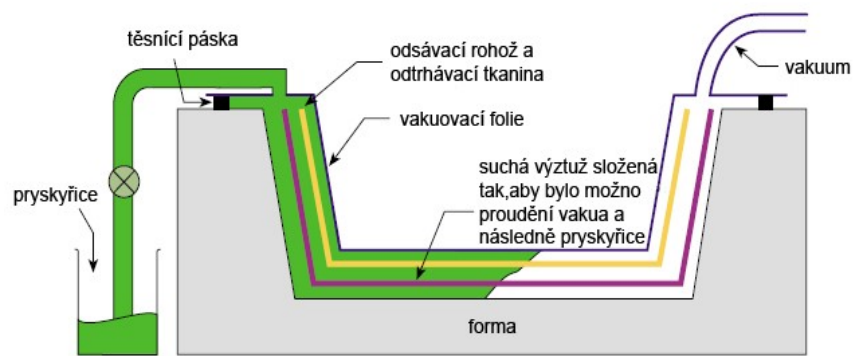
Při této metodě se používá dvoudílná uzavřená forma, do které se vloží výztuž. Materiál výztuže mohou být různé druhy skelných vláken nebo pěnové jádro pro zvýšení ohybové pevnosti. Použité formové zařízení je většinou z laminátu, nebo při větších sériích z ocele. Oba díly formy se zajistí pomocí uzavíracího zařízení. Pryskyřice se do formy vstříkuje pod tlakem max. 5 barů. Následné použití vakua napomáhá prosycení výztuže a odstranění bublin z pryskyřice. Aplikací vytápěných forem zkracujeme výrobní časy a snižujeme viskozitu pryskyřice, což má za následek prodloužení zatékačí dráhy. Vysokotlaké vstřikování se používá pro výrobu částí letadel, automobilů [10].



Obrázek 17: Vysokotlaké vstřikování RTM [40]

5.2.4 Vakuová infuze

Vakuová infuze používá podtlak pro distribuci pryskyřice v položených vrstvách výztuže. Výztuže jsou na sucho položeny do dutiny formy. Na takto připravenou výztuž se pokládají další technologické vrstvy včetně odsávací rohože, separační tkaniny a vakuové folie. Pryskyřice je dopravena pomocí systému hadiček a podtlaku do připravené výztuže. Mezi výhody řadíme vyšší pevnost výrobků a jejich vysokou kvalitu, možnost výroby rozměrných výrobků a ochrana zdraví obsluhy, protože vakuová folie nepropouští škodlivý styren, který obsahuje pryskyřice. Nevýhodou této metody jsou vysoké náklady na výrobu, náročnost na přesnost technologického procesu a s tím spojená potřeba kvalifikovaných pracovníků. Své využití si tato metoda nachází v dopravním průmyslu, v lodním průmyslu a v energetice, kde se jedná o výrobu lopatek větrných elektráren [2].



Obrázek 18: Vakuová infuze [2]

5.2.5 Lisování v autoklávu

Autokláv je speciální vyhřívaná tlaková nádoba, ve které působí na nakladené prepregy vakuum, teplota a tlak. Kombinací přetlaku, teploty a vakua dochází ke kvalitnímu zhutnění a odstranění vzduchových bublin z laminátu. Lisování v autoklávu je ekonomicky náročná metoda a doporučuje se pouze pro malosériovou výrobu. Na formu je nejprve nakladen prepreg, poté odsávací rohož, separační tkanina a vakuová folie. Takto připravená skladba se vloží do vyhřívaného autoklávu. Ve velkosériové výrobě leteckých nebo kosmických dílů mohou být prepregy kladeny do forem ručně, ale pro zlepšení efektivity práce se používají speciální zařízení, které jsou řízeny počítačem. Nejčastěji používané prepregy jsou na bázi skleněných, uhlíkových nebo aramidových vláken v kombinaci s epoxidovou matricí. Tyto prepregy se vytvrzují při teplotě 120-200 °C. Metoda lisování v autoklávu našla uplatnění při výrobě nejnáročnějších struktur pro kosmický a letecký průmysl (ocasní směrovky airbusů), závodní automobily (segmenty monopostu F1) [10, 41].



Obrázek 19: a) forma uvnitř autoklávu, b) pohled na Autokláv [42, 43]

6 LEPENÍ VRSTEV SENDVIČOVÉ STRUKTURY

Pro volbu správného lepicího systému je potřeba posoudit několik činitelů. Jedná se o mechanické zatížení lepené spáry, znalost samotných lepidel a spojovaných materiálů, výrobního procesu [44].

6.1 Typy lepených materiálů

Podmínkou správného lepení je znalost lepeného podkladu. Mezi důležité informace o lepeném podkladu řadíme: materiál, povrchové napětí a smáčivost. Z mechanických vlastností lepeného povrchu to mohou být např.: smykový modul, modul pružnosti, tepelná a chemická odolnost [44].

Posouzení, zda je povrch materiálu vhodný pro lepení se určuje podle měření povrchového napětí – smáčivost. Tento pojem definujeme jako schopnost kapaliny se rozprostřít po daném povrchu [44].

Abychom dosáhli dobré adheze povrchu, musíme zaručit dostatečné smáčení substrátu lepidlem. Je nutné, aby se lepidlo dostalo k materiálu na atomovou vzdálenost < 1 nm. Pokud k tomu dojde, je adheze zaručena [44].

Hlavním předpokladem pro dobrou smáčivost je dokonale suchý a čistý povrch lepeného dílce. Mezi další předpoklady řadíme volbu vhodného lepidla, které nemá příliš velkou viskozitu a nesmí mít vyšší povrchové napětí než je napětí substrátu [44].

6.2 Druhy lepidel

Lepidla rozdělujeme do dvou skupin na organická a anorganická. K zástupcům organických lepidel řadíme např.: epoxidy, polyuretany, silikony, vteřinová, kontaktní a tavná lepidla. V leteckém průmyslu a obecně v letectví se častěji používají lepidla organická [44].

Anorganická lepidla jsou např.: vodní sklo, asfaltová, fosfátová, silikátová, metalická a keramická lepidla [45].

6.3 Jak prostředí ovlivňuje lepený spoj

V praxi působí na lepené spoje prostředí, které negativně ovlivňuje jejich vlastnosti. V takovém prostředí může docházet ke střídání teploty, působení vlhkosti, působení UV záření a působení různých medií (rozpouštědla, oleje, soli, atd.). Čím více je toto prostředí agresivní, tím rychleji lepený spoj degraduje [44].

Vlivem působení vysoké teploty lepené spoje měknou nebo mohou zvětšovat svůj objem (dilatovat). V opačném případě při působení nízké teploty spoj bude tvrdý, křehký a zmenšuje svůj objem [44].

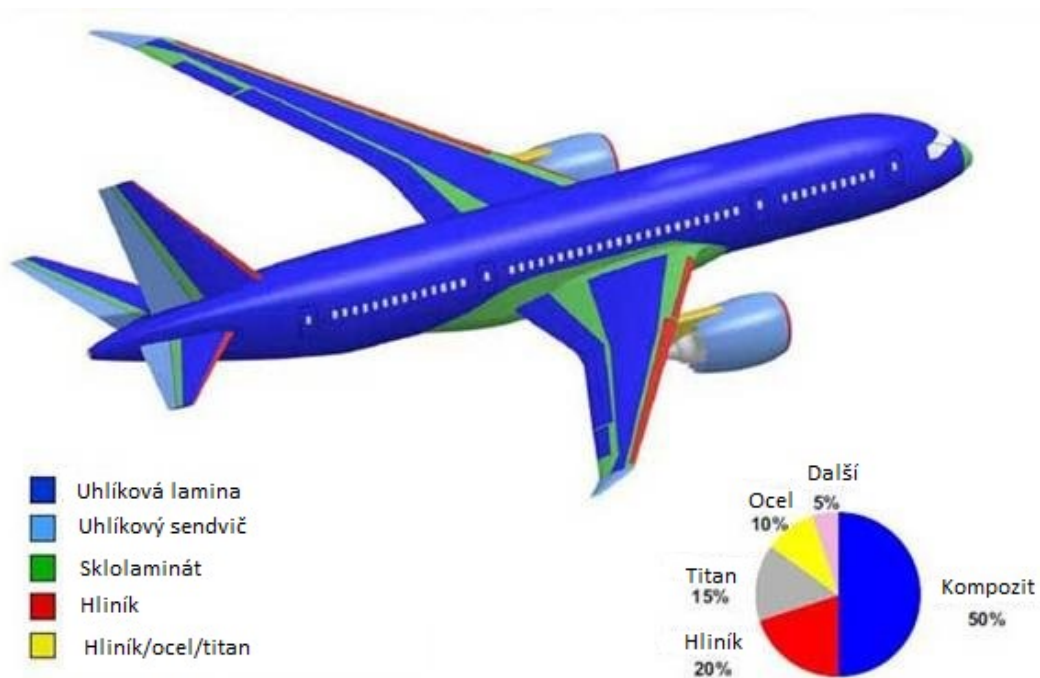
Pokud na lepidlo či lepený materiál působí chemické látky, dochází k ovlivnění jejich vlastností. Plastové výrobky měknou vlivem působení organických rozpouštědel. Pryže nejsou odolné před působením olejů. Materiály obsahující aditiva, která slouží ke změkčení a zlepšení ohebnosti výrobku, mohou vlivem zvýšené teploty přecházet z materiálu výrobku do vrstvy lepidla [44].

Velké množství těchto záporných vlastností může odzkoušet a posléze odstranit pomocí laboratorních zkoušek, které simulují reálné podmínky z praxe. Tyto simulace však nejsou stoprocentní, jelikož v praxi na lepený spoj působí několik faktorů najednou v dlouhodobém cyklu [44].

7 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY V LETECTVÍ

Hlavním úkolem leteckých inženýrů je vytvořit konstrukci o co nejnižší hmotnosti a výrobní pracnosti, při neustálém zvyšování spolehlivosti této konstrukce. Aby mohli dosáhnout těchto parametrů, musí upustit od využití tradičních materiálů a použít materiály kompozitní. Díky kompozitním materiálům s epoxidovou matricí, které jsou vyztuženy uhlíkovými vlákny, je možné ušetřit až 20 % hmotnosti při zlepšené funkčnosti [10].

Názorným příkladem novodobé konstrukce letadla je Boeing 787 Dreamliner na obrázku 20, kdy jeho konstrukce obsahuje až 50 % kompozitních materiálů.



Obrázek 20: Boeing 787 Dreamliner [46]

7.1 Historický vývoj kompozitních materiálů v letectví

Následující shrnutí uvádí významné roky historie kompozitních materiálů v letectví [10].

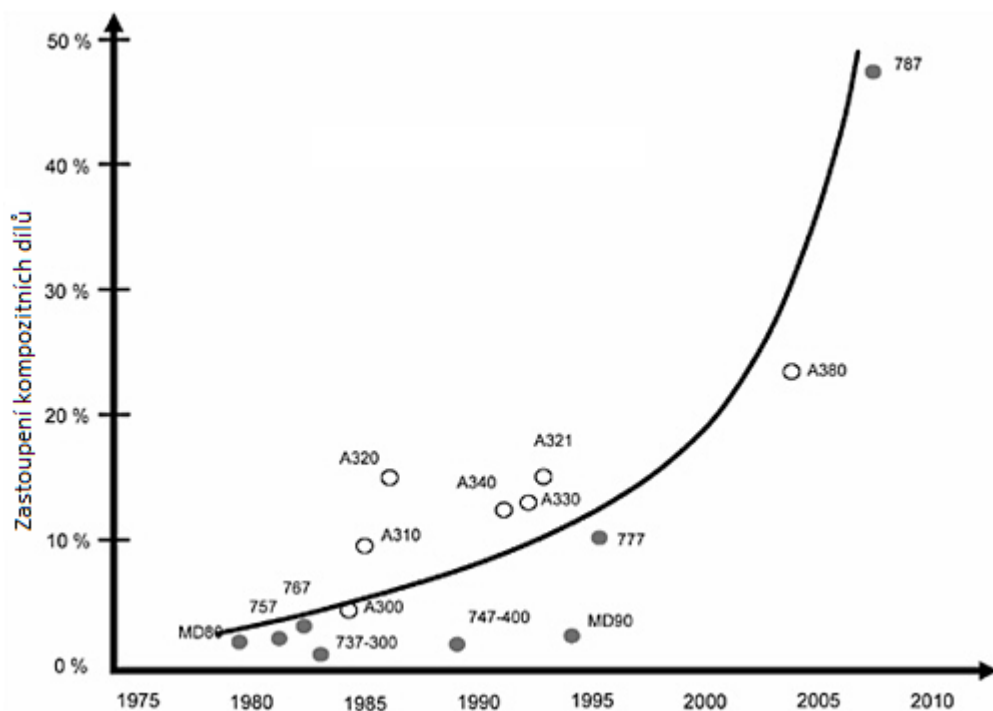
- 1940 – první použití kompozitního materiálu z fenolické pryskyřice a lněného vlákna pro trup letadla Gordon Aerolite Spitfire
- 1943 – výroba prvního letadla ze sendvičové konstrukce, která se skládala z polyesterového laminátu a jádra z balzového dřeva
- 1944 – první úspěšné letové zkoušky letadla s trupem se sendvičovou strukturou z vyztužených plastů

- 1945 – začátek výroby jádrové voštinové struktury
- 1954 – zahájení vývoje laminátového větroně v Německu
- 1967 – letové zkoušky letadla s konstrukcí výhradně jen ze sklolaminátů
- 1985 – výroba střední části trupu a směrové řídicí plochy z uhlíkových vláken u letadla airbus A 310-300

7.2 Civilní letectví

Po konci druhé světové války dochází k nárůstům počtu přepravených osob pomocí letadel. Avšak veškerá letadla pro přepravu osob byla vyráběna ze zastaralých materiálů, které limitovaly další vývoj větších, levnějších a úspornějších letadel. Proto společnost Boeing začala využívat sendvičové panely, které se skládaly z hliníkového jádra a svrchního hliníkového nebo sklolaminátového potahu. Na letadle se tyto panely nacházely na křídlech, trupu nebo tvořily přepážky a podlahy v interiéru [47].

Společnosti Airbus vyrábí letadla, u kterých neustále roste podíl uhlíkových kompozitů. V 70. letech byl tento podíl pouhých 5 %, na počátku 90. let 10 % a po roce 2000 už 15 %. S dalším vývojem konstrukce Airbusu A380 vyrobeným v roce 2005 byl tento podíl 22% a v Boeingu 787 je podíl dokonce 50 %. Z těchto dat můžeme usuzovat, že v příštích letech bude podíl kompozitních materiálů v letectví neustále stoupat [10].



Obrázek 21: Vývoj aplikace kompozitu v leteckém průmyslu [48]

Nejčastěji vyráběným dílem z uhlíkových kompozitů jsou výškové a směrové řídicí plochy. Skořepiny přistávacích klapek se vyrábí z prepregu technologií postupného kladení orientovaných pruhů nebo tvarových přířezů, které se následně vytvrzují v autoklávu. Touto technologií je vyráběno 80 až 90 % dílců z uhlíkových kompozitů [10].

7.3 České kompozitní letadlo z Kunovic

Letadlo EV – 55 vyráběné firmou Evektor – Aerotechnik Kunovice je malé dopravní letadlo, které představuje nové konstrukční metody využití kompozitních materiálů. První varianta konstrukce byla tvořena výhradně kompozitními materiály. Od této varianty se však upustilo a primární konstrukce je vyrobena z kovu. Kompozitní materiály tvoří sekundární konstrukci např.: přední část trupu (místo pro avioniku, nákladový prostor, tubus předního podvozku), veškeré dveře (pilotní, cestujících, zavazadlové), kryty motorů a podvozkové gondoly. Veškeré kompozitní díly je možné vidět na obr. 22 a mají hnědou barvu [49].

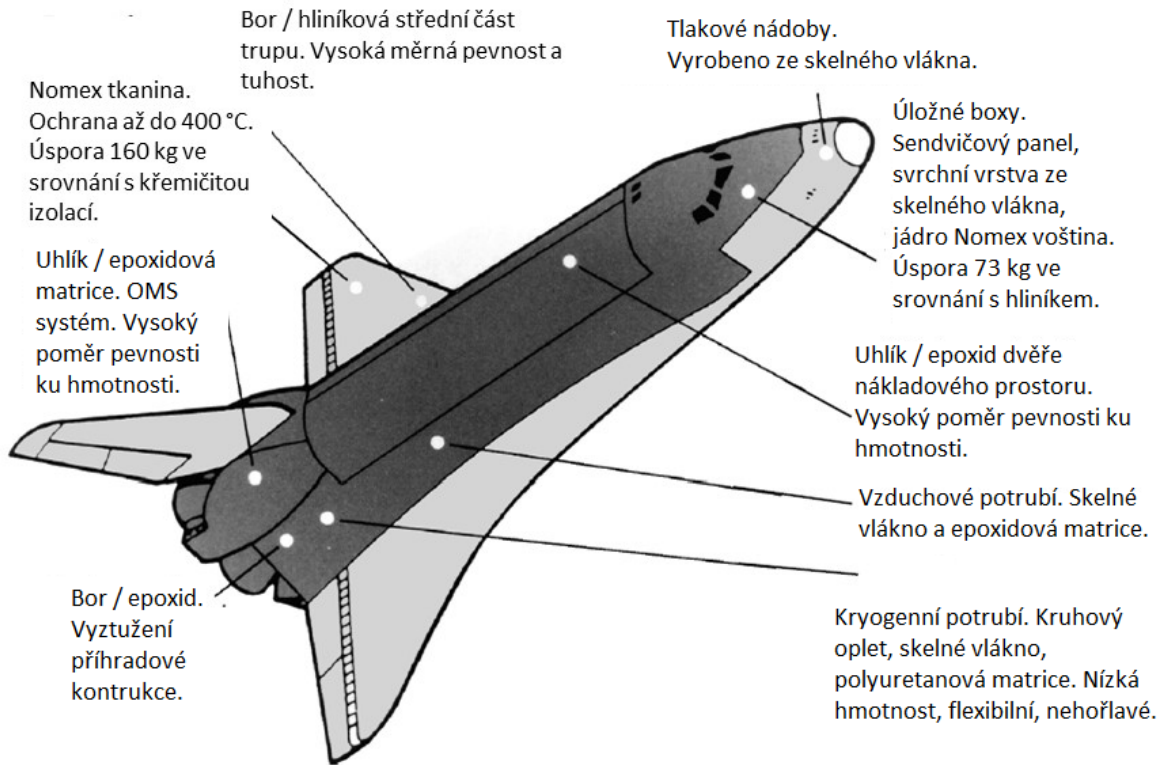


Obrázek 22: EV – 55 společnosti Evektor – Aerotechnik Kunovice [50]

7.4 Let do vesmíru

Kompozitní materiály se v kosmickém programu využívají ve velké míře především kvůli svým vlastnostem. Jsou vysoce pevnostní a rozměrově stálé při velkých teplotních změnách. Mají také menší hmotnost oproti kovovým slitinám, což vede ke snížení hmotnosti raketoplánu, ale zároveň dochází k nárůstu přepravní kapacity. Náklady na dopravu techniky do vesmíru činí 2208 USD/kg. Z tohoto důvodu jsou části raketoplánu vyrobeny z uhlíkového kompozitu, který je pevný, rozměrově stálý i při extrémních změnách teplot a lehký pro úsporu hmotnosti. Příkladem aplikací uhlíkového kompozitu jsou dveře

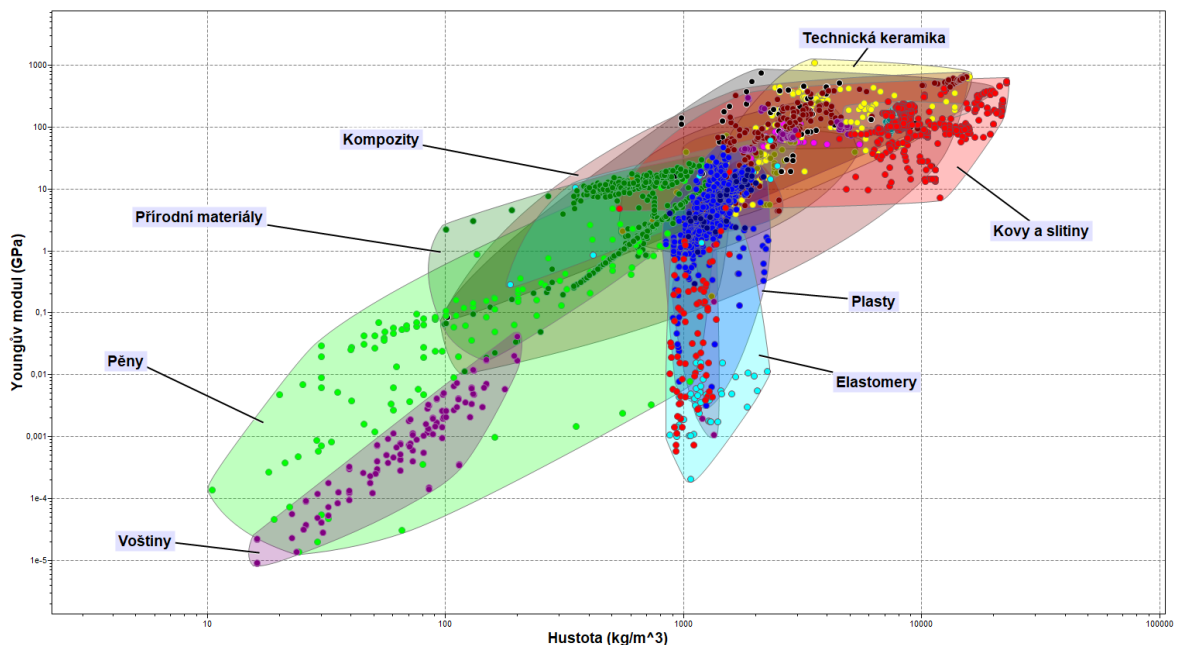
nákladového prostoru. Další použití kompozitních materiálu na části raketoplánu jsou na obr. 23 [35].



Obrázek 23: Raketoplán s díly z kompozitních materiálu [35]

8 MATERIÁLOVÁ DATABÁZE CES EDUPACK

V rámci této bakalářské práce jsem hledal optimální materiály vhodné k výrobě odpočinkového boxu pro posádku letadla. Výběr vhodných materiálu pro jednotlivé vrstvy sendvičové konstrukce jsem vyhledal v materiálové databázi CES EduPack. CES EduPack je nejrozšířenější výukový program pro volbu materiálů ve strojírenství, vědě a designu. Program vychází z práce profesora Ashbyho z Cambridgeské univerzity, kde byl vyvinut a posléze se rozšířil do všech vysokých škol a univerzit po celém světě. V programu jsou materiálové databáze, které obsahují velké množství různých skupin materiálů např.: keramika, kompozit, pěny, kovy, nástrojové kovy, elastomery, dřevo, nebo další přírodní materiály. Následně je ke každému materiálu přehled obecných vlastností (cena, hustota), mechanických vlastností (youngův modul, pevnost, houževnatost) a další vlastnosti např.: teplotní, elektrické, magnetické, optické, opotřebením, recyklovatelnost a vliv na životní prostředí. Na základě těchto informací si zvolíme vhodné materiály a pomocí nástroje syntetizer můžeme vytvořit sendvičové panely z námi zvolených materiálů. Vlastnosti vytvořených sendvičů můžeme porovnávat a vyhodnocovat v grafech, mapách a tabulkách [51].



Obrázek 24: Přehled skupin materiálů v závislosti Youngova modulu na hustotě [9].

II. PRAKTICKÁ ČÁST

9 CÍL PRAKTICKÉ ČÁSTI BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Cílem praktické části bakalářské práce je navrhnout a vybrat vhodný sendvičový panel jako odpočinkový box pro posádku v interiéru letadla za pomoci materiálové databáze CES EduPack 2020. Při výběru vhodného sendvičového panelu je důležité se zaměřit na mechanické vlastnosti při dosažení co nejnižší hmotnosti, ekonomické přijatelnosti a bezpečnosti interiérového panelu v případě nehody a následném požáru letadla.

Osnova praktické části bakalářské práce:

- 1) Uvedení do problematiky a určení požadavků pro materiály vhodné k výrobě postelové desky v odpočinkovém boxu.
- 2) Volba materiálů pro jednotlivé vrstvy sendvičové struktury pomocí materiálové databáze CES s ohledem na mechanické vlastnosti.
- 3) Navržení sendvičového panelu s vybranými materiály z předchozího kroku, optimalizace ohybové tuhosti, průhybu a ceny.
- 4) Diskuze a závěr

10 VSTUPNÍ PODMÍNKY SENDVIČOVÉHO PANELU

10.1 Odpočinkový box jako sendvičový panel

V osobní letecké dopravě se přepravují cestující na velké vzdálenosti. Příkladem tomu je let z Londýna do Sidney, kdy posádka a cestující stráví 19 hodin na palubě letadla. Palubní posádka se během celého letu stará o pohodlí cestujících. Při dlouhých letech se posádka střídá a vystřídaná část posádky si může jít odpočinout do odpočinkového boxu. Jedná se o prostor pod podlahou letadla. V rámci této bakalářské práce zpracuji zatížení působící na desku postele odpočinkového boxu. Velikost zatížení bude tvořit hmotnost jednoho člena posádky s osobními věcmi tedy 150kg. Rozměry desky jsou 2000x760 mm. Výsledná deska musí být lehká, pevná a tuhá v ohybu. Musí také splňovat požární předpisy jako např.: žáruvzdornost, rychlost šíření požáru, nízkou kouřivost a toxicitu jedovatých výparů.



Obrázek 25: Odpočinkové boxy v interiéru letadla [34]

Shrnutí vstupních podmínek

Podmínky pro sendvičovou desku:

- Délka: 2000 mm
- Šířka: 760 mm
- Zatížení: 150 kg
- Nízká hmotnost, pevnost a tuhost v ohybu
- Toxicita výparů, vývin kouře

Proměnné veličiny:

- Volba materiálu jednotlivých vrstev sendvičové struktury
- Výška vrstev

Cíl praktické části bakalářské práce:

- Snížení hmotnosti
- minimalizace nákladu na výrobu
- optimální průhyb desky

Značení materiálů z databáze CES EduPack 2020

V následující tabulce jsou uvedeno značení sendvičových konstrukcí, které se dále budou objevovat v grafech nebo tabulkách.

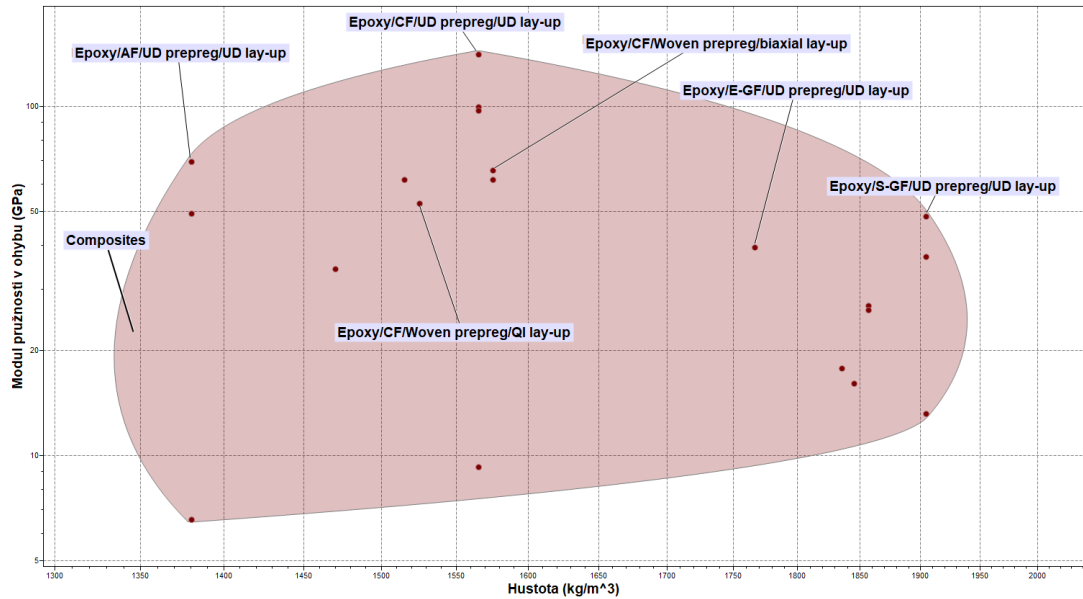
EPOXY	CF	UD-prepreg	UD lay-up	Al 3003	HC	(5/20/30)
a	b	c	d	e	f	g

Vysvětlivky:

- a) Typ matrice
- b) Typ vyztužujícího vlákna
- c) Forma laminy: UD prepreg – vlákna orientována jedním směrem
 QI prepreg – vlákna orientována ve více směrech
 Woven prepreg – křížová orientace vláken (tkanina)
- d) Metoda skladby vrstev: UD lay – up - vrstvy ukládány jedním směrem (0°)
 Biaxial lay – up - vrstvy ukládány pod úhlem (0° 90°)
 QI lay – up – vrstvy ukládány pod úhlem
 (0° 90° +45° -45°)
- e) Materiál jádra nebo vnější vrstvy
- f) Forma jádra – voština nebo pěna
- g) Tloušťka (svrchní vrstva/jádro/celého panelu) v [mm]

10.2 Výběr vnější vrstvy

Vnější vrstvy sendvičové struktury jsem volil z kompozitních materiálů ve formě prepregu. Jedná se o vyztužující vlákna z aramidů, uhlíku, E skla nebo S skla. Vlákna jsou již ve formě prepregu, který je prosycen epoxidovou pryskyřicí. Formu prepregu jsem volil z toho důvodu, že se používá při reálné výrobě interiérů letadel. V následujícím grafu ohybového momentu v závislosti na hustotě můžeme vidět všechny vybrané druhy vyztužujících vláken.



Graf 1: Závislost modulu pružnosti v ohybu na hustotě kompozitu [9]

Materiál vnější vrstvy	Cena (CZK/kg)	Hustota (kg/m ³)	Youngův modul (GPa)	Modul pružnosti v ohybu (GPa)	Hořlavost
Epoxy/AF/UD prepreg/UD lay-up	1390	1380	69,3	69,7	nízká
Epoxy/CF/UD prepreg/UD lay-up	896	1560	141	142	nízká
Epoxy/CF/woven prepreg/biaxial lay-up	1260	1570	65,6	65,9	nízka
Epoxy/CF/woven prepreg/QI lay-up	1260	1570	46,2	62,1	nízká
Epoxy/E-GF/UD prepreg/UD lay-up	657	1770	39,7	39,7	nízká
Epoxy/S-GF/UD prepreg/UD lay-up	560	1900	47,7	48,7	nízká

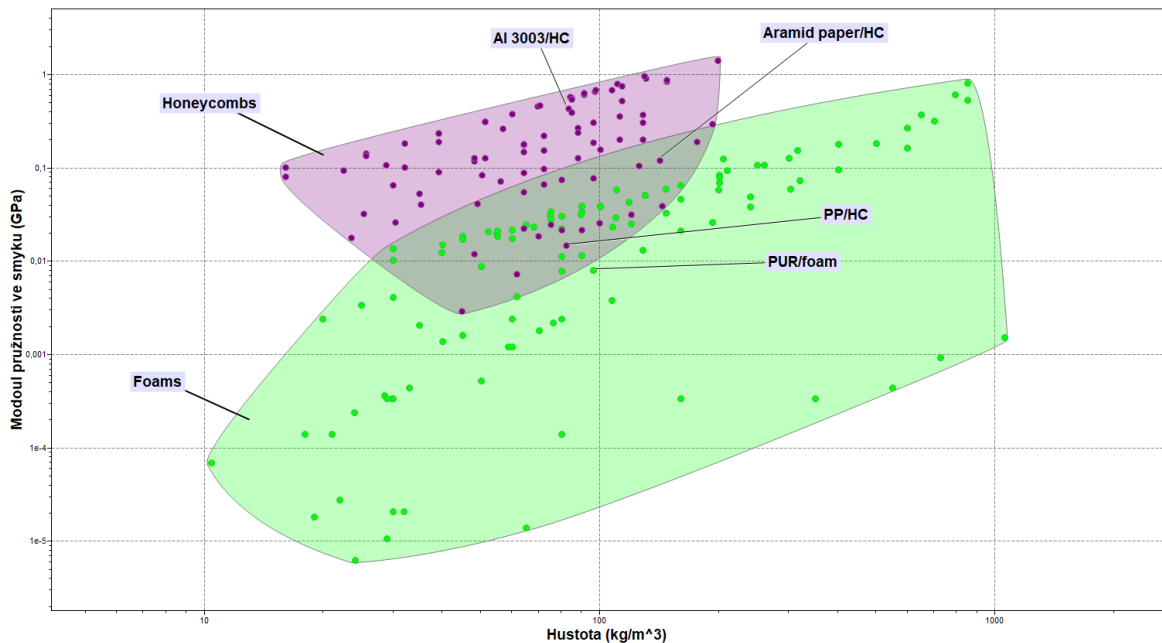
Tabulka 2: Kompozitní materiály vnější vrstvy sendviče [9]

V tabulce č. 2 jsou uvedeny přesné hodnoty mechanických vlastností jednotlivých druhů prepregů. Vnější vrstvy sendviče by měly být maximálně tvrdé a pevné při co nejmenší hmotnosti. Tyto podmínky nejvíce splňuje prepreg z aramidových vláken, který má nejvyšší

hodnoty Youngova modulu a modulu pružnosti v ohybu při malé hustotě. Splňuje také bezpečnostní podmínky pro interiér letadla. Jedinou nevýhodou toho prepregu je vysoká cena.

10.3 Volba Jádra

Jako materiál jádra sendviče jsem zvolil celkem čtyři druhy materiálů. První tři materiály jsou ve formě voštiny a poslední materiál je pěna. V grafu č. 2 jsou uvedeny všechny čtyři materiály jádra v závislosti modulu pružnosti ve smyku na hustotě. Hustota je u všech mnou zvolených materiálů téměř shodná, liší se pouze modulem pružnosti ve smyku, který je nejvyšší pro hliníkovou voštinu (0,44 GPa). Výhoda hliníkové voštiny je její nehořlavost, tedy splňuje bezpečnostní podmínky pro interiér letadla. Bezpečnostní podmínky zcela nevyhovují polyuretan a polypropylen, protože jsou vysoce hořlavé. Z tohoto důvodu je vyřazují z výběru materiálu jádra sendviče. Cena hliníkové voštiny v porovnání s voštinou z aramidového papíru je výrazně nižší. Celkově se dá říct, že hliníková voština je lepší ve všech oblastech, které jsou uvedeny v tabulce 3, a proto ji vybírám jako primární materiál pro jádro sendviče.

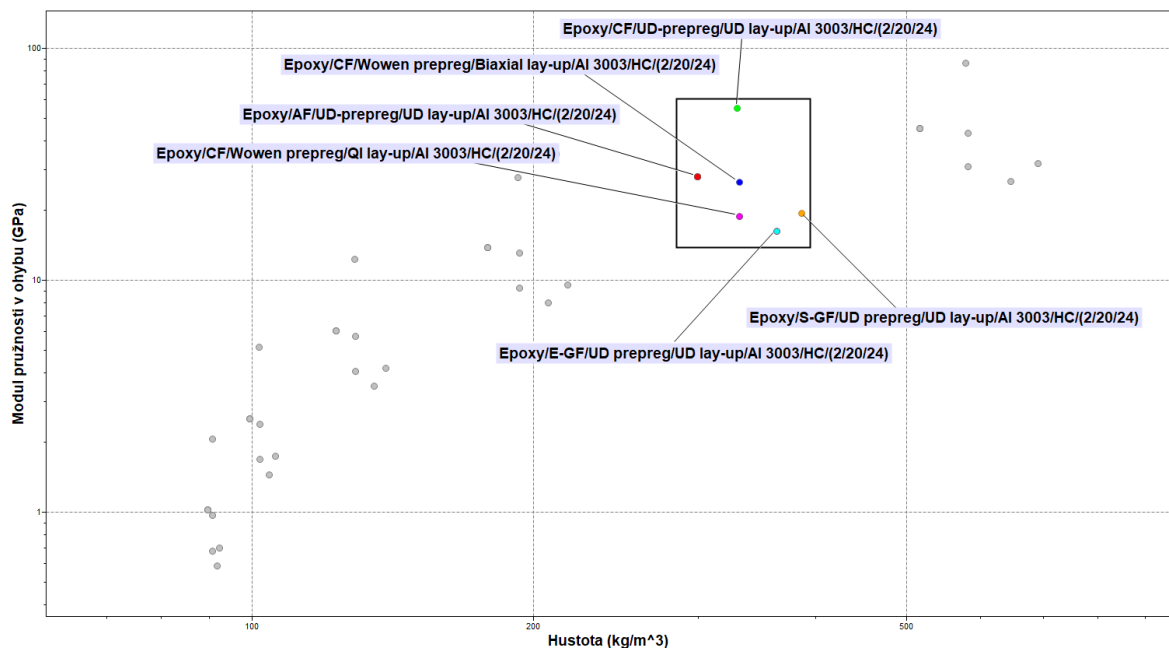


Graf 2: Závislost modulu pružnosti ve smyku na hustotě [9]

Materiál jádra	Cena (CZK/kg)	Hustota (kg/m ³)	Youngův modul (GPa)	Modul pružnosti v ohybu (GPa)	Hořlavost
Al 3003/HC	320	83,2	0,00121	0,00121	nehořlavé
Aramid paper/HC	801	141	0,00311	0,00176	samožhášecí
PUR/foam	273	96	0,0246	0,0239	vysoce hořlavá
PP/HC	76	82	0,00163	0,00163	vysoce hořlavá

Tabulka 3: Mechanické vlastnosti jader [9]

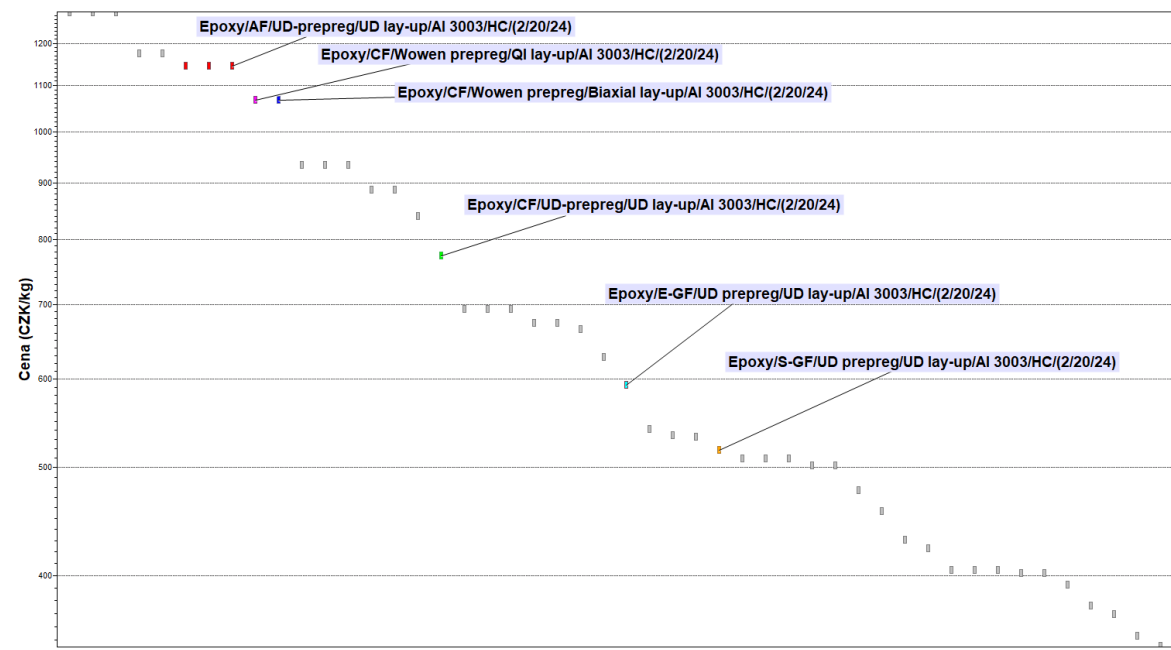
10.4 Syntéza sendvičového panelu



Graf 3: Závislost modulu pružnosti v ohybu na hustotě vytvořených sendvičů [9]

Z vybraných materiálů pro jádro a vnější vrstvy sendviče jsem vytvořil pomocí funkce syntetizer šest sendvičových panelů, které jsou uvedeny v grafu 3 v závislosti modulu pružnosti v ohybu na hustotě. Všechny panely mají shodný materiál jádra, tedy hliníkovou voštinu. Sendviče jsou v grafu rozděleny do šesti skupin podle tloušťky vnější vrstvy (0,05 mm; 0,12 mm; 0,3 mm; 0,8 mm; 2 mm; 5 mm). Tloušťka jádra je pro všechny sendviče shodná a je 20 mm. Jako optimální tloušťku jádra jsem zvolil 2 mm. Tato skupina je v grafu

označena rámečkem a popisy jednotlivých sendvičů, které se budou v podobě barevných teček zobrazovat v dalších grafech. Sendviče označené šedou tečkou jsou již vyřazeny z užšího výběru. V grafu jsou také tři sendviče ze stejných materiálů jádra i vnějších vrstev, které se od sebe liší pouze formou laminy a metodou skladby vrstev. Při jejich porovnání můžeme vidět vliv skladby vrstev při způsobu zatížení panelu. Nejlepší hodnotu modulu pružnosti v ohybu má prepreg z uhlíkových vláken, který má vlákna orientována jedním směrem a jednotlivé vrstvy tohoto prepregu jsou také ukládána jedním směrem.



Graf 4: Závislost ceny sendvičových panelů [9]

V grafu 4 jsou v závislosti ceny šesti sendvičových panelů, které jsme zvolili do užšího výběru v grafu 3. Nejlevnější sendvičové panely (518-593 CZK/kg) mají svrchní vrstvy ze skelných S nebo E vláken. Průměrnou cenu (774 CZK/kg) má sendvič se svrchní vrstvou z uhlíkových vláken s jednosměrně orientovaným vrstvením. Nejvyšší ceny dosahují sendviče se svrchními vrstvami z uhlíkových vláken s kvazi-izotropní a bi-axiální orientací vrstev (1070 CZK/kg). Do této skupiny patří ještě sendvič se svrchní vrstvou z aramidových vláken (1150 CZK/kg).

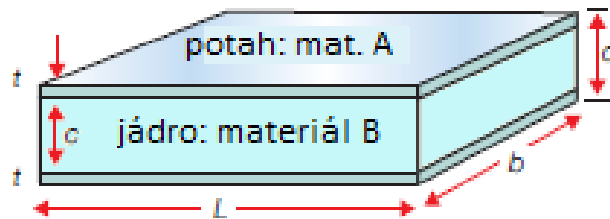
Materiál	Index	Cena [CZK/kg]	Hustota [kg/m ³]	Youngův modul [GPa]	Modul pružnosti v ohybu [GPa]	Pevnost na mezi kluzu [MPa]
Epoxy/AF/UD-prepreg/UD lay-up / Al 3003/HC/ (2/20/24)	1	1150	298	11,5	28,2	205
Epoxy/CF/UD-prepreg/UD lay-up / Al 3003/HC/(2/20/24)	2	774	329	23,4	55,6	323
Epoxy/CF/Wowen prepreg/Biaxial lay-up / Al 3003/HC/ (2/20/24)	3	1070	331	10,9	26,7	125
Epoxy/CF/Wowen prepreg/QI lay-up / Al 3003/HC/ (2/20/24)	4	1070	331	7,66	19	89,7
Epoxy/E-GF/UD prepreg/UD lay-up / Al 3003/HC/ (2/20/24)	5	593	363	6,59	16,4	95,4
Epoxy/S-GF/UD prepreg/UD lay-up / Al 3003/HC/ (2/20/24)	6	518	385	7,92	19,6	287

Tabulka 4: Mechanické vlastnosti sendvičových panelů [9]

V tabulce 4 jsou uvedeny přesné hodnoty mechanických vlastností a ceny jednotlivých sendvičových panelů. Tyto hodnoty budeme potřebovat při výpočtech vlastností sendvičových panelů.

10.5 Výpočty

Deska postele odpočinkového boxu je při použití zatížena hmotností osoby a dochází k průhybu vlivem působení gravitační síly, které je vyvolána hmotností osoby a působením gravitační síly země. Deska postele je na obou koncích pevně vetknuta a zatížení může považovat za spojitě. V následující části bakalářské práce budou uvedeny vzorce potřebné k výpočtu průhybu sendvičové desky postele odpočinkového boxu.



Obrázek 26: Sendvičový panel s rozměry jednotlivých vrstev, kde L - délka, b - šířka, d - výška desky, c - výška jádra, t - výška potahu [7]

10.5.1 Průřezový modul

$$Z_p = \frac{b \cdot d^2}{4} \text{ [m}^3\text{]} \quad (4)$$

kde:

b – šířka panelu [m] (4)

d – výška panelu [m]

10.5.2 Síla potřebná k přetržení

$$F_f = \frac{C \cdot Z_p \cdot \sigma_y}{L} \text{ [N]} \quad (5)$$

kde:

C – konstanta popisující zatížení

Z_p – průřezový modul [m³]

σ_y – pevnost na mezi kluzu [Pa]

L – délka panelu [m]

K výpočtu síly potřebné k přetržení potřebuje znát velikost konstanty C a při výpočtu průhybu panelu budeme potřebovat konstantu C_1 . Obě tyto konstanty slouží k usnadnění výpočtů a jsou uvedeny v obrázku 26.



Obrázek 27: Konstanty popisující zatížení C a C_1 [7]

10.5.3 Moment v ohybu

$$M = Z_p \cdot \sigma_y [N \cdot m] \quad (6)$$

kde:

Z_p – průřezový modul [m^3]

σ_y – pevnost na mezi kluzu [Pa]

10.5.4 Kvadratický moment plochy

$$I = \frac{b \cdot d^3}{12} [m^4] \quad (7)$$

kde:

b – šířka panelu [m]

d – výška panelu [m]

10.5.5 Průhyb

$$\delta = \frac{M \cdot L^2}{C_1 \cdot E \cdot I} [m] \quad (8)$$

kde:

M – moment v ohybu [$N \cdot m$]

L – délka panelu [m]

C_1 – konstanta popisující zatížení

E – Youngův modul [Pa]

I – kvadratický moment [m^4]

10.5.6 Materiálový index

Materiálový index je podíl tuhosti v ohybu a hustoty. Tímto indexem můžeme číselně vyjádřit vhodnost materiálu pro určitou aplikaci. Čím vyšší je hodnota materiálového indexu, tím je daný materiál vhodnější pro danou aplikaci např.: deska namáhána ohybem.

$$M_i = \frac{E_{flex}^{\frac{1}{3}}}{\rho} [-] \quad (9)$$

kde:

E_{flex} – modul pružnosti v ohybu [GPa]

ρ – hustota [kg/m^3]

Materiál panelu	Index	$Z_p [\text{m}^3]$	$F_f [N]$	$M [N \cdot m]$	$I [\text{m}^4]$	$\delta [m]$
Epoxy/AF/UD-prepreg/UD lay-up/Al 3003/HC/(2/20/24)	1	1,09E-04	134611,20	2,24E+04	8,76E-07	0,02321
Epoxy/CF/UD-prepreg/UD lay-up/Al 3003/HC/(2/20/24)	2	1,09E-04	212094,72	3,53E+04	8,76E-07	0,01797
Epoxy/CF/Wowen prepreg/Biaxial lay-up/Al 3003/HC/(2/20/24)	3	1,09E-04	82080,00	1,37E+04	8,76E-07	0,01493
Epoxy/CF/Wowen prepreg/QI lay-up/Al 3003/HC/(2/20/24)	4	1,09E-04	58900,61	9,82E+03	8,76E-07	0,01525
Epoxy/E-GF/UD prepreg/UD lay-up/Al 3003/HC/(2/20/24)	5	1,09E-04	62643,46	1,04E+04	8,76E-07	0,01885
Epoxy/S-GF/UD prepreg/UD lay-up/Al 3003/HC/(2/20/24)	6	1,09E-04	188455,68	3,14E+04	8,76E-07	0,04718

Tabulka 5: Vypočtené hodnoty ze vzorců [9]

10.5.7 Hmotnost panelu

$$m = b \cdot d \cdot L \cdot \rho [kg] \quad (10)$$

kde:

b – šířka panelu [m]

d – výška panelu [m]

L – délka panelu [m]

ρ – hustota [kg/m^3]

10.5.8 Jednotková cena panelu

$$C_j = \rho \cdot C_m \cdot V \text{ [CZK]} \quad (11)$$

kde:

ρ – hustota [kg/m³]

C_m – cena materiálu [CZK/kg]

V – objem sendvičového panelu [m³]

Materiál panelu	Index	Jednotková cena [CZK]	Hmotnost [kg]	Výška [mm]	Průhyb [mm]	Mat. index
Epoxy/AF/UD-prepreg/UD lay-up/Al 3003/HC/(2/20/24)	1	12501,70	10,87	24	23,21	10,21
Epoxy/CF/UD-prepreg/UD lay-up/Al 3003/HC/(2/20/24)	2	9289,49	12,00	24	17,97	11,60
Epoxy/CF/Wowen prepreg/Biaxial lay-up/Al 3003/HC/(2/20/24)	3	12920,12	12,07	24	14,93	9,03
Epoxy/CF/Wowen prepreg/QI lay-up/Al 3003/HC/(2/20/24)	4	12920,12	12,07	24	15,25	8,06
Epoxy/E-GF/UD prepreg/UD lay-up/Al 3003/HC/(2/20/24)	5	7852,65	13,24	24	18,85	7,00
Epoxy/S-GF/UD prepreg/UD lay-up/Al 3003/HC/(2/20/24)	6	7275,21	14,04	24	47,18	7,00

Tabulka 6: Důležité hodnoty pro výběr vhodného sendvičového panelu [9]

Diskuze

Z tabulky 6 vychází jako nejlepší kombinace materiálů pro výrobu desky postele odpočinkového boxu sendvičový panel s indexem 2. Jedná se o Epoxy CF UD- prepreg, UD lay-up, honeycomb z Al 3003, který má výšku 24 mm. Panel se skládá z vnější vrstvy o výšce 2 mm z jednosměrně orientovaných uhlíkových vláken, které jsou prosyceny epoxidovou pryskyřicí. Jádro je v podobě hliníkové voštiny s výškou 20 mm. Tento sendvič má hodnotu průhybu 17,97 mm na desce o délce 2000 mm. Hmotnost panelu je 12 kg, což je v porovnání s ostatními druhý nejlehčí panel. Jednotková cena vybraného sendvičového panelu je 9289,49 CZK, což je průměrná cena v porovnání s ostatními panely. Hodnota materiálového indexu, které uvádí vhodnost sendvičového panelu k určité aplikaci v praktickém použití je u zvoleného panelu nejvyšší (11,6), což potvrzuje, že jsme zvolili správný sendvičový panel. Zvolený panel má v porovnání s ostatními nejlepší vlastnosti, ale

přesto je cena, hmotnost a průhyb panelu příliš velká. Optimalizací panelu chci tyto hodnoty zlepšit. Z teoretické části této práce víme, že s rostoucí výškou jádra dochází ke snížení průhybu při minimální zvýšení hmotnosti panelu, protože hustota hliníkového jádra ($83,2 \text{ kg/m}^3$), které se zvyšuje je velmi malá v porovnání s hustotou vnější vrstvy (1560 kg/m^3). Jednotková cena se dá snížit tím, že zmenšíme výšku vnějších vrstev, které jsou velmi drahé (896 CZK/kg). Tímto krokem se sníží cena panelu a zároveň i klesne hmotnost, protože hustota vnějších vrstev je násobně vyšší než hustota jádra. Na základě těchto informací jsem vytvořil tři optimalizované sendvičové panely a jejich vlastnosti můžeme porovnat s původním neoptimalizovaným panelem v tabulce 7. Původní neoptimalizovaný panel má indexem 1 a optimalizované panely mají indexy 2,3,4. Původní panel měl výšku vnější vrstvy 2 mm, kterou jsem u optimalizovaných panelů snížil na 0,8 mm a 1 mm. Výšku jádra jsem zvýšil z původních 20 mm na 30 mm a 40 mm. Optimalizaci považuji za úspěšnou, protože došlo ke snížení ceny, hmotnosti a průhybu panelu. Celková výška se oproti původnímu panelu zvýšila, ale v případě mé aplikace tuto změnu nepovažuji za důležitou. Po optimalizaci původního panelu volím pro aplikaci panel s výškou vnější vrstvy 0,8 mm, výškou jádra 30 mm a celkovou výškou panelu 31,6 mm. Zde došlo vlivem optimalizace ke snížení jednotkové ceny o polovinu, snížení hmotnosti o 4,41 kg, snížení průhybu o 4,35 mm a nárůstu materiálového indexu na 16,98.

Materiál panelu	Index	Jednotková cena [CZK]	Hmotnost [kg]	Výška [mm]	Průhyb [mm]	Mat. index
Epoxy/CF/UD-prepreg/UD lay-up/Al 3003/HC/(2/20/24)	1	9289,49	12,00	24	17,97	11,60
Epoxy/CF/UD-prepreg/UD lay-up/Al 3003/HC/(0,8/30/31,6)	2	4606,56	7,59	31,6	13,62	16,98
Epoxy/CF/UD-prepreg/UD lay-up/Al 3003/HC/(1/30/32)	3	5478,81	8,56	32	13,40	16,27
Epoxy/CF/UD-prepreg/UD lay-up/Al 3003/HC/(1/40/42)	4	5888,98	9,83	42	10,24	16,99

Tabulka 7: Porovnání původního panelu s optimalizovanými panely [9]

ZÁVĚR

Bakalářská práce se zabývá návrhem vhodného sendvičového panelu pro výrobu desky postele odpočinkového boxu pro posádku dopravního letadla.

V teoretické části jsou na začátku popsány charakteristiky a vlastnosti sendvičových struktur. Dále jsou popsány jednotlivé vrstvy a materiály, které se používají v sendvičových strukturách. V závěru teoretické části jsou uvedeny praktické aplikace sendvičových konstrukcí, technologie výroby, lepení jednotlivých vrstev a využití sendvičů v letectví.

V praktické části je uvedeno zadání a podmínky pro volbu vhodného sendvičového panelu. Poté jsem pomocí materiálové databáze CES EduPack 2020 vybral vhodné materiály pro vnější vrstvy a jádro sendviče, které jsem uvedl v grafech a tabulkách. Dle zadání musí všechny materiály splňovat bezpečnostní předpisy pro letectví. V mém případě se jedná o požární předpisy, kdy materiály uvnitř interiéru letadla nesmí být hořlavé. Tuto podmínku nesplňovala jádra z polypropylenu a polyuretanu, proto byla vyřazena z výběru materiálů jádra. Z takto vybraných materiálů jsem vytvořil sendvičové panely, které jsem následně porovnal pomocí grafů, tabulek a výpočtů. Z tohoto porovnání vyšel nejlépe sendvičový panel z uhlíkových vláken (CF/UD-prepreg/UD lay-up) s jádrem z hliníkové voštiny (Al 3003), který měl nejlepší poměr průhybu, hmotnosti a ekonomické náročnosti. Panel s celkovou výškou 24 mm, z čehož je výška vnější vrstvy 2 mm a výška voštinového jádra 20 mm. Deska postele s rozměry (2000x760 mm), která je vyrobena z tohoto sendviče má hmotnost 12 kg, průhyb desky 17,97 mm a cena 9289,49 CZK. Tyto hodnoty mi přišly příliš vysoké, proto jsem sendvičový panel optimalizoval. Na základě vlastností sendvičových struktur, kdy s růstem výšky jádra dochází ke zlepšení vlastností sendviče. Na základě těchto informací jsem upravil geometrii panelu, kdy došlo ke zvýšení z 20 mm na 30 mm, výška vnější vrstvy se zmenšila z 2 mm na 0,8 mm. Díky této optimalizaci se snížila cena panelu o polovinu na 4606,56 CZK. Došlo i ke snížení hmotnosti o 4,41 kg, snížení průhybu o 4,35 mm a nárůstu materiálového indexu na 16,98.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] DAVIES, J.M., 2001. *Lightweight sandwich construction*. Oxford: Blackwell Science. ISBN 0-632-04027-0.
- [2] RUSNÁKOVÁ, Soňa, 2020. *Zpracovatelské inženýrství kompozitů: Přednášky T5ZIK* [online]. FT UTB [cit. 2021-04-12].
- [3] The Importance of Sandwich Structures and the Development. In: *Kordosa* [online]. [cit. 2021-04-13]. Dostupné z: <https://www.reinforcer.com/en/category/detail/The-Importance-of-Sandwich-Structures-and-the-Development-of-Kordsas-First-Composite-Sandwich-Panel/86/451/0>
- [4] Sendvičové konstrukce, 31. 01. 2001n. 1. *MM Průmyslové spektrum* [online]. [cit. 2021-04-11]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/sendvicove-konstrukce>
- [5] *Polymerní sendvičové panely* [online]. In: . [cit. 2021-04-13]. Dostupné z: https://www.imaterialy.cz/rubriky/plasty-pro-stavebnictvi-a-architekturu-5-polymerni-sendvicove-panely_41283.html
- [6] FM sendvičové panely s hliníkovou voštinou, © 2018. In: *Forlit & Metal* [online]. [cit. 2021-04-13]. Dostupné z: <https://www.fmetal.cz/cz/sendvicove-panely/>
- [7] ASHBY, M. F., c2011. *Materials selection in mechanical design* [online]. 4th ed. Burlington: Butterworth-Heinemann [cit. 2021-5-8]. ISBN 978-1-85617-663-7. Dostupné z: <https://www-sciencedirect-com.proxy.k.utb.cz/science/article/pii/B9781856176637000114>
- [8] ŠUBA, Oldřich, 2010. *Dimenzování a navrhování výrobků z polymerů*. Vyd. 3. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. ISBN 978-807-3189-488.
- [9] materiálové hodnoty CES EduPack 2020
- [10] EHRENSTEIN, Gottfried W., 2009. *Polymerní kompozitní materiály* [online]. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia [cit. 2021-04-11]. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [11] MACHEK, Václav, Jaromír SODOMKA, 2008. *Polymery a kompozity s polymerní maticí: Nauka o materiálu*. Praha: Nakladatelství ČVUT. ISBN 978-80-01-03927-4.
- [12] Co jsou to kompozitní materiály, 2009. *GDP Koral Composites* [online]. [cit. 2021-04-04-]
- [13] *Kompozitní materiály* [online]. [cit. 2021-04-12]. Dostupné z: <https://www.pf.jcu.cz/structure/departments/kaft/wp-content/uploads/Kompozitn%C3%AD-materi%C3%A1ly.pdf>
- [14] DAĐOUREK, Karel, 2007. *Kompozitní materiály - druhy a jejich užití*. Liberec: Technická univerzita v Liberci. ISBN 978-807-3722-791.

- [15] Kompozitní materiály ve stavebnictví, 2021. *TZB - info* [online]. [cit. 2021-04-12]. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/stresni-okna/9909-kompozitni-materialy-ve-stavebnictvi>
- [16] O karbonu, 2021. In: *Carspe* [online]. [cit. 2021-04-13]. Dostupné z: <https://www.carspe.cz/o-karbonu/>
- [17] KLEMPNER, Daniel, Vahid SENDIJAREVIC, 2004. *Polymeric Foams and Foam Technology*. 2. Munich: Hanser Publishers. ISBN 3-446-21831-9.
- [18] Stru-Cell Structural PVC Foam Core, ©2013. In: *Polyumac* [online]. [cit. 2021-04-13]. Dostupné z: <http://www.polyumac.com/strucell-structural-pvc-foam-core/>
- [19] *Sandwich structures based on polyurethane foam cores* [online]. In: . [cit. 2021-04-13]. Dostupné z: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/pc.25543>
- [20] Polyuretan, jak vzniká a jeho využití, 2020. *Izolace - info* [online]. [cit. 2021-04-12]. Dostupné z: <https://www.izolace-info.cz/technicke-informace/zateplovani-obecne-informace/10117-polyuretan-jak-vznika-a-jeho-vyuziti-a.html#.YHSDFOgzaUl>
- [21] HLAVÁČKOVÁ, Petra. Polystyren je dobrý izolant, ale vlhkost nepropustí. *Dřevostavitel* [online]. [cit. 2021-04-12]. Dostupné z: <https://www.drevostavitel.cz/clanek/izolacni-materialy-2-dil>
- [22] Encyklopedie plastů: polypropylen (PP), © 2021. *Samosebou* [online]. [cit. 2021-04-12]. Dostupné z: <https://www.samosebou.cz/2019/10/25/encyklopedie-plastu-polypropylen-pp/>
- [23] 2019. In: *Madinter* [online]. [cit. 2021-04-13]. Dostupné z: <https://www.madinter.com/en/nomex-560-410-2-mm-en.html>
- [24] In: *Flexible Composites* [online]. [cit. 2021-04-13]. Dostupné z: <https://www.flexcomp.co.uk/honeycomb>
- [25] BITZER, Tom, 1997. *Honeycomb technology*. Glasgow: Springer - Science + Business Media. ISBN 978-94-010-6474-3.
- [26] Aluminium honeycomb, © 2021. *CEL COMPONENTS* [online]. [cit. 2021-04-12]. Dostupné z: https://www.honeycombpanels.eu/en/products/honeycomb/aluminium?gclid=CjwKCAiAsOmABhAwEiwAEBR0ZlciPDqudhm7vx7a15aOm7jaabBRVko9HfekSmyrsCgu6hDe8cY6nhoCyGMOAvD_BwE
- [27] Honeycomb Composite Made Lighter and Stronger, © 2021. *Dupont* [online]. [cit. 2021-04-12]. Dostupné z: <https://www.dupont.com/fabrics-fibers-and-nonwovens/honeycomb-composites.html>

- [28] Honeycomb: Paper honeycomb, © 2021. *Ganpati Ecoworld* [online]. [cit. 2021-04-12]. Dostupné z: <http://www.gewhoneycomb.com/honeycomb/>
- [29] In: *ResearchGate* [online]. [cit. 2021-04-13]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/3-Corrugation-honeycomb-core-manufacturing-method-3_fig3_325742289
- [30] [online]. In: . [cit. 2021-04-13]. Dostupné z: <https://www.slideshare.net/ranasajjad484/manufacturing-of-honeycomb-materials>
- [31] Sendvičové panely, 2014. *Unihal* [online]. [cit. 2021-04-12]. Dostupné z: <https://www.unihal.cz/materialy/sendvicove-panely>
- [32] Železniční doprava. *5M* [online]. [cit. 2021-04-12]. Dostupné z: <https://www.5m.cz/odvetvi/zeleznicni-vozidla>
- [33] History Of The Bullet Train, 2021. In: *Japan Rail Pass* [online]. [cit. 2021-04-13]. Dostupné z: <https://www.japanrailpass.com.au/history-of-the-bullet-train/>
- [34] Letectví. *5M* [online]. [cit. 2021-04-12]. Dostupné z: <https://www.5m.cz/odvetvi/letectvi>
- [35] KAW, Autar K., 2006. *Mechanics of composite materials*. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press. ISBN 08-493-1343-0.
- [36] GAY, Daniel, Suong V. HOA a Stephen W. TSAI, 2003. *Composite materials: design and applications*. 4th. Boca Raton: CRC Press. ISBN 15-871-6084-6.
- [37] LEE, Shau - Tarnng, 2016. *Polymeric Foams: Innovations in Processes, Technologies, and Products*. Boca Raton: CRC Press. ISBN 9781498738873.
- [38] 2017. In: *Plastic* [online]. [cit. 2021-04-13]. Dostupné z: http://www.plastic.cz/technologie-rucni_laminace
- [39] Spray Lay - up, 2020. *NetComposites* [online]. [cit. 2021-04-12]. Dostupné z: <https://netcomposites.com/guide/manufacturing/spray-lay-up/>
- [40] Resin Transfer. In: *NetComposites* [online]. [cit. 2021-04-13]. Dostupné z: <https://netcomposites.com/guide/manufacturing/resin-transfer/>
- [41] Orientační přehled výrobních postupů a schémata technologií, © 2021. In: *Havel Composites* [online]. [cit. 2021-04-17]. Dostupné z: <https://www.havel-composites.com/cs/domu/download>
- [42] *Renault F1* [online], 2021. In: . [cit. 2021-04-13]. Dostupné z: <https://www.autocarindia.com/renault-f1/special-feature-the-shape-of-speed---renault--formula-one-413281>

- [43] *Autoclaves for composites* [online]. In: . [cit. 2021-04-13]. Dostupné z: <https://www.italmatic.eu/autoclavi/compositi/?lang=en>
- [44] *Srovnání lepicích systémů pro sendvičové panely dopravních prostředků* [online], 2017. Zlín [cit. 2021-04-12]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/10563/40696>. Bakalářská práce. UTB Zlín. Vedoucí práce Simona Mrkvičková.
- [45] GREGOR, Miroslav, 2016. *Technologie a technika lepení - základní informace* [online]. [cit. 2021-04-12]. Dostupné z: <https://www.lepidla.cz/cs/a/technologie-a-technika-lepeni--zakladni-informace.html>
- [46] Simulation and Experimental Evaluation of Mixed Mode Delamination in Multidirectional CF/PEEK Laminates under Quasi-Static and Fatigue Loading, 2021. In: *ResearchGate* [online]. [cit. 2021-04-13]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/225022367_Simulation_and_Experimental_Evaluation_of_Mixed_Mode_Delamination_in_Multidirectional_CFPEEK_Laminates_under_Quasi-Static_and_Fatigue_Loading
- [47] *Aviation Maintenance Technician Handbook - Airframe*, 2012. Oklahoma City: United States Department of Transportation.
- [48] *Going to Extremes: Meeting the Emerging Demand for Durable Polymer Matrix Composites* [online]. In: . [cit. 2021-04-13]. Dostupné z: <https://www.nap.edu/read/11424/chapter/3>
- [49] Kompozitní materiály v letectví, © 2021. *MM Průmyslové spektrum* [online]. [cit. 2021-04-12]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/kompozitni-materialy-v-letectvi>
- [50] [online], 2021. In: . [cit. 2021-04-13]. Dostupné z: <https://www.evektor.cz/>
- [51] *CES EduPack* [online], 2018. [cit. 2021-5-8]. Dostupné z: https://www.grantadesign.com/download/pdf/edupack2018/CES_Edupack_2018_Overview.pdf

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Kg	kilogram
m ³	metr krychlový
°C	stupeň Celsius
mm	milimetr
µm	mikrometr
min	minuta
<i>SiO₂</i>	oxid křemičitý
<i>MgO</i>	oxid hořečnatý
<i>Al₂O₃</i>	oxid hlinitý
PAN	polyakrylonitril
Prepreg	preimpregnated fibres (předimpregnovaná výztuž)
PVC	polyvinylchlorid
PUR	polyuretan
PS	polystyren
PP	polypropylen
HOBE	honeycomb before expansion (voština před expanzí)
RTM	resin-transfer-moulding
USD	Americký dolar
UD prepreg	vlákna orientovaná jedním směrem
QI prepreg	Vlákna orientovaná ve více směrech
Woven prepreg	křížová orientace vláken (tkanina)
UD lay – up	vrstvy ukládány jedním směrem (0°)
Biaxial lay – up	vrstvy ukládány pod úhlem (0° 90°)
QI lay – up	vrstvy ukládány pod úhlem (0° 90° +45° -45°)
AF	aramid fibre

CF	carbon fibre (uhlíkové vlákno)
E-GF	E glass fibre (e sklené vlákno)
S-GF	S glass fibre (s skelné vlákno)
HC	honeycomb (voština)
CZK	česká koruna
Pa	Pascal
MPa	megapascal
GPa	gigapascal
N	Newton
C	konstanta
C_1	konstanta
L	délka panelu
b	šířka panelu
d	výška panelu
c	výška jádra
t	výška potahu
Z_p	průřezový modul
F_f	síla potřebná k přetržení
σ_y	pevnost v ohybu
M	moment v ohybu
I	kvadratický moment plochy
δ	průhyb panelu
E	Youngův modul
E_{flex}	modul pružnosti v ohybu
C_j	jednotková cena
C_m	cena materiálu

V objem sendvičového panelu

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Schéma vrstev sendvičové konstrukce [3]	11
Obrázek 2: Ohyb sendvičové konstrukce [5].....	12
Obrázek 3: Konstanty pro výpočet pevnosti v ohybu [9]	13
Obrázek 4: Synergický efekt u kompozitních materiálů [14].....	14
Obrázek 5: Rohož z uhlíkových vláken [16]	17
Obrázek 6: a) plátňová vazba, b) keprová vazba, c) atlasová (saténová) vazba [10]	19
Obrázek 7: a) jednosměrná tkanina, b) směsná tkanina, c) hybridní tkanina [10]	20
Obrázek 8: a) pěnové bloky, b) schéma sendvičové struktury s pěnovým jádrem [18, 19]	21
Obrázek 9: a) aramidová voština, b) voština z hliníku s různou velikostí buněk [23, 24] ..	23
Obrázek 10: Metoda výroby voštiny formováním [29]	24
Obrázek 11: Výroba voštiny metodou HOBE [30]	24
Obrázek 12: Stavební panely s pěnovým jádrem a kovovým potahem [31]	25
Obrázek 13: a) Japonský rychlovlak Šinkansen, b) Interiér vlaku s voštinovou konstrukcí [32, 33].....	26
Obrázek 14: Příklady použití sendvičové struktury na ocasní části Airbusu A 310-300 [36]	27
Obrázek 15: Výroba kompozitu ručním laminováním [38].....	29
Obrázek 16: Stříkání laminátů [39]	29
Obrázek 17: Vysokotlaké vstřikování RTM [40]	30
Obrázek 18: Vakuová infuze [2].....	31
Obrázek 19: a) forma uvnitř autoklávu, b) pohled na Autokláv [42, 43]	31
Obrázek 20: Boeing 787 Dreamliner [46]	34
Obrázek 21: Vývoj aplikace kompozitu v leteckém průmyslu [48]	35
Obrázek 22: EV – 55 společnosti Evector – Aerotechnik Kunovice [50].....	36
Obrázek 23: Raketoplán s díly z kompozitních materiálů [35]	37
Obrázek 24: Přehled skupin materiálů v závislosti Youngova modulu na hustotě [9].....	38
Obrázek 25: Odpočinkové boxy v interiéru letadla [34]	41
Obrázek 26: Sendvičový panel s rozměry jednotlivých vrstev, kde L - délka, b - šířka, d - výška desky, c - výška jádra, t - výška potahu [7].....	49
Obrázek 27: Konstanty popisující zatížení C a C1 [7]	49

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Porovnání homogenního materiálu se sendvičem [6].....	13
Tabulka 2: Kompozitní materiály vnější vrstvy sendviče [9].....	44
Tabulka 3: Mechanické vlastnosti jader [9].....	46
Tabulka 4: Mechanické vlastnosti sendvičových panelů [9]	48
Tabulka 5: Vypočtené hodnoty ze vzorců [9].....	51
Tabulka 6: Důležité hodnoty pro výběr vhodného sendvičového panelu [9].....	52
Tabulka 7: Porovnání původního panelu s optimalizovanými panely [9]	53

SEZNAM GRAFŮ

Graf 1: Závislost modulu pružnosti v ohybu na hustotě kompozitu [9]	44
Graf 2: Závislost modulu pružnosti ve smyku na hustotě [9].....	45
Graf 3: Závislost modulu pružnosti v ohybu na hustotě vytvořených sendvičů [9]	46
Graf 4: Závislost ceny sendvičových panelů [9]	47

