

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta strojní

Ústav materiálového inženýrství



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Sendvičové materiály

Sandwich-structured composite

Autor: Daniel Hemer

Studijní obor: Technologie, materiály a ekonomika strojírenství

Vedoucí práce: Ing. Zdeňka Jeníková, Ph.D.

Praha 2019

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Hemer** Jméno: **Daniel** Osobní číslo: **424825**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav materiálového inženýrství**
Studijní program: **Výroba a ekonomika ve strojírenství**
Studijní obor: **Technologie, materiály a ekonomika strojírenství**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Sendvičové materiály

Název bakalářské práce anglicky:

Sandwich-structured composite

Pokyny pro vypracování:

Cíl: Získat přehled o sendvičových materiálech. Vytvořit a otestovat vzorky složených materiálů.

Postup:

Studium problematiky sendvičových materiálů.

Vytvoření přehledu výrobních technologií a používaných materiálů.

Navržení přípravy vrstvených vzorků za pomoci vybavení laboratoří ÚMI.

Zvolení metodiky testování a vyhodnocení připravených vzorků.

Seznam doporučené literatury:

- [1] MEISSNER, Bohumil a Václav ZILVAR, 1987. Fyzika polymerů: struktura a vlastnosti polymerních materiálů. Praha: SNTL.
- [2] GERDEEN, James C., Harold W. LORD a Ronald A. L. RORRER, 2006. Engineering design with polymers and composites. Boca Raton. Materials engineering (Marcel Dekker, Inc.), 30. ISBN 08-247-2379-1.
- [3] GRELLMANN, Wolfgang a Sabine SEIDLER, c2007. Polymer testing. Cincinnati, Ohio: Hanser. ISBN 978-1-56990-410-7.
- [4] Firemní literatura

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:


Ing. Zdeňka Jeníková, Ph.D., ústav materiálového inženýrství FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **02.04.2019**

Termín odevzdání bakalářské práce: **26.07.2019**

Platnost zadání bakalářské práce: _____


Ing. Zdeňka Jeníková, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce



prof. RNDr. Petr Špatenka, CSc.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry


prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

15.4.2019
Datum převzetí zadání


Podpis studenta

Poděkování

Rád bych zde poděkoval vedoucí mé bakalářské práce Ing. Zdeňce Jeníkové, Ph.D. za odborné vedení, čas věnovaný při konzultacích, trpělivost, vstřícnost a cenné rady při zpracování této práce.

Dále bych chtěl také poděkovat Bc. Jakobovi Antoňovi za pomoc s přípravou zkušebních vzorků k měření praktické části této práce. V neposlední řadě děkuji rovněž mé rodině a mým blízkým, kteří mne podporovali po celou dobu mého studia a při tvorbě mé bakalářské práce.

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, které uvádím v seznamu použité literatury.

V Praze dne:

.....

Podpis

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá problematikou **sendvičových materiálů**.

Teoretická část pojednává o sendvičových konstrukcích, kde je rozebrána otázka samotného složení a výrobních možností těchto panelů. Současně jsou zde uvedeny způsoby výroby, materiály k tomu využívané, a v neposlední řadě také jejich testování.

V praktické části je popsán vývoj experimentu a tvorba zkušebních vzorků s odlišnými rozměry, které byly vytvořeny pomocí 3D tiskárny a následně podrobeny testu tříbodovým ohybem. Výsledky tohoto testu byly zpracovány a bylo provedeno jejich porovnání.

Klíčová slova:

sendvičové materiály, sendvičové panely, konstrukce, potah, jádro, voština, buňka

Abstract of Thesis

This bachelor's thesis deals with the topics of **sandwich materials**.

The theoretical part discusses sandwich structures, in particular the composition and manufacturing possibilities of sandwich panels. At the same time the production modes and materials used are enlisted herein, and last, but not least, the testing procedures.

The practical part describes the evolution of an experiment and the preparation of samples of various dimensions created using a 3D printer, which subsequently have been subject to three-point bending test. The test results were compiled and compared.

Key words:

sandwich materials, sandwich panels, structure, coating, core, honeycomb, cell.

Seznam použitých zkratek

3D	trojdimenzionální (trojrozměrný)
UMI	Ústav materiálového inženýrství

Veličiny

b	šířka [mm]
b_p	šířka panelu [mm]
h	tloušťka [mm]
h_d	tloušťka dílu, ze kterých je složen panel [mm]
h_p	tloušťka panelu [mm]
l	délka [mm]
l_p	délka panelu [mm]
L	vzdálenost podpěr u ohybové zkoušky [mm]
m	hmotnost [g]
ρ	hustota [kg/m^3]
s	průhyb [mm]
Δs	rozdíl průhybů s_2 a s_1 [mm]
t	tloušťka vzorku [mm]
F	síla [N]
ΔF	rozdíl sil F_2 a F_1 [N]
E	modul pružnosti v ohybu [MPa]
E_m	měrný modul pružnosti v ohybu [MPa]
K	ohybová tuhost průřezu [$\text{N}\cdot\text{mm}^2$]
I	Kvadratický moment setrvačnosti pro obdélníkový průřez [mm^4]
ε	deformace ohybem [-]
σ_f	napětí v ohybu [N/mm^2]

Lepidla

DP190	epoxidové lepidlo značené DP190 (firma 3M)
DP8005	akrylátové lepidlo značené DP8005 (firma 3M)

Materiály

ABS	Akrylonitril-butadien styren
PA6	Polyamid 6
PC	Polykarbonát
PE	Polyethylen
PET	polyethylentereftalát
PLA	biopolymer polylaktická kyselina
POM	Polyoxymetylén
PP	Polypropylen
PS	Polystyren
PUR	polyuretan
PVC	polyvinylchlorid

Obsah

1	Úvod.....	10
A. Teoretická část		
2	Kompozitní materiály	11
3	Sendvičové materiály	12
3.1	Obecná charakteristika	12
3.2	Historický vývoj	13
3.3	Vlastnosti sendvičů.....	14
3.4	Namáhání sendvičové konstrukce	16
3.5	Výrobní možnosti	17
3.6	Potahy	18
3.7	Jádra	20
3.7.1	Voštinová jádra	21
3.7.2	Pěnová jádra	26
3.7.3	Balsa	30
3.8	Lepidla	31
3.9	Zkoušky mechanických vlastností sendvičů	32
3.10	Příklady aplikací sendvičů	34
B. Praktická část		
4	Volba výrobního postupu	38
5	Parametry zkušebních vzorků	41
5.1	Použitý materiál a lepidlo.....	42
5.1.1	PLA (polylaktická kyselina).....	42
5.1.2	Lepidlo DP 190	42
6	Postup výroby vzorků	43
6.1	Tisk vzorků (parametry tisku).....	43
6.2	Lepení.....	44

7	Zkoušení vzorků	45
7.1	Zkouška ohybem	46
7.2	Vyhodnocení výsledků	48
8	Závěr	55
9	Seznam použité literatury	57
10	Seznam obrázků.....	60
11	Seznam tabulek	61
12	Přílohy.....	62

1 Úvod

V dnešní době se v odvětví průmyslu přikládá velký důraz na bezpečnost a ekonomičnost provozu výrobků a jejich konstrukcí. Mezi faktory, které ve velké míře ovlivňují tyto požadavky, patří vysoká pevnost konstrukce při její nízké hmotnosti. Tento poměr vlastností výborně splňují kompozitní materiály, mezi které řadíme právě **materiály sendvičové**. Sendvičové materiály se pro své dobré mechanické vlastnosti a nízkou hmotnost těší velké oblibě hlavně v dopravním průmyslu a zde zejména v letectví.

Hlavním předmětem teoretické části této práce je studium problematiky sendvičových materiálů a vypracování literární rešerše, která seznamuje se základními informacemi na toto téma. Vytváří tak přehled o jejich konstrukčním řešení, výrobních technologiích, používaných materiálech a metodikách testování.

Cílem praktické části je návrh přípravy zkušebních vzorků a výběr metodiky testování s následným vyhodnocením výsledků. Věnuje se tak vývoji experimentu, ve kterém je zahrnut výběr vhodné výrobní technologie, materiálu a konstrukčních parametrů zkušebních vzorků. Následně se zabývá prověřením mechanických vlastností zvolenou metodikou testování a vyhodnocením výsledků.

Pro výrobu jednotlivých částí lepených sendvičových vzorků bude využita metoda 3D tisku z termoplastického biopolymeru PLA. Jako hlavní metoda testování bude zvolena zkouška tříbodovým ohybem, které budou vzorky podrobeny. Zjištěné hodnoty budou zpracovány a vzájemně porovnány.

Hlavní motivací k vypracování této bakalářské práce byla perspektivita těchto materiálů a zájem autora zabývat se danou problematikou více do hloubky.

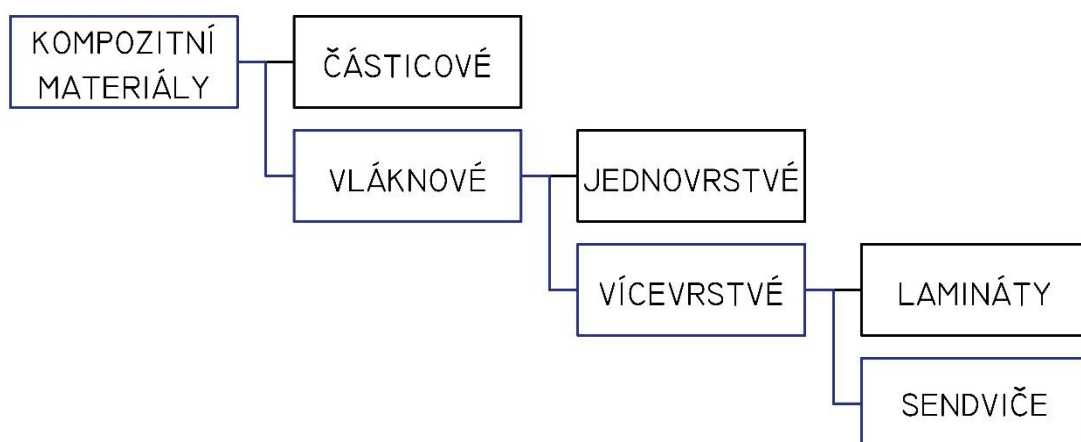
A. Teoretická část

2 Kompozitní materiály

Kompozitní materiál je kombinace dvou nebo více chemicky odlišných složek (materiálů). Jednotlivé složky si přitom zachovávají svou identitu (tzn. neprobíhá zde jejich sloučení či rozpouštění). První složka má úlohu vyztužující a je proto nazývána **výztuž**. Je tvrdší, tužší, pevnější a většinou nespojitá složka. Druhá nazývaná **matrice** je spojitá a obvykle poddajnější složka, která má více úloh: zajišťuje spojení výztuže v kompaktní celek (tvar), zabraňuje vzniku a následnému šíření trhlin, chrání výztuž před účinky vnějšího prostředí. [1,2]

Použití kompozitů na vysoké úrovni ve strojírenství je motivováno zejména navrhováním dílů a konstrukcí s vysokými hodnotami mechanických vlastností, které se mohou nejen rovnat, ale i převyšovat úrovně mechanických vlastností materiálů jako jsou např. slitiny hliníku, hořčíku a titanu, ale dokonce i ocelí. Společně se snížením hmotnosti konstrukcí přispívají ke zvýšení životnosti a bezpečnosti. Odpadají vysoké nároky na údržbu a není zde zapotřebí dalších povrchových úprav odolných vůči korozi. [1]

Na následujícím schématu (*obr. 1*) můžeme pozorovat obecné rozdělení kompozitů, které vede až k **sendvičovým materiálům**.



Obr. 1 Obecné rozdělení kompozitních materiálů

3 Sendvičové materiály

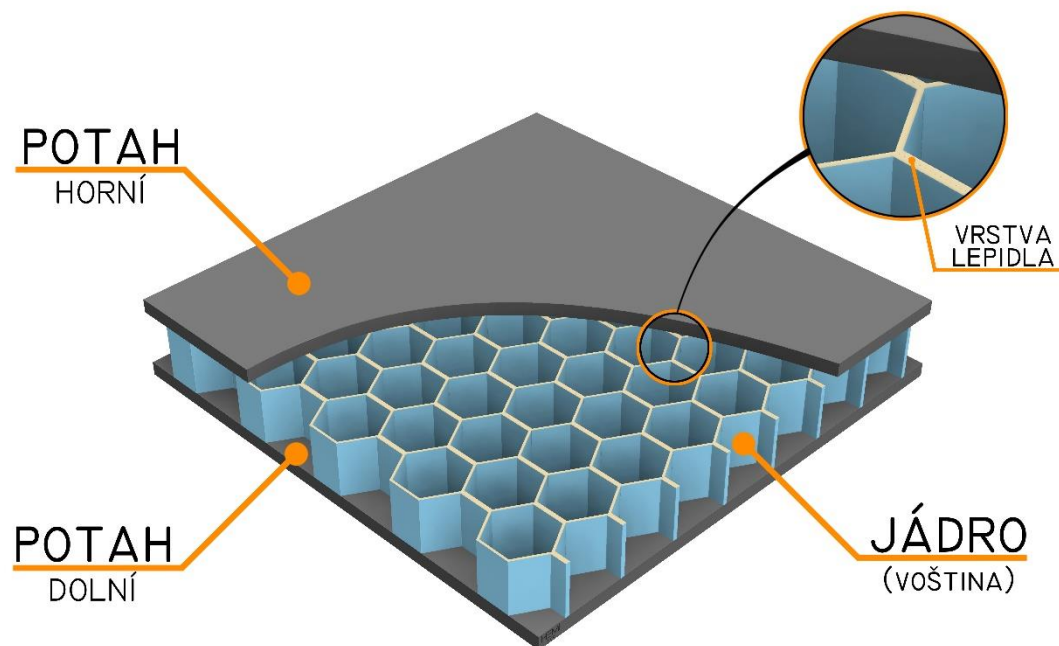
3.1 Obecná charakteristika

Sendvičové materiály jsou progresivním druhem kompozitů a řadíme je k vrstveným materiálům. Konstrukce (sendvič) se skládá z několika vrstev s rozdílnými vlastnostmi, které jsou navzájem pevně spojeny a tvoří nerozebíratelný celek. Při jejich výrobě je možné použít kombinaci různorodých materiálů, které mají odlišné mechanické a fyzikální vlastnosti. Nejen z tohoto důvodu jsou sendvičové materiály velmi snadno přizpůsobitelné požadovaným kritériím. [1,3]

Princip efektivní sendvičové konstrukce spočívá v oboustranném pokrytí jádra vnějšími vrstvami z pevného materiálu o malé tloušťce, tzv. potahy. Výplňový materiál mezi potahy nazýváme jádro sendvičů, které je charakteristické zejména svou nízkou hmotností a dobrými mechanickými vlastnostmi v tlaku a smyku. U vnějších vrstev, které plní funkci ochrany jádra, jsou klíčové vlastnosti jiné, protože jsou namáhány nejvíce na ohyb (tlak a tah). Tyto části jsou k sobě v převážné většině spojeny vrstvou lepidla. [4,5]

Existuje zde mnoho způsobů, jak můžeme sendvičové materiály rozlišovat, ale tím nejdůležitějším je rozdělení podle použitého druhu jádra (výplně).

Pro lepší představu této vrstvené konstrukce je přiložen *obrázek 2*, na němž můžeme vidět konkrétně sendvič s voštinovým jádrem se šestiúhelníkovými buňkami.



Obr. 2 Struktura sendvičové konstrukce s voštinovým jádrem se šestihranným tvarem buněk

Sendvičová konstrukce nemusí nutně znamenat „jen“ konstrukci o třech vrstvách spojených lepidlem. Příkladem může být hybridní materiál **Glare**. Jedná se o laminát, který je složený z více tenkých vrstev hliníku a polymerního kompozitu vyztuženého skleněnými vlákny (prepreg). Konstrukce s využitím této kombinace vrstev (kov + polymer) se jeví jako velmi perspektivní směr v oblasti vícevrstevých kompozitních materiálů. [1]

3.2 Historický vývoj

Jedna z prvních myšlenek využití vysokopevnostních kompozitních materiálů v leteckém průmyslu se zrodila již v roce 1916. R. Kemp podal patentovou přihlášku na konstrukci letadla, která byla téměř celá složena z vyztužených plastů. [6]

Kritický nedostatek potahových materiálů během druhé světové války způsobil, že u letounu typu Mosquito bylo použito tenkých březových fólií pro potah, ve spojení s balsovou výplní. [5]

Důležitými mezníky ve vývoji sendvičových materiálů v leteckém průmyslu jsou:

- r. 1942 Společnost Chance Vought vyvinula sendvičový materiál z kovových potahů a balsové výplně, tzv. Metalite
- r. 1943 První sendvičové konstrukce pro letadla, složené z polyesterového laminátu a jádra z balzového dřeva
- r. 1944 Vývoj a úspěšné letové zkoušky trupu se sendvičovou strukturou z vyztužených plastů (Wright-Patterson)
- r. 1945 Zahájení výroby materiálu s voštinovou strukturou (L. S. Meyer) [5,6]

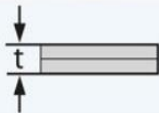
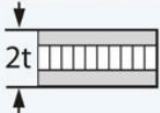
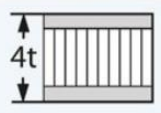
3.3 Vlastnosti sendvičů

Sendvičové konstrukce disponují vysokým počtem výhod. Hlavní předností sendvičů je vysoká ohybová pevnost a tuhost při nízké hmotnosti.

Výsledné mechanické vlastnosti celku v podobě sendvičové konstrukce jsou dány synergickým efektem jednotlivých složek použitých při její výrobě a lze je v širokém rozmezí ovlivnit výběrem a následnou kombinací jádra, potahů a způsobu spojení. Pro možné použití sendvičové konstrukce jako jednoho kompaktního celku musí být zajištěna výborná soudržnost všech jeho částí. V tomto směru hraje neodmyslitelnou roli jak adhezní pevnost lepidla k oběma použitým materiálům, tak i koheze samotného lepidla použitého ke spojení jádra s potahy a v případě voštinového jádra i lepidla spojující jednotlivé vrstvy voštiny. [3,7]

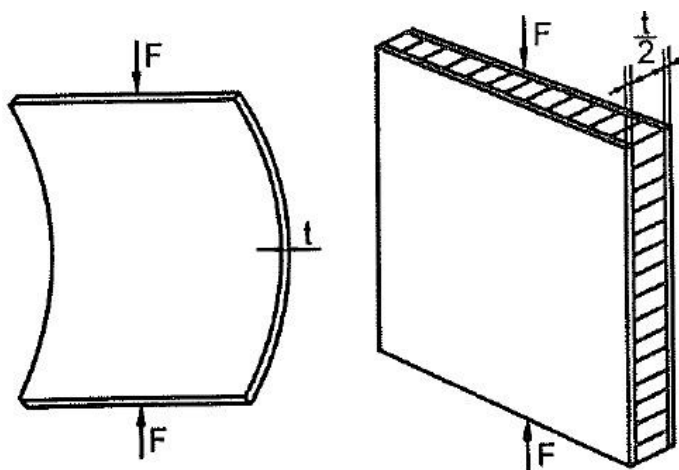
Závislost hodnot materiálových a mechanických vlastností sendvičového panelu (tj. pevnost, tuhost a hmotnost) na výšce jádra a kompletně homogenního materiálu můžeme snadno pozorovat na údajích v *tab. 1* firmy *Forlit & Metal*, ve které je uveden konkrétní případ hliníkového panelu. Z tabulky je patrné, že použitím sendvičové konstrukce a jejím ideálním návrhem můžeme docílit značného zvýšení tuhosti a pevnosti v ohybu při zachování nízké hmotnosti.

Tab. 1 Závislost mechanických vlastností hliníkového sendvičového panelu na konstrukci [8]

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

- Vysoká tuhost a pevnost (v ohybu)

Tuhost a pevnost v ohybu zvyšujeme právě užitím jádra v sendvičovém panelu (viz. obr. 3). Je zřejmé, že když se zvětšuje tloušťka jádra, tak roste pevnost a tuhost v ohybu, avšak při velmi malém nárůstu hmotnosti. Plech o tloušťce t se při působení sil F prohýbá. Při spojení dvou potahů o tloušťce $t/2$ a voštinové výplně, zůstává sendvič při působení stejných sil beze změny. Při dimenzování sendviče je zároveň důležité posuzovat smykovou pevnost jádra a při konstrukčním řešení jádra a celku tento fakt zohlednit. Pevnost jádra v tlaku, která roste společně s jeho hustotou, ovlivní výslednou pevnost sendviče v tlaku, ve směru jeho tloušťky. [3,5]



Obr. 3 Porovnání vlastností samotného plechě a sendvičové konstrukce [5]

- Nízká hmotnost

Jeden z hlavních faktorů, který podmiňuje aplikaci sendvičových konstrukcí v praxi, je požadovaná úspora hmotnosti. Tato nesporná výhoda se výrazně zaslouží o zvýšenou ekonomičnost. Což se kladně projeví v podobě ušetřeného paliva při jakémkoliv druhu přepravě nákladu. [5]

Jako vzorový příklad úspory hmotnosti je aplikace těchto konstrukcí s extrémně tenkými potahy na kormidla letounů. Téměř kompletní odstranění nýtů má výrazně kladný vliv na hmotnost a aerodynamickou účinnost této pohyblivé součásti, kdy na stabilizovaném potahu jsou zachovány podmínky laminárního toku. Zavedením sendvičů do leteckých konstrukcí bylo dle firmy *A. V. Roe & Co., Ltd.* dosaženo patnácti až třicetiprocentní úspory hmotnosti vybraných konstrukcí v porovnání s konvenční výrobní technologií. Tento fakt potvrzuje tabulka 2 uvedená níže. [5]

Tab. 2 Měrné hmotnosti různých materiálů [5]

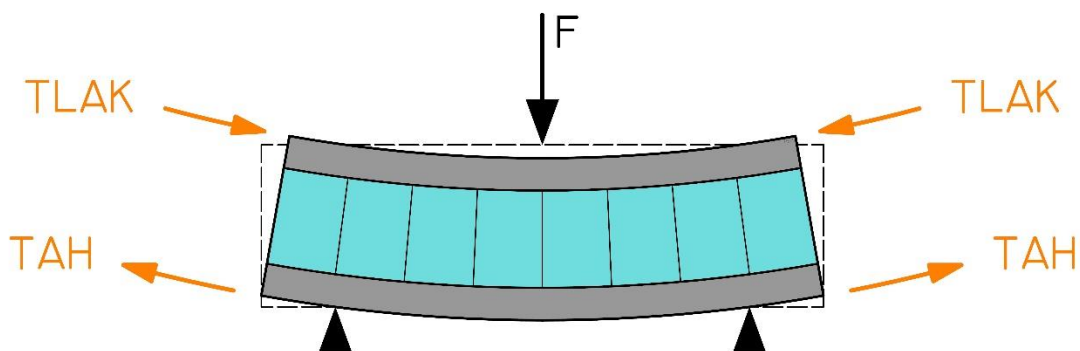
Označení materiálu	Hustota (kg m^{-3})
olovo	11 200
měď	8 900
nerezavějící ocel	7 950
titan	4 950
hliníková slitina	2 680
hořčíková slitina	1 720
voštiny VZLÚ	25 až 120

- Výborné izolační vlastnosti

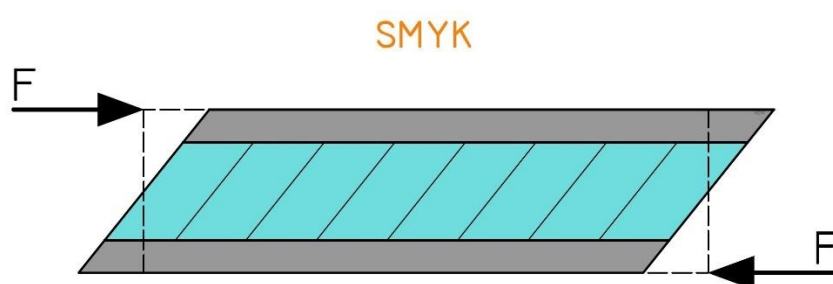
Izolační vlastnosti sendvičových materiálů jsou velmi závislé na tom, zda použijeme jádro voštinové či pěnové. Ve druhém případě, tedy v případě pěnových jader dále závisí na druhu použitého lehčeného materiálu, které jsou podrobněji popsány v kapitole 3.7.2. Obecně lze říci, že mnohem lepšími izolační vlastnosti disponují jádra pěnová, a to jak tepelnými, tak i zvukovými.

3.4 Namáhání sendvičové konstrukce

Sendvičové konstrukce jsou namáhány tahem, tlakem a také na smyk. Na *obr. 4* můžeme vidět, že při ohybu na sendvičové konstrukce, konkrétně tedy na potahy, působí odlišné síly. V případě, že síla působí shora, je horní potah namáhán především na tlak a spodní potah je namáhán především tahovou silou. Jádro sendviče je namáháno spíše na smyk, což je znázorněno na *obr. 5*.



Obr. 4 Znáznorněné namáhání sendvičového panelu na ohyb



Obr. 5 Znáznorněné namáhání sendvičového panelu na smyk

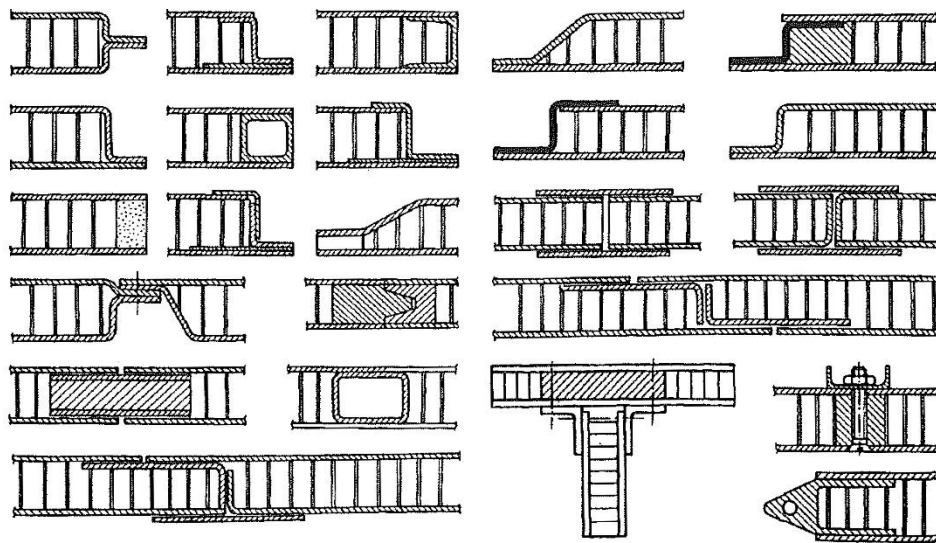
3.5 Výrobní možnosti [5]

Sendvičové konstrukce zmenšují počet použitých dílů, zjednodušují výrobu a montáž a dále umožňují vyrábět jak rovné, tak i tvarově složité plochy. Platí zde, že výroba těchto konstrukcí se vyplácí jen při velkém počtu součástí a značných rozměrů. Pro ideální využití všech výhod sendvičových materiálů je tedy třeba uvážit zejména:

- počet vyráběných součástí
- vhodnost součástí pro lepení
- rozměry a tvarovou složitost lepených součástí

V případě tvarově náročné konstrukce se ustupuje od kovových potahů z důvodu vysokých nákladů na výrobu a přednost dostávají kompozitní potahy, které jsou při výrobě v tomto ohledu mnohem flexibilnější. Tato problematika tvaru je velmi důležitá také při volbě vhodného jádra. Společně s vysokými nároky na komplikovaný tvar konstrukce roste i náročnost výroby voštin, a proto se tvar voštiny zjednodušuje (obdélníkový tvar) nebo se používá pěnových jader. [3]

Pro spojování sendvičových materiálu se v převážné většině využívá lepení. Značné výhody lepených spojů využívá zejména letecký průmysl. V porovnání s nýtovanými díly jsou lepené díly o čtvrtinu lehčí, výrobní čas se zkrátí na čtvrtinu a výrobní náklady klesnou na třetinu nákladů klasické konstrukce. Lepení se používá jak ke spojení potahů s jádrem, tak i k lepení jednotlivých částí jádra (v případě voštin). Dále je z konstrukčního hlediska důležitý způsob ukončení a uchycení panelu, případně spojování více panelů v jeden celek. Na následujícím *obr. 6* jsou uvedeny příklady ukončení a spojování sendvičových panelů.



Obr. 6 Příklady ukončení sendvičových panelů a jejich spojování [5]

3.6 Potahy

Potahy jsou vnější tenké vrstvy, kterými u sendviče docílíme vysoké tuhosti v ohybu. Potahový materiál je nosným prvkem konstrukce, proto jsou na něj kladeny tyto požadavky: odolnost zatížení v tahu, tlaku, smyku i ohybu. Dále se u něj vyžaduje rozměrová stálost, hladký povrch a stejně tak je nutné, aby splňoval i estetické požadavky. Pro tyto účely lze používat například různé druhy vláknových kompozitů, slitiny hliníku, hořčíku a titanu, korozi vzdornou ocel a v neposlední řadě také dřevo, impregnovaný papír apod. [5]

Potahy z oceli se volí u aplikací v případě, je-li požadována vysoká mechanická, tepelná a erozní odolnost. Hliníkové slitiny se používají kvůli jejich malé hustotě, a

především korozní odolnosti. Pro nejčastěji používané tepelně zpracované slitiny hliníku jsou tloušťky plechu 0,3 až 1,6 mm. A ve speciálních případech až 6,3 mm. [5]

Kompozitové vrstvy s polymerní matricí vyztužené skleněnými nebo uhlíkovými vlákny, tzv. prepregy, jsou výhodné zvláště při výrobě tvarově složitějších součástí a ploch, kde výroba z kovových materiálů naráží na obtíže. Vyztužené plasty se vyrábí podstatně snadněji a v některých případech i bez použití tlaku. V případě kombinace se sklotextilními voštinami, napuštěnými pryskyřicí, je možné dokonce získat sendvičový materiál s výhodnými dielektrickými vlastnostmi, který propouští elektromagnetické vlny. Proto se tento druh sendviče často používá pro výrobu krytů antén. [1,5]

- Prepregy [1,9]

Prepregy (viz. obr. 7) jsou polotovary, které jsou tvořeny předimpregnovanými vlákny pryskyřicí a jsou částečně vytvrzené. Takto připravené polotovary při dalším zpracování není nutné dále impregnovat.

Reaktoplastové prepregy (polotovary) mohou být v tomto stavu skladovány jen po omezenou dobu při nízké teplotě. Pro výsledný tvar a tloušťku se vrství (ručně, strojně) do formy požadovaného tvaru, ve které se vytvrdí za působení teploty a tlaku. Podstata zpracování reaktoplastů je vytvrzování, což je chemická síťová reakce. Její průběh je hůře kontrolovatelný a mohou při ní vznikat vedlejší zplodiny.

Významným trendem ve vývoji těchto kompozitů s využitím polymerní matrice, je tedy snaha přecházet z matic reaktoplastových na matice termoplastové. Zpracování termoplastových kompozitů je založeno na fyzikálním procesu roztavení nebo pouze částečném natavení a následném tuhnutí během ochlazení. Termoplastové prepregy mají neomezenou skladovatelnost, výbornou chemickou odolnost a oproti nemodifikovaným reaktoplastům mají velmi dobrou houževnatost.



Obr. 7 Polotovar ve formě prepregu [10]

V případě vyztužujících vláken, z hlediska teoreticky dosažitelných mechanických a fyzikálních vlastností mají největší význam pro budoucí vývoj v kompozitech vlákna uhlíková. Jejich vysoká cena však zatím brání jejich využití ve velkosériových výrobcích, a proto se do popředí zájmů dostává otázka, jak do budoucna zlevnit jejich výrobu a umožnit tak jejich širší užití.

3.7 Jádra

Jádro, vrstva o nízké hustotě, která se stará o vyztužení celku a o vyrovnání smykových sil působících mezi potahy může mít několik konstrukčních podob. V dnešní době nachází největší uplatnění zejména jádra voštinová a pěnová. Volba jádra je ovlivněna požadavky na použití sendviče. Jedním z hlavních požadavků, které se kladou na jádra, je co nejmenší hustota při vysokých pevnostech v tlaku a ve smyku.

V prvním případě, tedy použitím voštinového jádra, docílíme velmi pevné sendvičové konstrukce a v případě druhém, při použitím pěnového jádra získáme tuhou konstrukci s výbornými tlumícími a izolačními vlastnostmi. Mezi další výhody závislé na volbě jádra patří odolnost vůči vzniku a šíření trhlin, odolnost proti rázům, tepelná a únavová odolnost, tlumení vibrací a také tepelná a akustická izolace. [3,7]

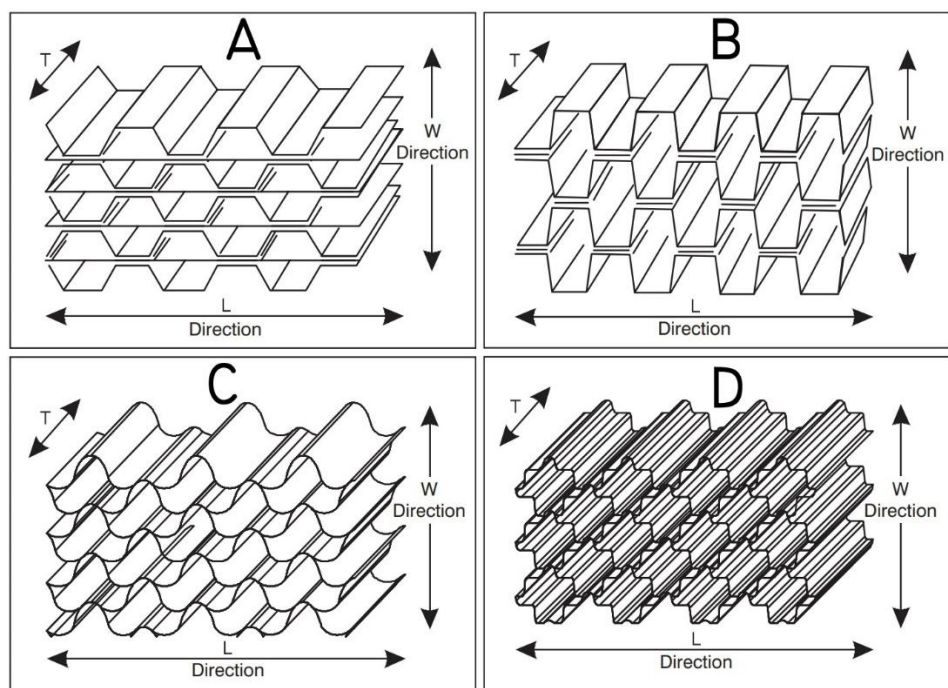
3.7.1 Voštinová jádra

Jedná se o druh výplní, které v nejběžnějším provedení připomínají šestiúhelníkové (hexagonální) buňky včelích plástů (viz. obr. 2 v kapitole 3.1). Použitím voštinových výplní se za pomoci spojení stěn buněk jádra společně s potahy, docílí zejména příčné smykové a vzpěrové tuhosti. [5]

Druhy voštin z pohledu tvaru buněk:

Z obrázku 8 můžeme pozorovat, že kromě symetrické hexagonální buňky se používají také:

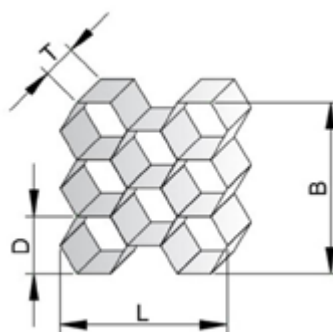
- A) *zesílené hexagonální buňky*, které se používají pro speciální účely a jsou proloženy ve středu buněk páskou fólie. Touto úpravou docílíme zvýšení pevnosti ve smyku o více než 100 %. Typická aplikace takto zesílené voštiny jsou brzdící klapky na křídlech letadel, kde na koncích panelů působí vysoká smyková napětí. [5,11]
- B) V případech, kdy je nutné zvýšit pevnost v příčném směru, se místo hexagonálních používají voštiny s *obdélníkovým* tvarem buněk. Tato „úprava“ hexagonálního tvaru buněk smykové vlastnosti ve směru „W“ zvyšuje, ale na druhou stranu ve směru „L“ je snižuje. Tomuto typu se také jinak říká přeexpandovaná voština. Uplatňují se například u kořenů křídel. Jejich další úpravou získáme voštiny kosodélníkové, které se používají pro náběžné hrany křídel. [5,11]
- C) *Sinusové (Flex) buňky* zajišťují dobrou tvarovatelnost při zakřivení bez vybočení stěn buněk. Velmi dobrá je pevnost v tlaku ve směru „T“. Při tvarování do malých poloměrů poskytuje vyšší pevnost ve smyku než šestihránné jádro s ekvivalentní hustotou. I v tomto případě se využívá vyztužení (zesílení) pomocí proložení buněk páskou fólie. [5,11]
- D) *Double-Flex*, dvojitě zvlněné buňky v buněčné stěně, které zajišťují výbornou tvarovatelnost a pevnost v tlaku a smyku.



Obr. 8 A) zesílené hexagonální buňky, B) obdélníkové (přeexpandované), C) vlnitá voština (flex), D) Double-Flex voština [12]

Rozměry buněk voštinových jader:

- Velikost buňky (D) [mm]
- Tloušťka (T) [mm]
- Délka (L) [mm]
- Šířka (B) [mm]



Obr. 9 Příklad značení rozměrů voštiny [8]

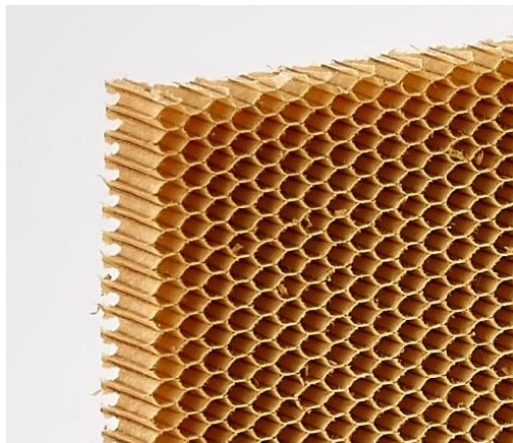
Druhy voštin z pohledu použitého materiálu:

Nomexové voštiny

Nomexová voština, kterou můžeme vidět na *obr. 10*, je vytvořena z papíru Nomex, což je forma papíru tvořena nejčastěji aramidovými (kevlar) vlákny. Dále se také můžeme setkat s Nomexem s celulózovými vlákny. Polotovar – papírová voština se ponoří do žáruvzdorné fenolové pryskyřice a vzájemnou kombinací těchto materiálů, se vytvoří voštinové jádro s vysokou pevností a velmi dobrou odolností vůči ohni. Často se

potom používají v interiéru letadel, kde je upřednostňována jeho nízká hmotnost. Výrobní možnosti umožňují vytvořit speciální druh voštin s vyplněnými buňkami fenolovou pěnou, který se používá při protipožární ochraně (např. pro interiér vozů veřejné dopravy). [13,14]

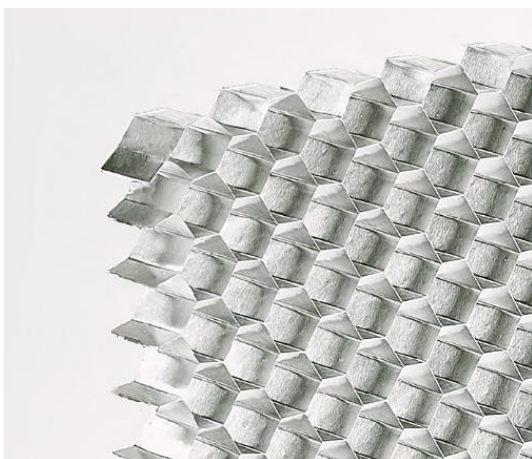
Nomex se těší stále větší popularitě v konstrukčních aplikacích díky výborným mechanickým vlastnostem, nízké hustotě a dlouhodobé stabilitě vlastností i přes vyšší pořizovací cenu v porovnání s ostatními materiály. [13]



Obr. 10 Nomexová voština [14]

Hliníkové voštiny [13,15]

Hliníkové voštiny disponují jedním z nejvyšších poměrů pevnost/hmotnost z pohledu konstrukčních materiálů. Velká flexibilita těchto voštin spočívá v mnoha možných tvarech a velikostech buněk a tloušťkách samotné fólie. I přes tyto kladné vlastnosti, ke kterým se dále řadí například nízká pořizovací cena, je zde ale riziko koroze při styku s mořskou vodou. Z tohoto důvodu jsou omezeny aplikace na lodních konstrukcích, u kterých dochází k přímému kontaktu se slanou vodou. Hliníková voština nemá „mechanickou paměť“, takže v případě mechanického nárazu do panelu se sice pružné potahy vrátí do původního stavu (pružná deformace), ale hliníkové jádro se nevratně zdeformuje (plastická deformace). Příklad hliníkové voštiny je zobrazen na obr. 11.



Obr. 11 Hliníková voština [15]

Termoplastické voštiny [13]

Výroba jader z různých druhů termoplastů skýtá mnoho výhod pro aplikace, jako jsou vysoká rozmanitost vlastností různých druhů termoplastů, nízká hustota a případně snadná recyklace. Nevýhodou je obtížně dosažitelná adhézní pevnost mezi voštinou a potahem.

- **ABS – Akrylonitril-butadien styren** – se vyznačuje dobrou tuhostí, rázovou houževnatostí, tvrdostí povrchu a rozměrovou stálostí
- **PC – polycarbon** – má výbornou odolnost vůči UV, světelnou propustnost, dobrou tepelnou odolnost a samozhášitelnost
- **PP – polypropylen** – vyniká dobrou chemickou stálostí
- **PE – polyethylen** – výhodná je pořizovací cena základního materiálu.

Výroba voštinových jader:

Při výrobě voštinových panelů bylo pro spojování kromě lepení dále zkoušeno nýtování, pájení a bodové svařování. Ani jeden z těchto způsobů se však nedočkal velkého použití a zejména pro velký počet jednotlivých spojů se ve výsledku nevyrovnal výhodám lepení. V současnosti jsou tedy nejvíce rozšířeny lepené voštiny, což vyplývá z různorodosti používaných materiálů v těchto konstrukcích. [5,16]

V podstatě jsou známy dvě metody strojní výroby voštin:

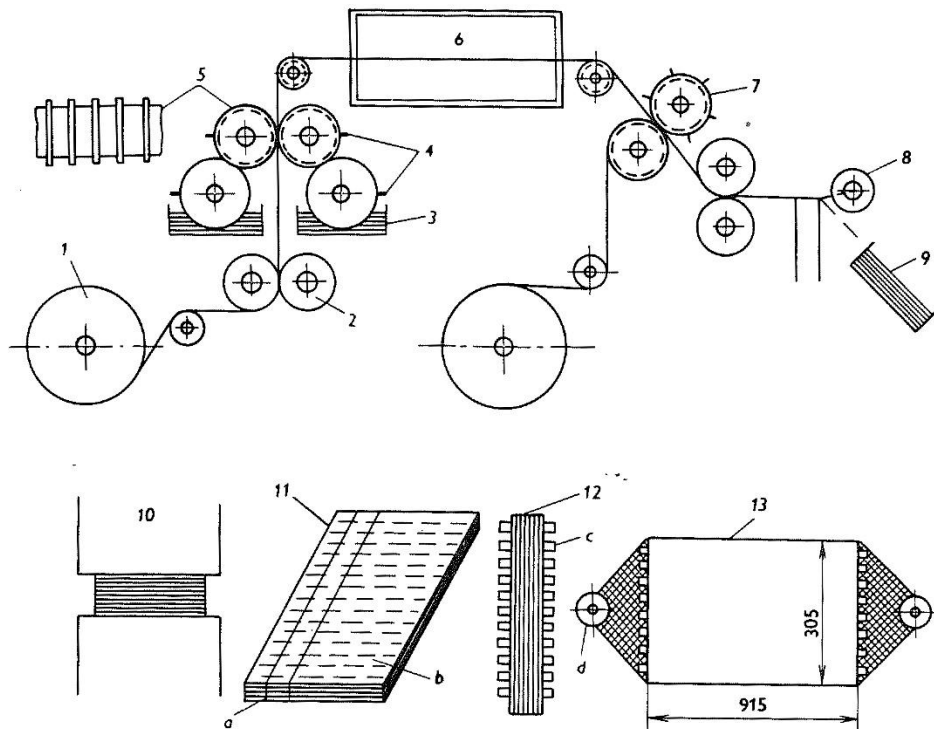
1. Metoda postupného narůstání

Její princip spočívá v předtvarování pásky fólie kovu rolnami do požadovaného tvaru a následného nanesení vrstvy lepidla na lepené plochy a v postupném skládání těchto předtvarovaných vrstev na sebe, čímž se vytvoří šestiúhelníková struktura buněk. Tato metoda již není v dnešní době tolik využívána. [5]

2. Expanzní metoda [17]

V dnešní době nepoužívanější metoda výroby voštinových jader. Voštiny se touto metodou vyrábějí ze svitků specifikované hliníkové fólie dané tloušťky. Jde o poměrně složitý výrobní proces, kde nejdříve pomocí speciálního stroje dojde k nanesení vrstvy lepidla na hliníkovou fólii a následně se fólie seřízne na požadovaný rozměr. Takto připravené archy se vyskládají na sebe a dají se do lisu, kde se tlakem a zvýšenou teplotou aktivuje lepidlo, čímž dojde ke spojení hliníkových fólií v jeden blok.

Následně se vyrobený hliníkový blok nařeže na požadovaný rozměr (tloušťku sendvičového panelu), dojde k expanzi (roztažení) na určitou délku a tím vznikne samotné voštinové jádro, které je nachystané pro slepení s potahy a vytvoření finálního voštinového panelu. Tento celý proces je schematicky naznačen na obr. 12.

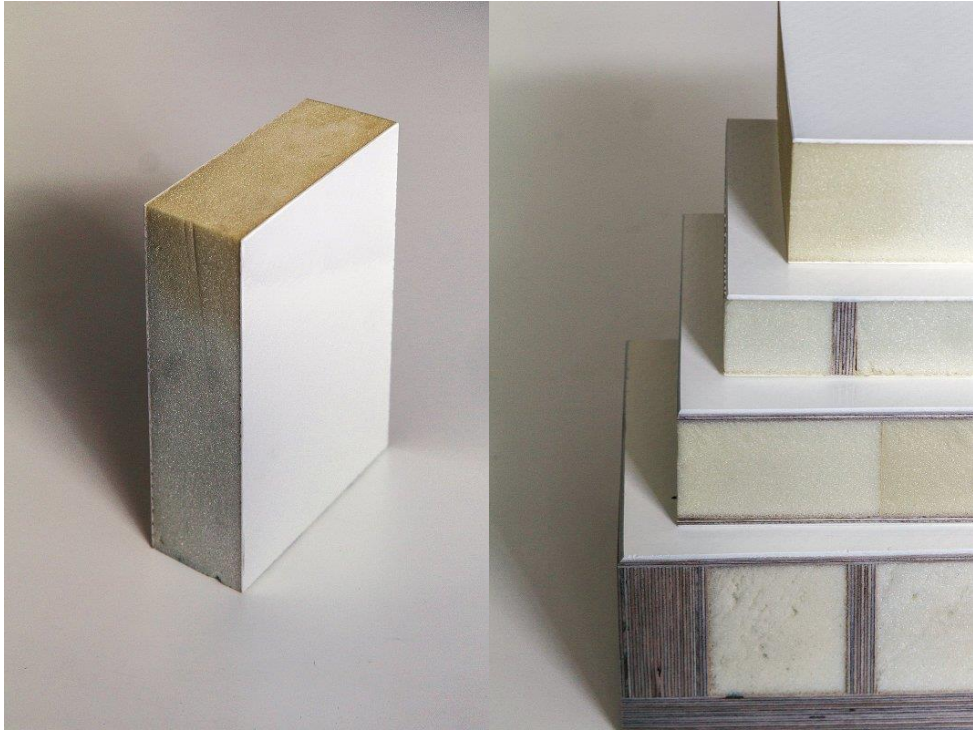


Obr. 12 Schéma výroby voštinového jádra expanzní metodou s podélným nanášením lepidla
 1 – odvíjecí cívka s fólií, 2 – hnací válce, 3 – lepidlo, 4 – stěrače přebytku lepidla, 5 – nanášecí válce lepidla, 6 – sušárna, 7 – perforační válec, 8 – rotační nůžky, 9 – sběrač,
 10 – vytvrzování v lisu, 11 – řezání bloku, 12 – obroběný odřezek, 13 – expanze jádra,
 a – rovina řezu, b – čára spojení lepením, c – záchytky, d – nůžkové kleště [5]

3.7.2 Pěnová jádra [5]

Pěna (tuhá lehčená hmota) je jemná a pravidelná disperze plynu v celém objemu tuhé hmoty, jejímž použitím se výrazně zvýší stabilizace potahů. Na obr. 13 jsou na ukázkou uvedeny fotografie sendvičů s pěnovými jádry využívané ve stavebním a automobilovém průmyslu.

Výroba těchto lehčených pěn vychází ze základního polymerního materiálu (hmoty), do které je přidána látka, která za zvýšené teploty uvolňuje plyn nebo do plynného stavu přechází. V určitém okamžiku nastává expanze plynu v celém objemu polymerního materiálu za současného zpevnění lehčené struktury. Dodatečné zvětšování nebo zmenšování objemu lehčeného materiálu je v tomto případě nežádoucí a je důležité, aby k tomuto procesu nedocházelo.

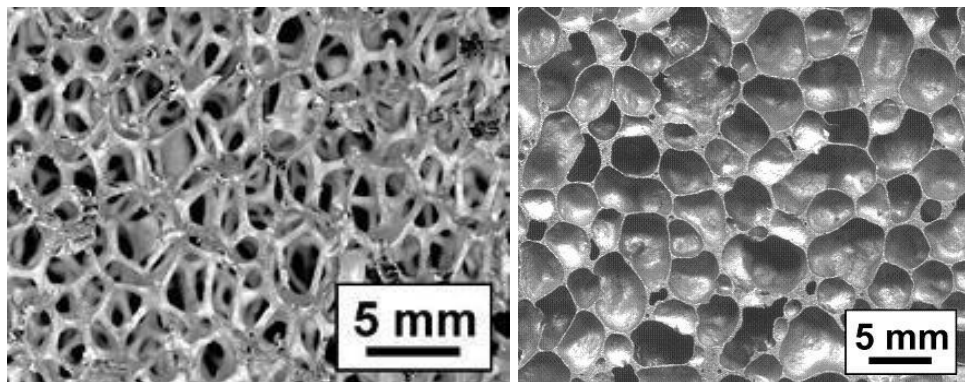


Obr. 13 Sendvičové panely s pěnovými jádry [7]

Vlastnosti lehčené hmoty ovlivňují převážně následující parametry:

- vzájemný poměr dutin a materiálu

Příčemž samotná struktura polymerních pěn může být tvořena buď otevřenými (propojenými), nebo uzavřenými dutinami, viz obr. 14



Obr. 14 Dutiny propojené (vlevo), dutiny uzavřené (vpravo) [18]

- tloušťky stěn buněk
- chemické složení stěn buněk

Dále mechanické vlastnosti jsou závislé převážně na:

- strukturu dutin
- hustotě dutin

U většiny lehčených plastů lze nastavovat hustotu v širokém rozmezí. Na tomto parametru je závislá tepelná vodivost lehčeného materiálu, kdy materiály s nepropojenými buňkami mají tepelnou vodivost menší než s propojenými buňkami.

- druhu výchozího materiálu

Dle výběru druhu výchozího materiálu se určuje rozmezí pracovních teplot.

Tyto hmoty vynikají především velmi příznivým poměrem pevnosti ke hmotnosti. Ve výrobě sendvičů jejich význam a využití stále stoupá. Při výběru pro aplikace na sendvičových konstrukcích je důležité, aby použité materiály byly tepelně odolné, pokud možno nehořlavé, málo navlhavé a byly dobrými zvukovými a tepelnými izolátory. V porovnání s jádry voštinovými jsou cenově dostupnější.

Materiály pro výplně sendvičových konstrukcí:

PS – lehčený polystyren

Lehčený materiál, který se nejčastěji používá pro své výborné tepelně izolační schopnosti. Nejrozšířenější aplikace tohoto lehčeného materiálu jsou s hustotou 30 kg/m^3 (rozmezí hustot je přibližně 5 až 160 kg/m^3). Zvukově izolační schopnost je poměrně špatná a lze ji srovnat se dřevem, protože dutinky zvuk spíše odráží, než pohlcují. Součinitel pohltivosti zvuku se pohybuje okolo 0,5 až 0,6 sabin, kdy stoprocentní pohltivost je rovna 1 sabin. Velká síla vztlaku a současně nízká nasákavost tohoto materiálu umožňují rozšíření ve velkém měřítku v lodní dopravě a při výrobě potřeb pro vodní sporty.

První způsob výroby tohoto materiálu je *vytlačování*, při kterém získají poněkud lepší vlastnosti než díly vyrobené *vypěňováním* z předpěněných granulí ve formě. Posledním způsob výroby je *vstřikování*. Vytlačované polotovary se z důvodu lepších

tepelně izolačních vlastností více uplatnily ve stavebnictví, např. pro izolace střech. Dále se vytlačované desky a profily hodí zejména pro izolaci chladících prostor.

PVC – lehčený polyvinylchlorid

Lehčený polyvinylchlorid, jeden z nejpoužívanějších lehčených materiálů s vysokou tuhostí, který může mít otevřené i uzavřené dutinky. Mechanické, chemické a teplotní vlastnosti se mohou zlepšit zesítením materiálu s uzavřenými dutinkami. Hustota tohoto materiálu se pohybuje v rozmezí 30 až 65 kg/m³. Součinitel lineární teplotní roztažnosti se blíží oceli více, než je tomu například u polyuretanových lehčených hmot. PVC je nehořlavý. Velkou nevýhodou se jeví závislost mechanických vlastností na teplotě, které se podstatně zhoršují při snížení teploty (s rostoucím modulem pružnosti roste zároveň křehkost pěny). Vysoká odolnost proti absorpci vody a dále odolnost proti kyselinám, olejům a mnoha uhlovodíkům. Pohltivost zvuku je srovnatelná jako u polystyrenu.

Tvrký lehčený polyvinylchlorid se připravuje smícháním práškového PVC, stabilizátoru a změkčovadla a lisováním směsi v uzavřené formě při teplotách 160-170 °C s přetlakem 25 až 30 MPa.

Vysoká pevnost lehčeného PVC se při nízké hmotnosti vyrobených dílů uplatňuje zejména při aplikacích v letectví, ve stavbě lodí, ale také má vysoké využití ve stavebních konstrukcích jako izolační prvek.

PUR – lehčený polyuretan

Polyuretany se často používají pro jejich jednoduchost přípravy, kdy se smíchají dvě nebo více složek. Velmi nízká hmotnost, odolnost proti nasákavosti a kyselinám, ale na druhé straně vysoká křehkost, která způsobuje, že PUR není vhodný pro pevnostní aplikace. Pro velký počet uzavřených dutinek, není příliš vhodný jako akustická izolace a největší uplatnění nachází v oblasti tepelné izolace.

V sériové výrobě lehčeného polyuretanu se používají zařízení, která automaticky dávkuje a směšují složky a dopravují směs do vypěňovacího prostoru. Jako hlavní složka pro výrobu PUR se používají buď polyethery, nebo polyestery. Druhou složkou jsou

diisokyanáty. Pěny z polyetherů mají menší nasákavost, lepší tvarovou stálost i poměr pevnosti k hustotě.

PET – lehčený polyethyltereftalát

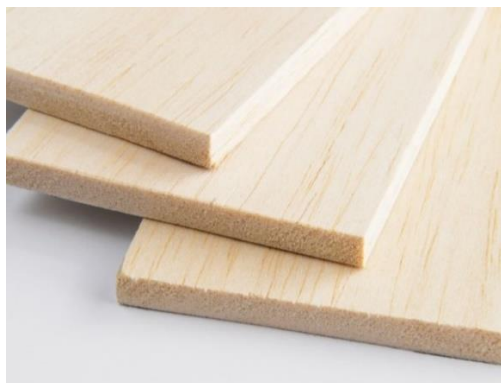
Jedná se o lehčený termoplastický materiál, který má uzavřené buňky s homogenní strukturou a dobré mechanické vlastnosti. Vykazuje nízkou nasákavost, vysokou chemickou stálost, dobrou tepelnou stabilitu při vysokoteplotním zpracování a vyhovující zpracovatelnost s prepregy. [19]

3.7.3 Balsa [5]

Evoluční vývoj přírody vytvořil materiály čistě na kompozitním principu, jakým je například dřevo, které patří mezi nejvíce rozšířené materiály na světě.

Balsa je velmi lehký druh dřeva, pocházející ze stromu jménem Balsovník jihoamerický. Je výrazně pórovitě a jeho nízká hustota nepřesahuje $0,4 \text{ g/cm}^3$. Nejčastěji se pohybuje v rozmezí $0,1 - 0,2 \text{ g/cm}^3$ a jedná se o nejlehčí dřevo na světě. [20]

Balsa byla jedním z prvních materiálů používaných pro sendvičové konstrukce a používá se dodnes, ale je jí již nedostatek. Hlavní nevýhoda tohoto výplňového materiálu je vysoká závislost pevnosti ve smyku na vlhkosti materiálu, kdy maximální rozdíl mezi suchou a vlhkou balsou je až devítinásobný. Mezi další nedostatky patří například hořlavost, nestejnorodost vlastností v celém objemu a potíže při zpracování (zvlnění povrchu, vytrhávání vláken). Pochopitelně nejlepších výsledků je dosaženo při kolmé poloze vláken k plochám potahů. Příklady desek z balsového dřeva můžeme vidět na *obr. 15*.



Obr. 15 Příklady desek z balsového dřeva [21]

Příklad úspěšného použití Metalitu, což je sendvičová konstrukce tvořena z kovových potahů a výplně z balsového dřeva, je aplikace na některých letounech, které měly celou konstrukci kromě řídicích ploch vytvořenou z tohoto materiálu. Hladkost povrchu a snížená hmotnost konstrukce se kladně projevila na vysoké rychlosti a vzdálenosti doletu. I po ročním provozu byla kvalita povrchu výborná.

Tyto kladné výsledky vedly ke zkouškám s topolem, lípou, korkem a dřevovláknitou deskou, avšak žádný z těchto dřev nedokázal balse konkurovat.

3.8 Lepidla [5]

Volba lepidla je neméně důležitým faktorem při návrhu a samotné výrobě sendvičové konstrukce. Pro dokonalé spojení je zapotřebí lepidel s velkou adhézní pevností ke všem lepeným materiálům. Chemické a mechanické vlastnosti po vytvrzení mají velký podíl na soudržnost všech spojených vrstev a výsledné stabilitě sendviče.

Rozdělení lepidel je velmi náročný úkol. Můžeme je dělit například podle:

- **způsobu vytváření lepeného spoje:** roztoková nebo disperzní, citlivá na tlak, tavná, vytvrzující chemickou reakcí.
- **dodací formy lepidla:** jednosložková, dvousložková a vícesložková.

Jednosložková lepidla

Nejčastěji ve formě prášku a při tvorbě spoje se nanášejí za zvýšené teploty jako tavenina, nebo tají při dopadu na rozehřátý povrch. Používány jsou také jako tyčinky, pasty nebo roztoky.

Dvousložková a vícesložková lepidla

Nejrozšířenější skupina lepidel, která ke svému vytvrzení využívá chemickou reakci. K vytvoření kvalitního spoje je nutnost dodržet předepsaný poměr jednotlivých složek. Nejčastěji probíhá aplikace pomocí směšovacích trysek, které zajistí jak správný poměr složek, tak jejich kvalitní smísení. Tento druh lepidla, konkrétně dvousložkový, byl využit k lepení vzorků v praktické části práce.

3.9 Zkoušky mechanických vlastností sendvičů [5,22,23]

Zkoušky, které jsou uvedeny a popsány v následujících odstavcích mohou být použity jak pro voštinové panely, tak i pro sendviče s jádrem z lehčených hmot nebo balsy.

Zkouška pevnosti v tahu

Princip zkoušky spočívá v zatěžování sendvičového vzorku o rozměrech 75 x 75 mm tahem kolmo na rovinu potahu. Eliminace excentrického působení sil při zatěžování je při této zkoušce velmi důležitá. Přizpůsobené přípravky, které jsou pevně uchycené k trhacímu stroji, se přilepí k potahům vzorků. Spoj je třeba vytvrdit za pokojové teploty, nebo za teploty minimálně o 30 °C nižší, než byla vytvrzovací teplota při lepení sendvičového panelu. Počet zkušebních vzorků je stanoven na minimálně 5 kusů. Doporučená rychlost pohybu zkušebního zařízení je 1,5 mm/min. Pevnost v tahu v MPa je počítána jako podíl zatížení při porušení a plochy řezu vzorkem ve směru rovnoběžném s potahy. V ideálním případě se při zkoušce přetrhne jádro, což znamená, že spoj jádro/potah byl proveden dobře.

Zkouška pevnosti v tlaku

Zkouška, při níž jsou sendviče o rozměrech 70 x 70 mm zatěžovány tlakem kolmo k rovině potahu. Lze zkoušet i pevnost pro samotnou voštinu, která musí být přizpůsobena tak, aby nedocházelo ke zborcení konců buněk. To se realizuje zalitím z obou stran epoxidovou pryskyřicí do určité výše.

Celý vzorek se musí zatěžovat rovnoměrně při posuvu 1 mm/min. Z výsledné křivky závislosti deformace na napětí a jejího průběhu lze odečíst pevnost tlaku při libovolném zatížení. Dále lze z této závislosti určit například modul pružnosti, mez úměrnosti nebo maximální zatížení, než dojde k porušení vzorku.

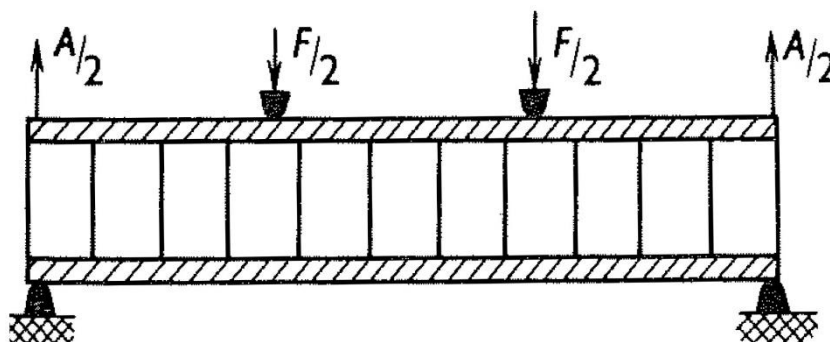
Zkouška pevnosti ve vzpěru

Zkouška definující pevnost sendvičových panelů při tlaku rovnoběžném s jejich potahy. Výsledkem je únosnost sendviče, která je vyjádřena poměrem tlakového namáhání a mezního napětí v potazích. K zaznamenání deformace se využívá snímač,

který musí být schopen zaznamenat deformaci nejméně 0,003 mm a jeho měřicí rozsah nesmí být delší než 2/3 nepodepřené vzdálenosti zkoušeného vzorku. Zatížení musí být rovnoměrné tak, aby se od sebe měřená napětí v obou potazích při počátku zatěžování nelišila o více než 10 %. Zkušební rychlost hlavy stroje by měla být 0,03 mm/min. Výsledkem měření je závislost deformace na zatížení, zapsané maximální zatížení a deformace v potazích při mezi úměrnosti. Následně se sleduje druh poruchy zkoušeného vzorku.

Zkouška pevnosti v ohybu

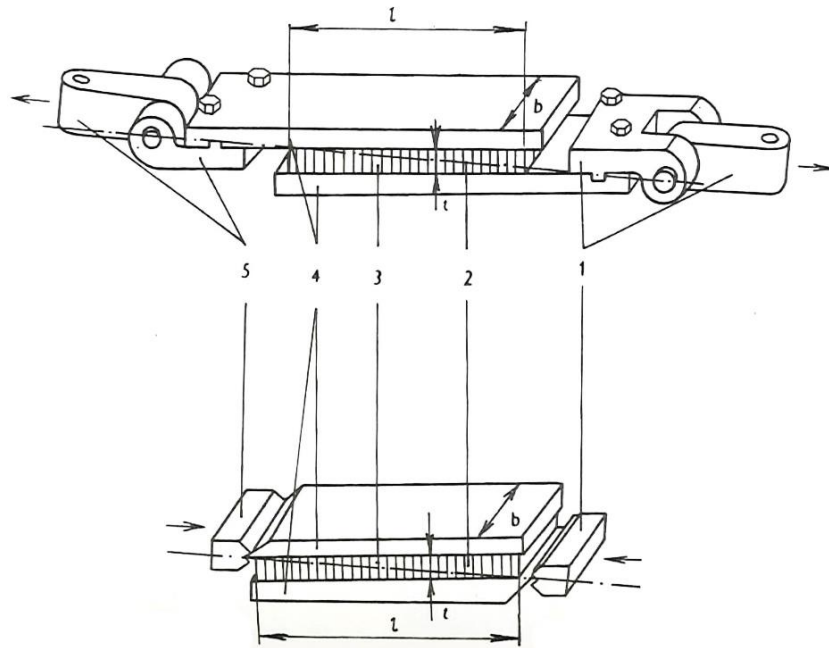
Metoda zkoušení, při které se určují vlastnosti plochých sendvičových panelů, vystavených ohybu naplocho tak, že působící síly vyvolají průhyb celého panelu. Při této zkoušce určujeme modul pružnosti, napětí ve smyku v jádře. Zkouška může být realizována tříbodovým nebo čtyřbodovým ohybem (viz. obr. 16). Zkouška pevnosti tříbodovým ohybem byla zvolena jako metoda pro praktickou část, kde je podrobněji popsán její postup měření. (dal bych tam ještě jako zdroj normu, kromě toho lepení)



Obr. 16 Zkouška sendvičových panelů čtyřbodovým ohybem [5]

Zkouška pevnosti ve smyku

Tato metoda stanovuje pevnost ve smyku rovnoběžně s potahy sendvičového panelu a modul ve smyku, který je závislý na deformacích v rovině kolmé k potahu. Zkušební vzorky o rozměrech 150 x 75 x 45 mm jsou přilepeny k zatěžovacím deskám a zatěžovány rychlostí 7,5 mm/min. Uchycení a měření vzorku je znázorněno na obr. 17. Nejmenší počet zkušebních vzorků pro měření je 5. Z podílu porušujícího zatížení a plochy řezu vzorku zjistíme pevnost ve smyku v MPa.



Obr. 17 Zkouška ve smyku sendvičů, nahoře – zkouška tahem, dole – zkouška tlakem
 1 – horní uchycení, 2 – rovina, v níž působí zatížení, 3 – voštinové jádro, 4 – zatěžovací desky,
 5 – spodní uchycení, t – tloušťka, l – délka, b – šířka [5]

Mezi další zkoušky sendvičových panelů patří například odlupovací zkouška metodou stoupajícího válce, zkouška dlouhodobého zatížení tříbodovým ohybem a různé druhy únavových zkoušek.

3.10 Příklady aplikací sendvičů

Mezi příklady aplikace v letectví můžeme zařadit např.: trupy letadel, přepážky, podlahy, náběžné a odtokové hrany křídel, brzdící klapky, kormidla letounů, kryty antén, palivové nádrže apod.

Mezi příklady v ostatních průmyslových odvětvích můžeme zařadit např.: Skříně nákladních vozů, kontejnery, součásti sportovních vozů, obalová technika, přetlakové nádrže. A z hlediska tepelné izolace např.: kapalinové výměníky tepla, lednice a chladírenské prostory. [5]

Tepelný štít sondy Parker Solar Probe – NASA [24,25]

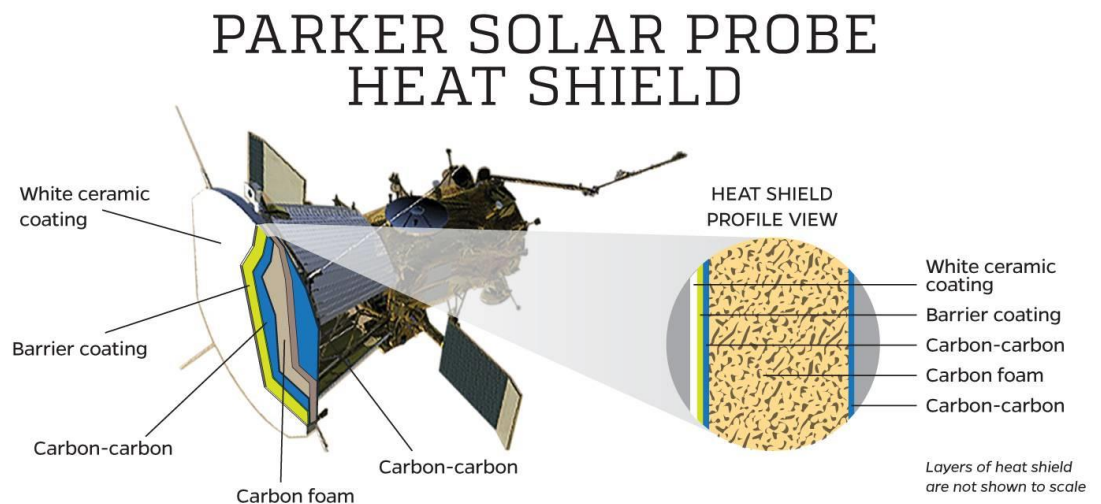
Hlavním cílem Parker Solar Probe (Parkerova sluneční sonda), dále pouze PSP, je proniknout do koróny Slunce, tedy jeho atmosféry a získat o tomto prostředí co nejvíce údajů. Hlavní neznámou je rozdíl mezi teplotou koróny v řádu několika milionů stupňů Celsia a samotného povrchu hvězdy, která je přibližně „jen“ 5500 °C. Čím více se bude PSP přibližovat ke Slunci, tím se bude zvyšovat jak teplota na povrchu tepelného štítu, která má v činit při nejbližším průletu (cca 6 mil. km) sondy od povrchu hvězdy téměř 1370 °C, tak její rychlost, která by v roce 2024 měla dosáhnout 690 000 km/h.



Obr. 18 Parker Solar Probe s tepelným štítem v čisté místnosti před uzavřením do aerodynamického krytu [26]

Sonda PSP (*obr. 18*) vyrobená americkou vesmírnou agenturou NASA je vybavena tepelným štítem, který využívá princip sendvičové konstrukce primárně z izolačního hlediska. Tepelný štít chrání PSP proti vysokým teplotám sálajícím směrem od Slunce a zabraňuje přehřátí sondy. Konstrukce tepelného štítu s co nejnižší možnou hmotností musí zaručit výbornou izolační schopnost. Na základě těchto požadavků se jako ideální řešení nabízí použití sendvičové konstrukce s pěnovým jádrem. Tepelný štít o průměru 2,43 m a tloušťce přibližně 120 mm dokáže ochránit sondu a její přístroje před nejvyšší teplotou 1370 °C a snížit ji na přijatelnou teplotu 29,5 °C, která bude na jeho druhé straně. Konstrukce, která je znázorněna na *obr. 19*, je vyrobená ze dvou panelů (potahů)

ze zpracovaného kompozitu uhlík-uhlík za vysokých teplot a lehkého jádra z uhlíkové pěny, které je tvořeno z 97 % vzduchem. Sluneční strana štítu je finálně ošetřena speciálním bílým keramickým povlakem, který odráží co nejvíce sluneční energie od sondy. Celková hmotnost tepelného štítu se díky perspektivní konstrukci pohybuje okolo 72,5 kg zde na Zemi.



Obr. 19 Konstrukce tepelného štítu sondy PSP [27]

Tento příklad sendvičové konstrukce slouží pro představu, kam až může perspektiva sendvičových konstrukcí dojít. Sonda PSP má aktuálně za sebou první úspěšný průlet okolo Slunce ve vzdálenosti 25 km od jejího povrchu. V několika následujících letech hodlá NASA uskutečnit se sondou dalších 23 obletů.

B. Praktická část

Úkolem této práce v praktické části bylo navržení přípravy vrstvených vzorků za pomoci vybavení laboratoří UMI (Ústav materiálového inženýrství) a následné zvolení metodiky testování a vyhodnocení připravených vzorků.

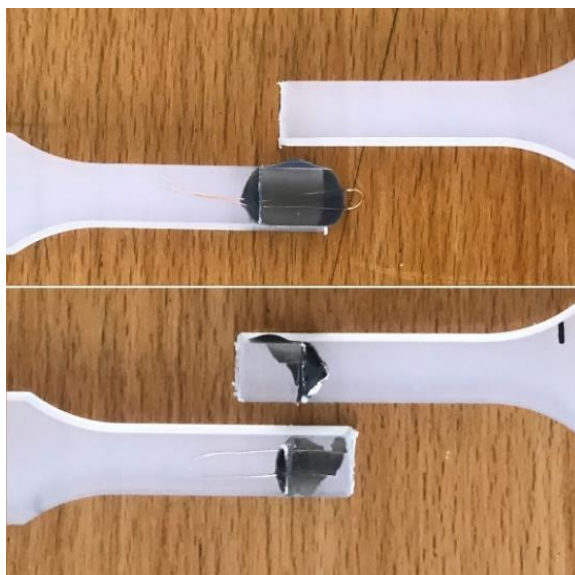
Na základě tohoto zadání jsem se tedy v praktické části zabýval následujícími body:

- výběr materiálu a lepidla na výrobu sendvičových vzorků
- volba výrobního postupu pro výrobu voštin a následně i celého sendvičového materiálu
- volba druhu mechanické zkoušky v rámci laboratoří UMI za účelem otestování vyrobených vzorků
- vyhodnocení naměřených hodnot získaných vybranou zkušební metodou.

4 Volba výrobního postupu

Výroba vzorků byla prováděna v laboratořích UMI, přičemž volba materiálu a výrobního postupu byla přizpůsobena těmto možnostem.

Nejprve jsem se snažil vytvořit sendvič slepením upravených tělísek na tah s tím, že jsem za „sendvič“ považoval pouze dvě slepená tělíska z polypropylenu (PP). V rámci možnosti využití plazmové úpravy byly otestovány plazmově upravené PP vzorečky na tahové zkoušce. Poté byl vyhodnocen vliv úpravy na soudržnost a charakter poruchy spoje. Na *obr. 20* jsou zobrazeny dva vzorky po vyhodnocení tahové zkoušky. Nahoře můžeme vidět vzorek bez plazmové úpravy a dole vzorek s plazmovou úpravou. Z charakteru poruch je zřejmé, že plazmová úprava povrchu PP má velmi kladný vliv na soudržnost spoje, a v případě použití lepidla DP 190 byla soudržnost natolik kvalitní, že lom byl kohézního typu. Na rozdíl od neoplazmovaného vzorku, u kterého nastal lom adhézní.



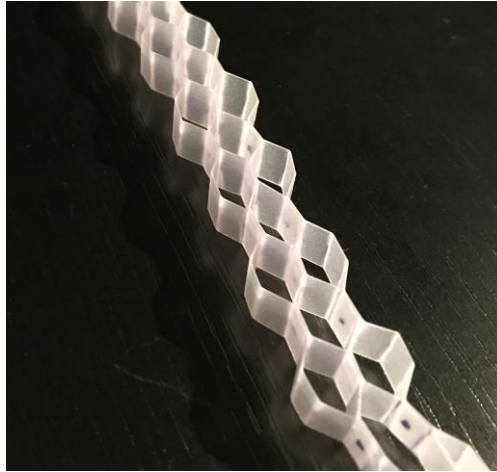
Obr. 20 Výsledný vzhled vzorků po vyhodnocení tahové zkoušky, **nahoře** – PP vzorek bez plazmové úpravy, **dole** – PP vzorek s plazmovou úpravou

Jelikož bylo obtížné dodržet rovnoběžnost spoje a osově síly, kde vznikal ohybový moment a lepené spoje se porušovaly nevhodným namáháním, bylo rozhodnuto o změně způsobu testování. Zvolilo se testování sendvičových vzorků metodou ohybové zkoušky.

Následně jsem se zaměřil na výrobu jádra do zkušebních tělísek. V tomto ohledu jsem se rozhodl pro výrobu jádra voštinového. Tento druh výplně je na výrobu sice pracnější, ale z mého pohledu zajímavější.

Nejprve byla vyzkoušena výroba voštiny z papíru a poté z polypropylenové fólie o tloušťce 0,5 mm. Byly nastříhány pásy o délce 200 mm a šířce 10 mm. Následovalo zahýbání po vzdálenostech 5 mm a poté jejich slepení oboustrannou lepenkou tak, aby vznikla voština s buňkami ve tvaru šestiúhelníku. Tento druh spoje se ukázal jako dostatečně pevný pouze u papírové fólie. V případě PP fólie nikoliv. Z tohoto důvodu bylo rozhodnuto o použití lepeného spoje, a to za použití dvou různých lepidel dostupných v laboratořích UMI. Konkrétně se jednalo o dvousložková lepidla *ScotchWeld DP 190* a *DP 8005* od firmy 3M. První případ (*DP 190*) se projevil jako nevhodná volba pro tento druh materiálu, protože PP je materiál s nízkou povrchovou energií (nepolární materiál) a toto lepidlo je určeno k aplikaci na polární materiály. Ve druhém případě, tedy s použitím lepidla *DP 8005*, byl výsledek o poznání lepší a byla vytvořena voština s kvalitní soudržností jednotlivých částí a lepidla, která je uvedena na *obr. 21*. Jedná se totiž o lepidlo pro aplikace právě na materiály s nízkou povrchovou energií, což se ale na druhou stranu negativně projeví v jeho ceně. Při lepení částí PP fólie se také projevila rychlost tuhnutí, kterou má *DP 8005* velmi rychlou a *DP 190* o mnoho pomalejší.

I přes získání vhodných vlastností spoje plazmovou úpravou v případě levnějšího lepidla a dobré soudržnosti použitím lepidla dražšího, jsem se na základě složitosti výrobního postupu, neekonomičnosti v případě plazmové úpravy z obou stran fólie a z hlediska našeho počtu vzorků, rozhodl najít jiný způsob výroby. Výrobní postup byl složitý z důvodu vysoké rychlosti tuhnutí lepidla, náročnosti způsobu lepení a zatížení jednotlivých spojů.



Obr. 21 Vyrobená voština z PP fólie s použitím lepidla DP 8005

Byla zvolena možnost využít 3D tiskárny typu **Original Prusa i3 MK3S** v laboratořích UMI, na níž bylo možné vytvořit všechny části sendvičového materiálu (potahy i voštinové jádro).

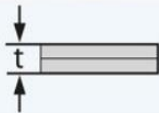
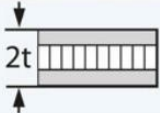
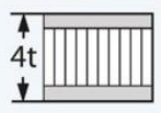
Nejdříve byla vyzkoušena kombinace tištěného jádra a potahů z upravených vzorečků na tahovou zkoušku z různých materiálů (PP, PS, PA6, PC, POM). Nevýhodou těchto vzorků byla ale nemožnost docílit normou dané délky k otestování ohybových vlastností. Na základě těchto faktů bylo proto rozhodnuto na 3D tiskárně vytvořit společně s voštinou i potahy. Vzorky o šířce stejné jako byla u vzorků pro zkoušku tahem 10 mm, stejnými tloušťkami potahů 2 mm a s různými poměry tloušťek voštin inspirovanými tabulkou 1. Délky byly upravovány na základě normy [28].

Pro tisk sendvičových vzorků byl použit materiál PLA, který spadá do materiálů polárních a není u něj potřeba povrchová úprava plazmováním. Z toho důvodu bylo rozhodnuto použít levnější lepidlo *ScotchWeld DP 190*.

5 Parametry zkušebních vzorků

Při výrobě zkušebních vzorků jsem se inspiroval *tabulkou č.1* použité v kapitole 3.3, kde výrobce hliníkových sendvičových panelů s hexagonálním voštinovým jádrem poukazuje na výhody závislé na tloušťce panelu, který je tvořen jednotlivými vrstvami (potahy a voštinou).

Tab. 1 Závislost mechanických vlastností hliníkového sendvičového panelu na konstrukci [8]

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

Navrženy byly vzorky s následujícími parametry:

Tab. 3 Navržené hodnoty zkušebních vzorků

Číslo sady	Počet kusů v sadě [ks]	h_p [mm]	b_p [mm]	l_p [mm]	Konstrukce panelu	Počet dílů [ks]	h_d [mm]
0	3	12,4	10	170	Potah (PP - tělísko pro tahovou zk.)	2	4
					Voština (3D tisk, materiál PLA)	1	4
1	3	4,6	10	90	Potah (3D tisk, materiál PLA)	2	2,2
2	3	6,4	10	120	Potah (3D tisk, materiál PLA)	2	2
					Voština (3D tisk, materiál PLA)	1	2
3	3	8,4	10	150	Potah (3D tisk, materiál PLA)	2	2
					Voština (3D tisk, materiál PLA)	1	4
4	4	16,4	10	280	Potah (3D tisk, materiál PLA)	2	2
					Voština (3D tisk, materiál PLA)	1	12
5	3	8	10	150	Plný materiál (3D tisk, mat. PLA)	1	8

- h_p ... tloušťka panelu [mm]
- b_p ... šířka panelu [mm]
- l_p ... délka panelu [mm]
- h_d ... tloušťka dílu [mm]

Rozdíl výsledných rozměrů lepených sendvičových panelů může být způsoben:

- Tloušťkou – rozdílnou historií chlazení po výrobě vzorků a tím odlišnost reálných hodnot od těch nominálních, zatížením vzorků po slepení, možností nerovnoměrného rozložení lepidla a přidaného distančního drátku pro zachování určité tloušťky vrstvy lepidla.
- Šířkou/délkou – vzájemným posunem jednotlivých vrstev sendviče při zatěžování po slepení, v případě délky nepřesným seříznutím vzorků.

5.1 Použitý materiál a lepidlo

Z možností, které laboratoř UMI nabízí, byl jako výchozí materiál pro 3D tisk zvolen materiál PLA (kapitola 5.1.1). Ke slepení jednotlivých dílů v sendvičové panely bylo vybráno lepidlo DP 190 (kapitola 5.1.2).

5.1.1 PLA (polylaktická kyselina) [29,30]

Jako výchozí materiál pro výrobu voštiny a současně i pro potahy byl zvolen PLA – *biopolymer polylaktická kyselina*. Jedná se o aktuálně nejpopulárnější termoplastický biopolymer. Tento druh materiálu je nejčastěji používaným materiálem pro 3D tisk, který má relativně nízkou teplotu tání 175 °C. Polotovar je dodáván ve formě struny o průměru 1,75 mm.

Pro výrobu voštin byl použit konkrétně materiál PLA 1.75 Red, a pro výrobu potahů PLA 1.75 Blue.

5.1.2 Lepidlo DP 190 [31]

Šedé epoxidové dvousložkové lepidlo, které se vytvrzuje při pokojové teplotě. Dostupné je 50 ml balení ve dvojité patroně se směšovací poměrem 1:1. K nanášení je potřeba aplikační pistole a směšovací tryska, ve které se obě složky lepidla dostatečně smísí před následnou aplikací. Jak bylo otestováno, lepidlo není schopno kvalitně slepit plasty s nízkou povrchovou energií. Výrobce je uvedeno vhodné pro lepení kovů, dřeva, zdiva, většina plastů a pryží.

6 Postup výroby vzorků

V následujících dvou kapitolách je uvedeno, jak bylo postupováno při výrobě zkušebních vzorků a vše, co bylo použito při jejich výrobě.

6.1 Tisk vzorků (parametry tisku)

Pro 3D tisk vzorků byla využita 3D tiskárna **Original Prusa i3 MK3S** s následným nastavením tisku:

- teplota tisku = 215 °C ... (doporučená hodnota pro PLA výrobcem)
- teplota podložky = 60 °C ... (doporučená hodnota pro PLA výrobcem)
- hustota tisku = 100 %
- standardní rychlost tisku ... (přednastavená rychlost pro 100% hustotu tisku)

Vstupním materiálem pro tisk byl materiál PLA, který je popsán v kapitole 5.1.1. Na *obrázku 22* můžeme vidět příklad vytištěné voštiny pro sadu 4 před aplikací lepidla a potahů.



Obr. 22 Vyrobená voština pomocí 3D tisku (vzorek pro sadu č. 4)

6.2 Lepení

Před lepením bylo připraveno:

- vytištěné díly (potahy a voštiny) požadovaných tloušťek + vzorky sady 5 z plného materiálu
- lepidlo DP 190 (včetně aplikační pistole a směšovací trysky)
- distanční drátek o průměru 0,2 mm
- izopropylalkohol (doporučeno výrobcem pro materiál PLA)

Z vytištěných vzorků bylo zapotřebí před nanesením lepidla potřeba odstranit mechanické nečistoty a mastnotu pro kvalitní a nenarušený lepený spoj. To bylo realizováno pomocí isopropylalkoholu a papírových utěrek u sady 1, 2, 3 a 4. V případě sady 0 tento krok nebyl možný, a to z důvodu plazmové úpravy povrchu PP vzorečků.

- Plazmová úprava

U již zmiňovaného zkoušení závislosti plazmování na soudržnost spoje u jedné sady vzorků (0.1-3) z PP byla použita plazmová úprava u firmy SurfaceTreat. Rychlost plazmování byla 100 m/s a plazmování bylo realizováno ze vzdálenosti 10 mm.

Následně se přešlo k aplikaci lepidla na jednotlivé díly vzorků, pomocí aplikační pistole a směšovací trysky, která zajistí promísení obou složek lepidla ve správném poměru. Po nanesení dostatečné vrstvy lepidla byl přidán distanční drátek přes celou šířku vzorku, ve vzdálenosti 10 mm od jeho konců. Poté byla přiložena druhá vrstva vzorku. V případě sady 1, bylo lepidlo nanášeno rovnoměrně na plochu potahu a přiložen druhý potah. Ve druhém případě, kdy byl sendvičový materiál složen ze tří vrstev (sady 0, 2, 3, 4) bylo lepidlo nanášeno na povrch voštiny a již popsaným postupem byly postupně nalepeny oba dva potahy, každý z jedné strany.

Po slepení jednotlivých částí v jeden celek, byly vzorky opatrně zatíženy závažím tak, aby se vytvořil doporučený tlak výrobcem lepidla. Vytvrzování pod závažím trvalo 24 hodin, při pokojové teplotě (cca 23±5 °C). Současně je výrobcem lepidla doporučeno

po odtížení nemanipulovat se vzorky 7 dní, aby bylo docíleno dostatečného vytvrzení lepidla a požadovaných vlastností lepeného spoje, což bylo splněno.

Po odstranění přečnávajících distančních drátků a lepidla, byly u hotových sendvičových vzorků změřeny rozměry a hmotnosti.

7 Zkoušení vzorků [22, 23, 28, 32]

Zkoušení vzorků bylo provedeno v laboratořích UMI, přičemž měření probíhalo při pokojové teplotě.

Z naměřených hodnot, které jsou uvedeny v příloze č. 1, byl vypočítán aritmetický průměr a zjištěna směrodatná odchylka. Tyto průměrné hodnoty jsou uvedeny v *tabulce 4*. Dle normy [28] se u každého zkušebního vzorku změřila mikrometrem šířka *b* na nejbližších 0,1 mm a tloušťka *h* na nejbližších 0,01 mm v jeho středu, při pokojové teplotě.

Tab. 4 Průměrné rozměry vyrobených a slepených vzorků

Číslo sady	Počet kusů v sadě [ks]	l [mm]	b [mm]	h [mm]	m [g]
0	3	170,1 ± 0,14	10,1 ± 0,05	12,63 ± 0,02	17,5 ± 0,13
1	3	90,3 ± 0,05	10,2 ± 0,04	4,73 ± 0,05	5,3 ± 0,06
2	3	120,5 ± 0,12	10,2 ± 0,05	6,35 ± 0,07	7,9 ± 0,03
3	3	150,3 ± 0,09	10,2 ± 0,05	8,18 ± 0,03	11,3 ± 0,16
4	4	280,4 ± 0,43	10,1 ± 0,05	16,24 ± 0,07	31,3 ± 0,84
5	3	150,1 ± 0,05	10,0 ± 0,05	8,11 ± 0,01	14,56 ± 0,05

- l ... délky vzorků [mm]
- b ... šířky vzorků [mm]
- h ... tloušťky vzorků [mm]
- m ... hmotnosti vzorků [g]

Z kapacitních důvodů laboratoře UMI, byly od každé ze sad 0, 1, 2, 3 a 5 vyrobeny a slepeny 3 kusy vzorků. V případě sady 4 byly vyrobeny a slepeny 4 kusy.

7.1 Zkouška ohybem

Zhotovené vzorky byly podrobeny zkoušce ohybem na stroji:

- Plastics bending tester, Type: AS-102

Postup, kterým jsme při zkoušení postupovali a parametry zkoušky všech vzorků byly zvoleny tak, aby co nejvíce odpovídaly předepsaným parametrům normy [28].

Tato metoda slouží ke zjišťování chování zkušebních těles při namáhání tříbodovým ohybem a pro stanovení modulu pružnosti v ohybu – E, pevností v ohybu σ a dalších závislostí mezi napětím a deformací za definovaných podmínek. Tuto zkoušku lze s výhodou použít pro porovnání materiálů a pro kontrolní testy kvality lepeného spoje.

Postup zkoušky:

Pro každou zkoušenou sadu vzorků se na základě naměřeného průměru tloušťek, vypočítala vzdálenost podpěr L dle vztahu:

$$L = (16 \pm 1) \cdot \overline{h} \quad [\text{mm}] \quad (1)$$

Z toho důvodu se s narůstající tloušťkou sendvičového materiálu měnila i délka vzorku. V případě vzorků sady 4, tj. $h=16,4$ mm bylo vypočítáno $L=262$ mm a navržena délka vzorku $l=280$ mm, čímž byla využita maximální rozměrová kapacita použité 3D tiskárny.

Na základě výsledku se nastavila vzdálenost podpěr, kde se musí počítat s poloměrem podpěr, který se v našem případě rovnal 5 mm. To znamená, že například pro naši hodnotu $L=262$ mm byla nastavena vzdálenost na stupnici $L=252$ mm. Zkušební těleso bylo umístěno symetricky na dvě podpěry, dle obrázku 23.

V případě sady s označením 0, nebylo možné z hlediska délky tahových tělísek $l = 170$ mm dodržet normou předepsanou vzdálenost L. Proto byla zvolena zkrácená vzdálenost $L = 150$ mm.

Dále byly vypočítány průhyby s_1 a s_2 pro předepsané hodnoty deformace ohybem $\varepsilon_{f1} = 0,0005$ a $\varepsilon_{f2} = 0,0025$ dle rovnice:

$$S_i = \frac{\varepsilon_{fi} L^2}{6h} \quad (i = 1 \text{ nebo } 2) \quad [\text{mm}] \quad (2)$$

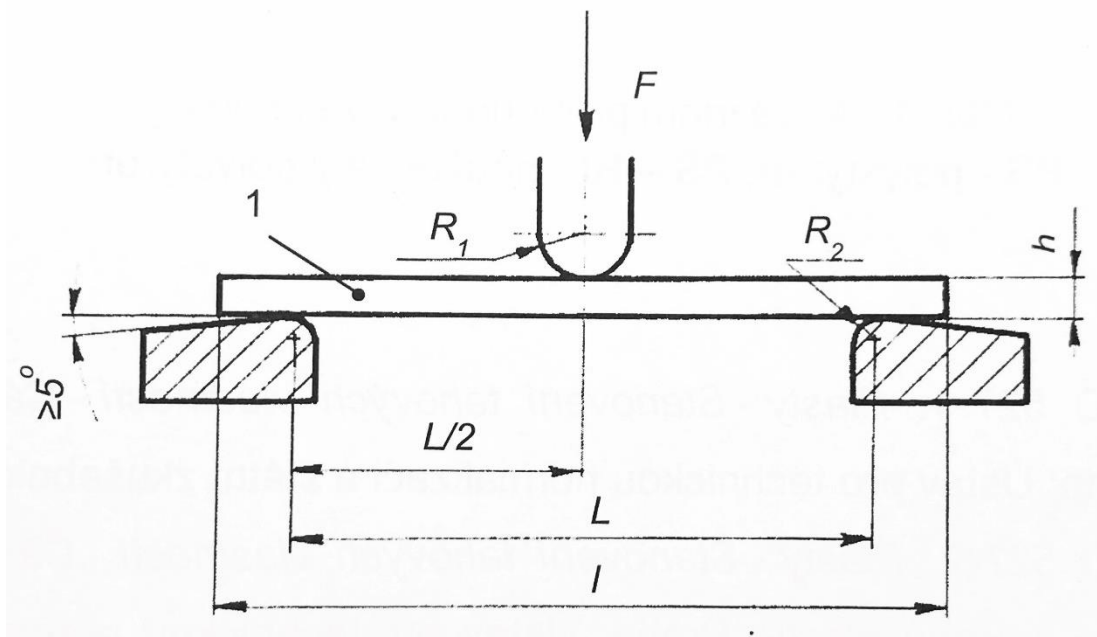
S_i ... jeden z průhybů [mm]

ε_f ... odpovídající deformace ohybem [-]

L ... rozpětí [mm]

h ... tloušťka zkušebního tělesa [mm]

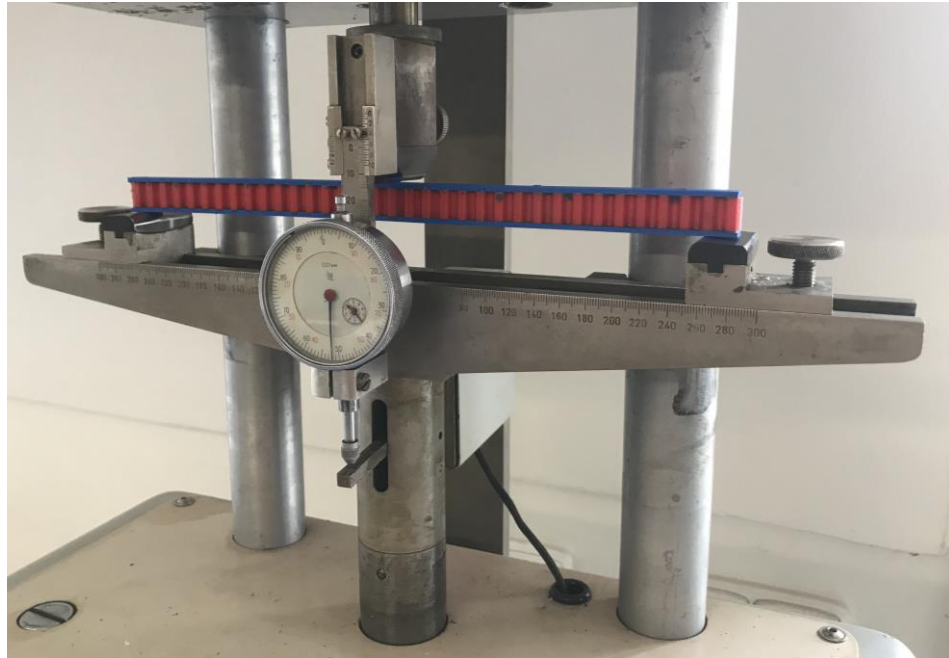
Před samotným měřením je důležité znát hlavně hodnotu s_2 . Ta nám určí hranici, do které je potřebné měřit průhyb pro následný odečet odpovídajících sil a výpočet odpovídajících napětí σ_{fi} . V případě, že tedy nechceme zjišťovat maximální sílu v ohybu, kterou těleso vydrží.



Obr. 23 Umístění zkušebního tělesa na počátku zkoušky ohybem [32]

Po nastavení podpěr, umístění tělesa a instalace krytu se pomocí rychloposuvu dojelo skoro až na doraz tělesa s trnem a nastavila se doporučená hodnota zkušební rychlosti, která byla pro všechny měření totožná. Poté se za asistence druhé osoby

odečítaly a zapisovaly současně hodnoty působící síly F a výsledný průhyb vzorku s . Veličina s je vzdálenost, o kterou se během ohybu vychýlí horní nebo spodní plocha vzorku přesně uprostřed mezi podpěrami (vzdálenost $L/2$) ze své původní polohy. Na obr. 24 je vyfocen příklad umístění vzorku 4.1 před měřením.



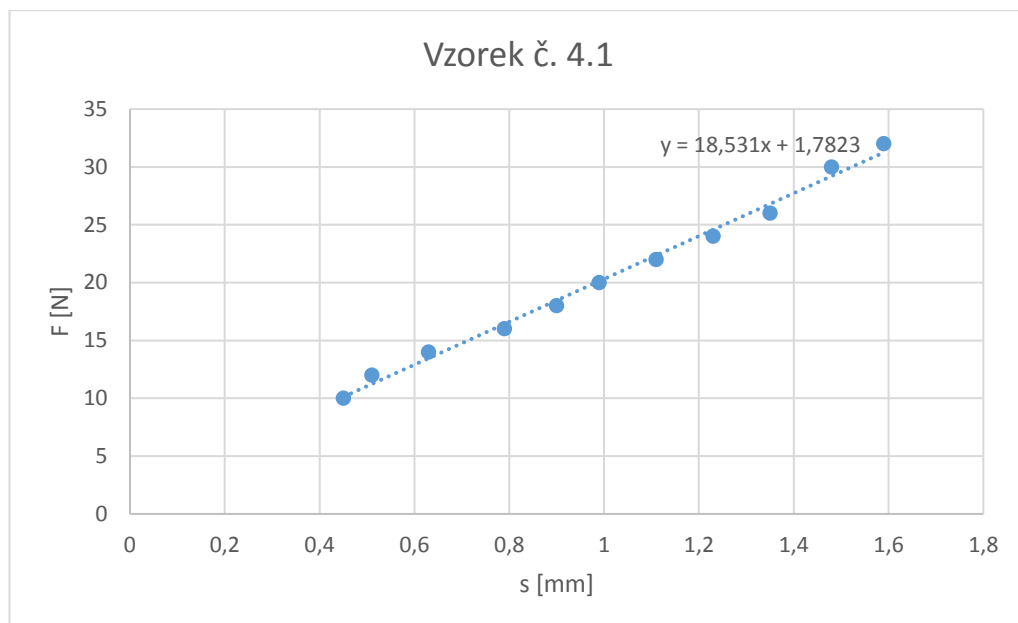
Obr. 24 Umístěný sendvičový vzorek (č. 4)

Měření probíhalo v pořadí závislém na průměrné tloušťce sendvičových vzorků v sadě, z důvodu nutného přenastavení polohy úchylkoměru vlivem tloušťky sendviče. Měření tedy bylo uskutečněno v pořadí 1, 2, 5, 3, 0, 4.

7.2 Vyhodnocení výsledků

Postup průběžného výpočtu bude předveden na konkrétním příkladu vzorku 4.1:

Z naměřených a zpracovaných hodnot **síly** F [N] a odpovídajícího **průhybu** s [mm] jsem vyhodnotil v programu Excel grafickou závislost v rozmezí hodnot průhybů $s_1 = 0,352 \text{ mm}$ a $s_2 = 1,761 \text{ mm}$, které jsem vypočítal pomocí rovnice (2), a následně proložil lineární spojnici trendu a nechal vyhodnotit rovnici grafu, ze které jsem získal poměr síly ΔF a průhybu Δs .



Obř. 25 Graf závislosti zatěžující síly F na průhybu s

Tento poměr společně s ostatními hodnotami byl dosazen do vzorce pro výpočet **modulu pružnosti**

$$E = \frac{\Delta F}{\Delta s} * \frac{L^3}{4bh^3} = 1985,36 \text{ MPa} \quad (3)$$

- E ... modul pružnosti [MPa]
- ΔF ... rozdíl sil F_2 a F_1 [N]
- Δs ... rozdíl průhybů s_2 a s_1 [mm]
- L ... rozpětí podpěr [mm]
- b ... šířka zkušebního tělesa [mm]
- h ... tloušťka zkušebního tělesa [mm]

Který jsem získal úpravou rovnice modulu pružnosti

$$E = \frac{\sigma_{f2} - \sigma_{f1}}{\varepsilon_{f2} - \varepsilon_{f1}} \text{ [MPa]} \quad (4)$$

- **Napětí v ohybu** při daném průhybu s

$$\sigma_f = \frac{3FL}{2bh^2} \text{ [MPa]} \quad (5)$$

- **Deformace ohybem**

$$\varepsilon_f = \frac{3FL}{2bh^2} \text{ [-]} \quad (6)$$

Měrný modul E_m

$$E_m = \frac{E}{\rho} = 2,97 \frac{MN.m}{kg} \quad (7)$$

E ... modul pružnosti vzorku $[\frac{MN}{m^2}]$

ρ ... hustota vzorku $[\frac{kg}{m^3}]$

Kde

- **Hustota vzorku**

$$\rho = \frac{m}{hbl} = 668,13 \frac{kg}{m^3} \quad (8)$$

m ... hmotnost vzorku [kg]

h ... tloušťka zkušební tělesa [m]

b ... šířka zkušební tělesa [m]

l ... délka zkušební tělesa [m]

Na základě známého modulu pružnosti E, můžeme dále spočítat **ohybovou tuhost průřezu K** dle [33]

$$K = E \cdot I = 6,943 N.mm^2 \quad (9)$$

Kde

- **Kvadratický moment setrvačnosti** pro obdélníkový průřez

$$I = \frac{bh^3}{12} = 3497,21 mm^4 \quad (10)$$

Vyhodnocení výsledků:

Vypočtené hodnoty z provedeného měření jsou přehledně uvedeny v následující tabulce 5. Jedná se o výsledné aritmetické průměry uvedených hodnot pro celou sadu společně se směrodatnými odchylkami. Jako výchozí hodnota v porovnání poměrů hodnot tloušťky a tuhosti byla vybrána hodnota sady 1.

Tab. 5 Vypočítané hodnoty

Číslo sady	h [mm]	Poměr h	E [MPa]	E _m	K [N.mm ²]	Poměr tuhosti	ρ [kg/m ³]
0	12,63 ± 0,02	2,7	1370 ± 11	1,6	2034 ± 15	7,3	839 ± 7
1	4,73 ± 0,05	1	3110 ± 205	2,6	278 ± 10	1	1212 ± 9
2	6,35 ± 0,07	1,3	2940 ± 245	2,9	637 ± 33	2,3	1021 ± 16
3	8,18 ± 0,03	1,7	2410 ± 60	2,7	1126 ± 41	4	900 ± 21
4	16,24 ± 0,07	3,4	1840 ± 101	2,7	6596 ± 335	23,7	683 ± 12
5	8,11 ± 0,01	1,7	2750 ± 98	2,3	1225 ± 43	4,4	1192 ± 1

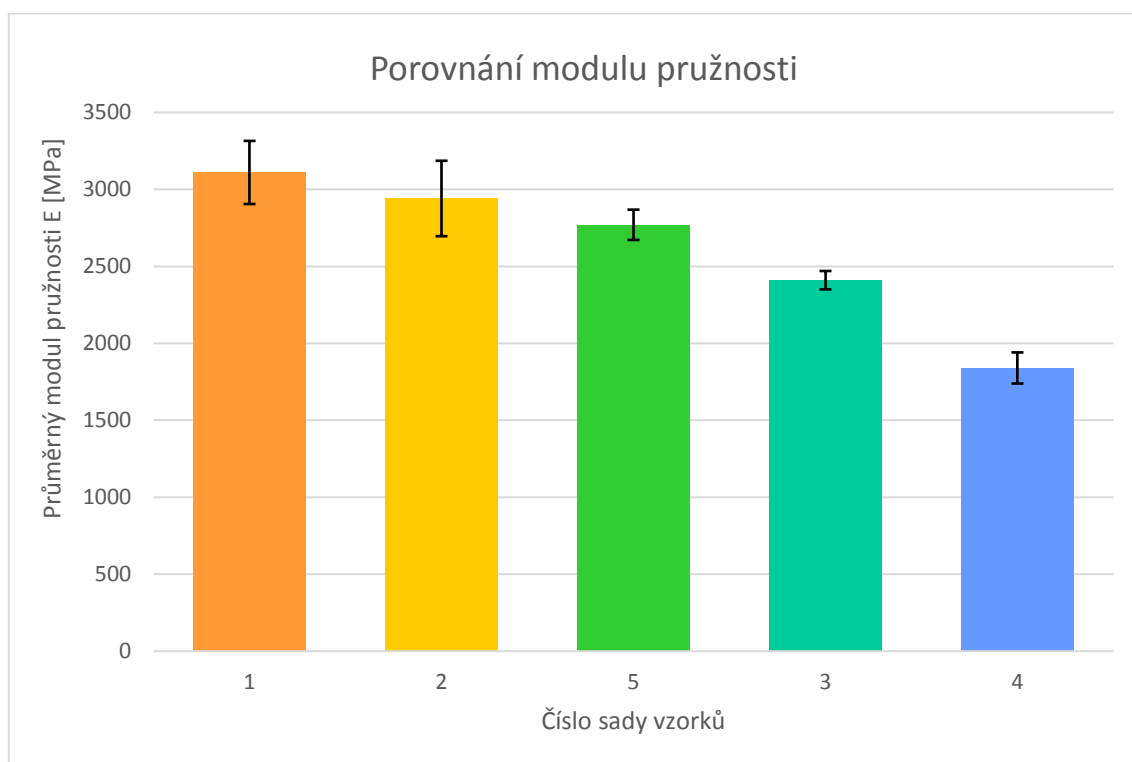
- h ... tloušťky vzorků [mm]
- E ... modul pružnosti v ohybu [MPa]
- E_m ... Měrný modul [$\frac{MN.m}{kg}$]
- K ... ohybová tuhost průřezu [N.mm²]
- ρ ... hustota vzorku [kg/m³]
- Poměr h ... poměr tlouštěk vzorků [-]

V následujících podkapitolách jsou uvedeny konkrétní parametry a grafické a slovní vyhodnocení výsledků měření, ve kterém jsou vždy uvedeny pro srovnání sady vzorků č. 1, 2, 3, 4 a 5. Sada vzorků č. 0 není v tomto porovnání a grafickém znázornění uvedena, jelikož nemá stejné výchozí parametry (tloušťka a materiál potahů) jako sady ostatní. Tato sada byla vytvořena prioritně pro výzkum vlivu plazmové úpravy PP vzorků na soudržnost lepeného spoje.

Výsledkem zkoušek této sady bylo zjištění, že vlivem plazmové úpravy PP vzorků se zvýšila adhezní pevnost natolik, že došlo dříve k porušení samotného materiálu než lepeného spoje.

Modul pružnosti – E:

Výsledné hodnoty jsou zobrazeny v grafu na *obrázku 26*. Jedná se o aritmetické průměry hodnot modulu pružnosti v tahu pro jednotlivé sady, které jsou vždy vyznačeny na vodorovné ose. Výsledné hodnoty jsou počítány na 3 platné číslice a jsou k nim přidány směrodatné odchylky měření. V případě modulu E jsou sady seřazeny v sestupném pořadí na základě výsledných hodnot, tedy 1, 2, 5, 3, 4.



Obr. 26 Porovnání modulu pružnosti

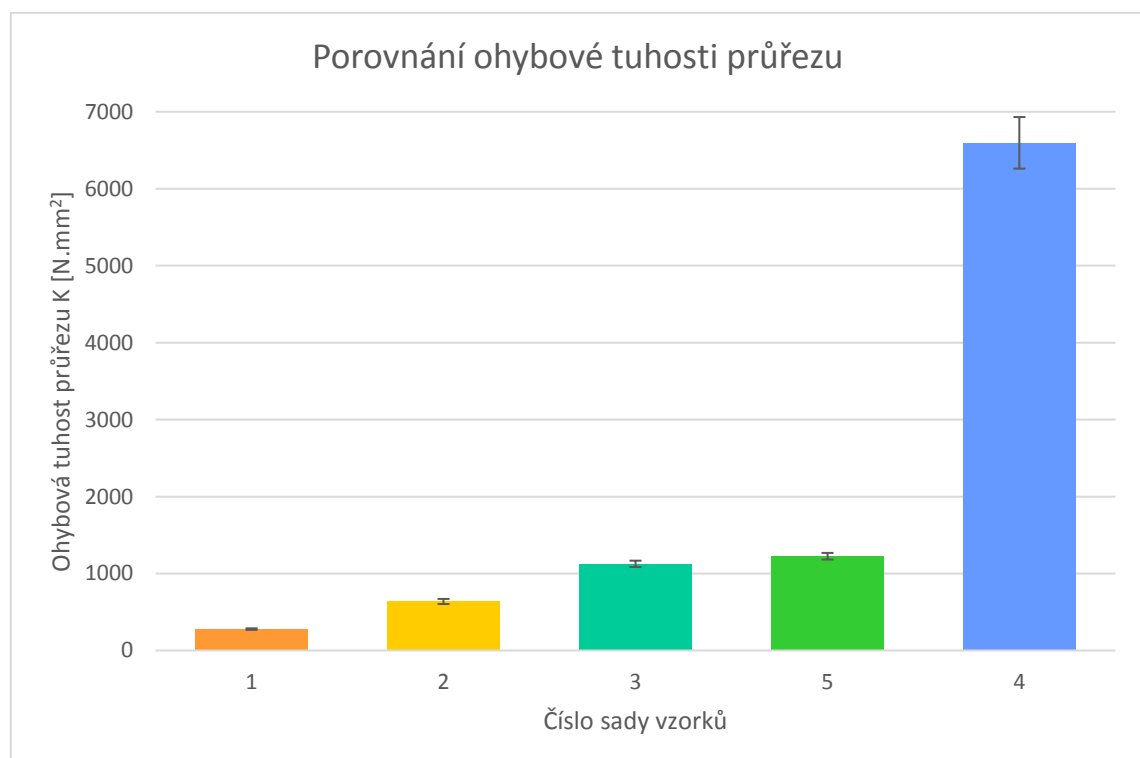
Klesající hodnoty modulu pružnosti mohou být i přes zvyšující se tloušťku panelu matoucí. Lze je ale lehce odůvodnit tím, že s narůstající tloušťkou se snižovala hustota vzorku. Z konstrukčního hlediska byla tloušťka potahů u všech sad vzorků stejná a se zvyšujícím se voštinovým jádrem a v návaznosti na to i objemem buněk klesala hustota vzorku, což ovlivnilo výsledný modul pružnosti pro jednotlivé sady.

Z toho důvodu byl následně vypočítán měrný modul pružnosti E_m , který počítá s hustotou vzorečku. Konkrétně je to poměr modulu pružnosti E a hustoty ρ . Výsledné

hodnoty měrného modulu pružnosti E_m , které jsou uvedeny v tabulce 5, se již liší pouze nepatrně. V případě sady 5 může být důvodem odchylky od ostatních hodnot druh použitého materiálu na výrobu vzorků a absence lepeného spoje. Z kapacitních důvodů laboratoří UMI nebylo možno použít pro vzorky sady 5 materiál *PLA 1.75 blue*, který se používal u ostatních sad na potahy. Vzorky sady č. 5 byly vyrobeny z materiálu *PLA 1.75 red*.

Ohybová tuhost:

Ohybová tuhost vzorků byla vypočítána pomocí součinu modulu pružnosti E a kvadratického momentu setrvačnosti I . Výsledky splnily předpoklady, které jsou uvedeny v *tabulce 1* ve vzestupném pořadí. S narůstající tloušťkou sendvičového panelu roste současně i jeho ohybová tuhost. Tento výsledek předpokládala také tabulka 1, kterou jsem se při navrhování vzorků inspiroval. Podobné porovnání závislosti mechanických vlastností na tloušťce panelu je uvedeno v *tabulce 6*.



Obr. 27 Porovnání ohybové tuhosti průřezu

V případě, že by se počítalo s hustotou i zde a vypočítala by se měrná ohybová tuhost stejným postupem jako tomu bylo u E_m , tak by hodnoty zachovaly své pořadí až na dvojici č. 3 a 5. Následkem nižší hustoty vzorků sady č. 3 a při stejných rozměrech panelů obou sad by se jejich pořadí prohodilo.

Tab. 6 Závislost ohybové tuhosti a hustoty panelu na jeho tloušťce

Číslo sady vzorku	1	2	3	5	4
Poměrná tloušťka vzorku [-]	1	1,5	2	2	4
Poměrná ohybová tuhost vzorku [-]	1	2,7	5,5	4,4	23,7
Poměrná hustota vzorku [-]	1	0,8	0,7	1	0,6
Poměrná hmotnost vzorku [-]	1	1,5	2,13	2,8	5,9

Z porovnání je patrné, že u vyrobených vzorků bylo dosaženo hlavních výhod a požadavků od sendvičových materiálů. Použitím sendvičové konstrukce a zvětšením tloušťky jádra bylo dosaženo několikanásobné zvýšení tuhosti, při nízkém nárůstu hmotnosti.

8 Závěr

Hlavním předmětem této bakalářské práce byla problematika **sendvičových materiálů**.

Pro její úspěšné vypracování bylo v první řadě zapotřebí získat informace o tomto druhu konstrukcí a na základě toho vypracovat rešerši v rámci teoretické části. Následovala studie výrobní a konstrukční problematiky sendvičových panelů potřebná pro zvládnutí experimentu praktické části.

V **teoretické části** jsem se zaměřil nejprve na stručné objasnění a vysvětlení toho, co jsou kompozitní materiály a bylo vytvořeno jednoduché schéma rozdělení vedoucí až k sendvičovým materiálům. V hlavní kapitole č. 3 jsem se již zaměřil čistě na problematiku **sendvičových materiálů**. Stručnému historickému vývoji materiálů předchází obecná charakteristika, která seznamuje s tímto druhem konstrukcí. Dále jsem popsal jejich základní vlastnosti a přednosti, druhy namáhání a jejich výrobní možnosti. Z hlediska konstrukčního jsem se zaměřil na jednotlivé části těchto materiálů, kterými jsou *potahy*, *jádra* a *lepidla*. V neposlední řadě jsou zde uvedeny mechanické zkoušky, které se k testování sendvičů používají. Zkoušce tříbodovým ohybem jsem se věnoval podrobněji až v praktické části z důvodu volby této metody testování vzorků pro náš případ. Na samotný závěr teoretické části jsem uvedl výpis možných uplatnění těchto materiálů a konkrétní aktuální příklad aplikace sendvičového materiálu na konstrukci sondy Parker Solar Probe.

Hlavním cílem **praktické části** byla příprava vrstvených vzorků za pomoci vybavení laboratoří UMI a následné zvolení metodiky testování a vyhodnocení připravených vzorků.

Z hlediska konstrukčního jsem se rozhodl vyrobit **sendvičový panel** s použitím **voštinového jádra**. Inspirací pro návrh rozměrů zkušebních vzorků byla tabulka závislosti mechanických vlastností na tloušťce konstrukce od výrobce sendvičových panelů. Po vyzkoušení několika ručních metod výrobního postupu a zvážení jejich náročnosti a neekonomičnosti, byla zvolena metoda 3D tisku. Pro ten byl jako výchozí materiál vybrán termoplastický biopolymer PLA. S přihlédnutím na fakt, že se jedná o materiál polární, bylo pro lepení sendvičových tělísek vybráno lepidlo DP 190.

Vyrobené vzorky byly podrobeny **zkoušce tříbodovým ohybem**. Z výsledků zkoušky lze konstatovat, že vlivem zvětšení tloušťky voštinového jádra bylo docíleno několikanásobného zvýšení ohybové tuhosti panelu při nízkém nárůstu jeho hmotnosti. Uvedu-li to na konkrétním příkladu, tak při šestinásobném zvýšení tloušťky použité voštiny, se zvýšila tuhost panelu o více jak desetinásobek. Tyto vlastnosti jsou důvodem, proč se sendvičové materiály využívají v takové míře.

Zvolená metodika ruční výroby sendvičů v rámci laboratoří UMI, byla značně náročná na přípravu a samotné provedení. Mohu tedy konstatovat, že pro splnění účelu praktické části práce byla dostačující, ale pro sériovou výrobu je nevhodná. Autora daná problematika sendvičových materiálů zaujala a rád by se jí zabýval i dále v pokračujícím studiu.

Byly splněny všechny cíle bakalářské práce.

9 Seznam použité literatury

- [1] JANOVEC, Jiří, Jiří CEJP a Josef STEIDL. Perspektivní materiály. Vyd. 3. Praha: České vysoké učení v Praze, 2008. ISBN 978-80-01-04167-3.
- [2] MACEK, Karel, Petr ZUNA a kol. Strojírenské materiály. Vyd. 1. Praha: České vysoké učení v Praze, 2003. ISBN 80-01-02798-8.
- [3] Sendvičové konstrukce. MM Průmyslové spektrum [online]. 2001 [cit. 2019-03-20]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/sendvicove-konstrukce.html>
- [4] BERTHELOT, J.M. Composite Materials. 1999th edition. New York: Springer-Verlag, 1999. ISBN 978-03-87-98426-1.
- [5] PETERKA, Jindřich. Lepení konstrukčních materiálů ve strojírenství. Praha: SNTL, 1980.
- [6] EHRENSTEIN, W. Gottfried. Polymerní kompozitní materiály. Praha: Scientia, 2009. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [7] Sendvičové materiály pro stavební a automobilový průmysl. Stavebnictvi3000.cz [online]. 2014 [cit. 2019-03-21]. Dostupné z: <https://www.stavebnictvi3000.cz/clanky/sendvicove-materialy-pro-stavebni-a-automobilovy-prumysl>
- [8] FM sendvičové panely s hliníkovou voštinou. In: *Forlit & Metal* [online]. [cit. 2019-04-06]. Dostupné z: <https://www.fmetal.cz/cz/sendvicove-panely/>
- [9] BURAGOHAİN, Kumar Manoj. Composite Structures: Design, Mechanics, Analysis, Manufacturing, and Testing. Boca Raton: CRC Press, 2017. ISBN 978-1138035409.
- [10] Prepreg technologie. FORM [online]. [cit. 2019-04-07]. Dostupné z: <https://www.form-composite.com/prepreg>
- [11] HexWeb Honeycombs: Selector Guide. Hexcel [online]. [cit. 2019-04-20]. Dostupné z: <http://course1.winona.edu/kdennehy/ENGR390/Topics/sandwich/HEXWEBSELECTORGUIDE.pdf>
- [12] Honeycomb. Hexcel [online]. [cit. 2019-04-20]. Dostupné z: <https://www.hexcel.com/Products/Honeycomb/>
- [13] Honeycomb Cores. NetComposites [online]. 2019 [cit. 2019-04-20]. Dostupné z: <https://netcomposites.com/guide/core-materials/honeycomb-cores/>
- [14] NOMEX HONEYCOMB-COMMERCIAL GRADE. CEL COMPONENTS [online]. [cit. 2019-04-21]. Dostupné z: <https://www.honeycombpanels.eu/en/products/honeycomb/nomex-honeycomb-commercial-grade>

- [15] ALUMINIUM HONEYCOMB. CEL COMPONENTS [online]. [cit. 2019-04-21]. Dostupné z: <https://www.honeycombpanels.eu/en/products/honeycomb/aluminium>
- [16] MRÁZ, Petr a Jaroslav TALÁČKO. Konstrukce strojů s kompozitními materiály. Praha: České vysoké učení v Praze, 2006. ISBN 8001035409.
- [17] Informace poskytnuté firmou Forlit & Metal, a.s.
- [18] Open vs. Closed Cell Foams. Foard panel [online]. [cit. 2019-05-25]. Dostupné z: <https://www.foardpanel.com/open-vs-closed-cell-foams/>
- [19] AIREX® T10. 3A Core Materials [online]. [cit. 2019-05-25]. Dostupné z: <https://www.3acorematerials.com/en/products/airex-foam/airex-t10-pet-foam>
- [20] Balsa. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2019-06-01]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Balsa>
- [21] Balsa SHEET [online]. [cit. 2019-06-01]. Dostupné z: <https://www.hindleys.com/balsa-sheet-100mm-wide-thick-sheets.html>
- [22] GRELLMANN, Wolfgang a Sabine SEIDLER. Polymer Testing. Cincinnati, Ohio: Hanser, 2007. ISBN 978-1-56990-410-7.
- [23] MEISSNER, Bohumil a Václav ZILVAR. Fyzika polymerů: struktura a vlastnosti polymerních materiálů. Praha: SNTL, 1987.
- [24] SUROWIEC, Justyna. Cutting-Edge Heat Shield Installed on NASA's Parker Solar Probe. NASA [online]. 2018 [cit. 2019-06-15]. Dostupné z: <https://www.nasa.gov/feature/goddard/2018/cutting-edge-heat-shield-installed-on-nasa-s-parker-solar-probe>
- [25] DARLING, Susannah. Traveling to the Sun: Why Won't Parker Solar Probe Melt?. NASA [online]. 2018 [cit. 2019-06-15]. Dostupné z: <https://www.nasa.gov/feature/goddard/2018/traveling-to-the-sun-why-won-t-parker-solar-probe-melt/>
- [26] HERRIDGE, Linda. Parker Solar Probe. NASA blogs [online]. 2018 [cit. 2019-06-16]. Dostupné z: <https://blogs.nasa.gov/parkersolarprobe/2018/07/18/parker-solar-probe-launch-no-earlier-than-aug-6-2018/>
- [27] VOGEL, Tracy. CAN THE PARKER SOLAR PROBE TAKE THE HEAT?. HUB [online]. 2018 [cit. 2019-06-16]. Dostupné z: <https://hub.jhu.edu/2018/08/06/parker-solar-probe-heat-shield-explained/>
- [28] ČSN EN ISO 178: Plasty – Stanovení ohybových vlastností. ÚNMZ, 2011
- [29] PRŮVODCE MATERIÁLY. Prusa Research by JOSEF PRUSA [online]. [cit. 2019-07-06]. Dostupné z: <https://www.prusa3d.cz/materialy/>
- [30] PLA – BIOPOLYMER POLYLAKTICKÁ KYSELINA. RESINEX [online]. [cit. 2019-07-06]. Dostupné z: <https://www.resinex.cz/polymerove-typy/pla.html>

- [31] 3M Scotch-Weld DP 190. G3 [online]. [cit. 2019-07-20]. Dostupné z: <https://www.g3.cz/katalog/lepidla-3m/dvouslozkova-strukturalni-lepidla-3m/3m-scotch-weld-dp-190-dp190>
- [32] SOBOTOVÁ, Jana, Zdeňka JENÍKOVÁ, Elena ČIŽMÁROVÁ a Jakub HORNÍK. Nauka o materiálu I. a II.: Cvičení. 2. dotisk 1.vydání. Praha: České vysoké učení v Praze, 2018.
- [33] ŠUBA, Oldřich. Dimenzování a navrhování výrobků z polymerů. Vyd. 2 (dotisk). Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2007. ISBN 978-80-7318-431-5.

10 Seznam obrázků

Obr. 1 Obecné rozdělení kompozitních materiálů	11
Obr. 2 Struktura sendvičové konstrukce s voštinový jádrem se šestihranným tvarem buněk	13
Obr. 3 Porovnání vlastností samotného plechu a sendvičové konstrukce [5]	15
Obr. 4 Znázorněné namáhání sendvičového panelu na ohyb	17
Obr. 5 Znázorněné namáhání sendvičového panelu na smyk	17
Obr. 6 Příklady ukončení sendvičových panelů a jejich spojování [5]	18
Obr. 7 Polotovar ve formě prepregu [10]	20
Obr. 8 A) zesílené hexagonální buňky, B) obdélníkové (přeexpandované), C) vlnitá voština (flex), D) Double-Flex voština [12]	22
Obr. 9 Příklad značení rozměrů voštiny [8]	22
Obr. 10 Nomexová voština [14]	23
Obr. 11 Hliníková voština [15]	24
Obr. 12 Schéma výroby voštinového jádra expanzní metodou s podélným nanášením lepidla [5]	26
Obr. 13 Sendvičové panely s pěnovými jádry [7]	27
Obr. 14 Dutiny propojené (vlevo), dutiny uzavřené (vpravo) [18]	27
Obr. 15 Příklady desek z balsového dřeva [21]	30
Obr. 16 Zkouška sendvičových panelů čtyřbodovým ohybem [5]	33
Obr. 17 Zkouška ve smyku sendvičů [5]	34
Obr. 18 Parker Solar Probe s tepleným štítem v čisté místnosti před uzavřením do aerodynamického krytu [26]	35
Obr. 19 Konstrukce tepelného štítu sondy PSP [27]	36
Obr. 20 Výsledný vzhled vzorků po vyhodnocení tahové zkoušky	38
Obr. 21 Vyrobená voština z PP fólie s použitím lepidla DP 8005	40
Obr. 22 Vyrobená voština pomocí 3D tisku (vzorek pro sadu č. 4)	43
Obr. 23 Umístění zkušebního tělesa na počátku zkoušky ohybem [32]	47
Obr. 24 Umístěný sendvičový vzorek (č. 4)	48
Obr. 25 Graf závislosti zatěžující síly F na průhybu s	49
Obr. 26 Porovnání modulu pružnosti	52

Obr. 27 Porovnání ohybové tuhosti průřezu	53
--	----

11 Seznam tabulek

Tab. 1 Závislost mechanických vlastností hliníkového sendvičového panelu na konstrukci [8]	15,41
Tab. 2 Měrné hmotnosti různých materiálů [5]	16
Tab. 3 Navržené hodnoty zkušebních vzorků.....	41
Tab. 4 Průměrné rozměry vyrobených a slepených vzorků	45
Tab. 5 Vypočítané hodnoty.....	51
Tab. 6 Závislost ohybové tuhosti a hustoty panelu na jeho tloušťce.....	54

12 Přílohy