

3D voštinové štruktúry v dopravnom priemysle

Pavol Šatka

Bakalárska práca
2016

 Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická
Ústav výrobního inženýrství
akademický rok: 2015/2016

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Pavol Šatka**
Osobní číslo: **T13119**
Studijní program: **B3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Technologická zařízení**
Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **3D voštinové štruktúry v dopravnom priemysle**

Zásady pro vypracování:

1. I. Teoretická časť
2. Sendvičové kompozitné štruktúry, rozdelenie, vlastnosti
3. Výroba 3 D voštinových štruktúr
4. Uplatnenie 3 D voštinových štruktúr v priemysle (dopravný, stavebný, letecký, športový)
5. II. Experimentálna časť
6. Návrh materiálového zloženia sendvičových konštrukcii
7. Výroba skúšobných telies s ohľadom na danú aplikáciu
8. Experimentálne testovanie podľa doporučených noriem
9. Vyhodnotenie experimentálnych výsledkov a ich diskusia
10. Záver

Rozsah bakalářské práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

Dle doporučení vedoucího práce

Vedoucí bakalářské práce:

doc. Ing. Soňa Rusnáková, Ph.D.

Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání bakalářské práce:

8. ledna 2016

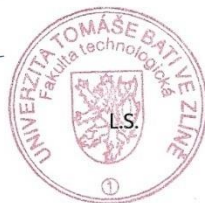
Termín odevzdání bakalářské práce:

20. května 2016

Ve Zlíně dne 3. února 2016



doc. Ing. František Buňka, Ph.D.
děkan



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

Příjmení a jméno: Pavol Šatka

Obor: TZ

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby¹⁾;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/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. 3²⁾;
- beru na vědomí, že podle § 60³⁾ odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60³⁾ odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – diplomovou/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);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/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.

Ve Zlíně 16. 5. 2016


.....

¹⁾ zákon č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, § 47 Zveřejňování závěrečných prací:

(1) Vysoká škola nevydávalečně zveřejňuje disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce, u kterých proběhla obhajoba, včetně posudků oponentů a výsledku obhajoby prostřednictvím databáze kvalifikačních prací, kterou spravuje. Způsob zveřejnění stanoví vnitřní předpis vysoké školy.

(2) Disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce odevzdané uchazečem k obhajobě musí být též nejméně pět pracovních dnů před konáním obhajoby zveřejněny k nahlížení veřejnosti v místě určeném vnitřním předpisem vysoké školy nebo není-li tak určeno, v místě pracoviště vysoké školy, kde se má konat obhajoba práce. Každý si může ze zveřejněné práce pořizovat na své náklady výpisy, opisy nebo rozmnoženiny.

(3) Platí, že odevzdáním práce autor souhlasí se zveřejněním své práce podle tohoto zákona, bez ohledu na výsledek obhajoby.

²⁾ 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, § 35 odst. 3:

(3) Do práva autorského také nezasahuje škola nebo školské či vzdělávací zařízení, užije-li nikoli za účelem přímého nebo nepřímého hospodářského nebo obchodního prospěchu k výuce nebo k vlastní potřebě dílo vytvořené žákem nebo studentem ke splnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školskému či vzdělávacímu zařízení (školní dílo).

³⁾ 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, § 60 Školní dílo:

(1) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení mají za obvyklých podmínek právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla (§ 35 odst. 3). Odpírá-li autor takového díla udělit svolení bez vážného důvodu, mohou se tyto osoby domáhat nahrazení chybějícího projevu jeho vůle u soudu. Ustanovení § 35 odst. 3 zůstává nedotčeno.

(2) Není-li sjednáno jinak, může autor školního díla své dílo užit či poskytnout jinému licenci, není-li to v rozporu s oprávněnými zájmy školy nebo školského či vzdělávacího zařízení.

(3) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení jsou oprávněny požadovat, aby jim autor školního díla z výdělku jím dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence podle odstavce 2 přiměřeně přispěl na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložily, a to podle okolností až do jejich skutečné výše; přitom se přihlídně k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

ABSTRAKT

Cieľom tejto bakalárskej práce je navrhnutie vhodného materiálového zloženia a technológie výroby sendvičovej voštinovej konštrukcie. Dané konštrukcie sú zamerané na dopravný priemysel a propagačné prvky.

Práca je zložená z dvoch častí. V teoretickej časti sú vysvetlené základné rozdelenia a vlastnosti sendvičových štruktúr. Ďalej sú v tejto časti popísané výrobné technológie sendvičových panelov, s dôrazom na ich spájanie a tvarovanie. Teoretická časť je zakončená zhrnutím použitia sendvičov v rôznych odvetviach priemyslu.

Praktická časť je zameraná na návrh materiálového zloženia a technológie výroby danej sendvičovej konštrukcie. V poslednej rade je popísaná výroba a testovanie skúšobných vzoriek z navrhnutého materiálového zloženia.

Kľúčové slová: Sendvičová konštrukcia, prepreg, voštiny, lisovanie, odlup

ABSTRACT

The aim of this bachelor thesis is to design a suitable material composition and fabrication technology of honeycomb sandwich construction. These constructions are focused on transport industry and promotional elements.

This thesis consists of two parts. The basic - and properties of sandwich structures are described in the theoretical part. Furthermore, this section describes production technologies of sandwich panels, with an emphasis on making connections and forming. The theoretical part is finished off with a summary of the use of composite materials in various industries.

The practical part is focused on the design of the material composition and fabrication technology of the sandwich construction. Lastly, it describes the preparation and testing of test samples from a designed material composition.

Keywords: Sandwich construction, prepreg, honeycombs, pressing, peel test

Touto cestou by som rád poďakoval svojej vedúcej paní doc. Ing. Soni Rusnákovej, Ph.D. za odborné poradenstvo, ochotu a čas, ktorý mi venovala pri písaní tejto bakalárskej práce a Ing. Milanovi Žaludkovi Ph.D. za pomoc pri testovaní skúšobných vzoriek. Ďalej by som chcel poďakovať svojej snúbenici za podporu a nie len za psychickú výpomoc, ale aj fyzickú, pri výrobe skúšobných vzoriek.

Prehlasujem, že odovzdaná verzia bakalárskej práce a verzia elektronická nahraná do IS/STAG sú totožné.

OBSAH

ÚVOD	10
I TEORETICKÁ ČASŤ	11
1 ROZDELENIE A VLASTNOSTI SENDVIČOVÝCH KOMPOZITNÝCH ŠTRUKTÚR	12
1.1 VLASTNOSTI SENDVIČOVÝCH ŠTRUKTÚR	13
1.1.1 Tuhosť a pevnosť v ohybe.....	13
1.1.2 Tepelná odolnosť a odolnosť proti ohňu.....	14
1.1.3 Tlmenie zvuku.....	14
1.2 VONKAJŠIE VRSTVY SENDVIČOVÝCH ŠTRUKTÚR	15
1.2.1 Poťahy	15
1.2.2 Prepregy	15
1.3 DRUHY SENDVIČOVÝCH JADIER.....	16
1.3.1 Balzové drevo.....	16
1.3.2 Polymérne peny.....	17
1.3.3 Voštiny	19
1.3.3.1 Materiály voštín	19
1.3.3.2 Typy voštinový buniek	22
2 VÝROBA 3D VOŠTINOVÝCH ŠTRUKTÚR	24
2.1 VÝROBA VOŠTINOVÝCH JADIER.....	24
2.1.1 Expanzný proces	24
2.1.2 Vrapovanie fólie.....	25
2.2 TECHNOLOGIA VÝROBY SENDVIČOVÝCH VOŠTINOVÝCH ŠTRUKTÚR.....	25
2.2.1 Vytvrdzovanie v autokláve	26
2.2.2 Vyhrievané lisovanie.....	26
2.2.3 Formovanie v uzavretej forme	27
2.3 OHÝBANIE VOŠTINOVÝCH ŠTRUKTÚR.....	27
2.4 SPÁJANIE VOŠTINOVÝCH ŠTRUKTÚR.....	29
2.4.1 Tvarové spájanie	29
2.4.2 Spojovacie prvky.....	31
2.5 UZATVÁRACIE PRVKY VOŠTINOVÝCH ŠTRUKTÚR	32
3 UPLATNENIE 3D VOŠTINOVÝCH ŠTRUKTÚR V PRIEMYSLE	33
3.1 DOPRAVNÝ PRIEMYSEL	33
3.2 LODNÁ DOPRAVA	34
3.3 STAVEBNÝ PRIEMYSEL	35
3.4 LETECTVO A KOZMONAUTIKA	35
3.5 ŠPORT A VOENÝ ČAS.....	36
II PRAKTICKÁ ČASŤ	37
4 CIELE BAKALÁRSKEJ PRÁCE	38
5 NÁVRH APIKÁCIE A DIZAJN VÝROBKU	39
5.1 APLIKÁCIA VÝROBKU.....	39
5.2 DIZAJN VÝROBKU.....	39

6	NÁVRH MATERIÁLOVÉHO ZLOŽENIA A TECHNOLOGIE VÝROBY JEDNOLIVÝCH ČASTÍ.....	41
6.1	OTVÁRACIA ČASŤ.....	41
6.2	OBVODOVÁ ČASŤ	43
6.2.1	Materiálové zloženie	43
6.2.2	Technológia výroby	44
6.3	VRCHNÁ A SPODNÁ ČASŤ	46
7	NÁVRH SPOJENIA JEDNOTLIVÝCH ČASTÍ.....	47
8	VÝROBA A TESTOVANIE SKÚŠOBNÝCH VZORIEK.....	48
8.1	POUŽITÉ MATERIÁLY	48
8.1.1	Voštinové jadro	48
8.1.2	Epoxidový prepreg	48
8.2	POSTUP VÝROBY	49
8.3	TESTOVANIE SKÚŠOBNÝCH VZORIEK.....	52
8.3.1	Namerané hodnoty	53
8.4	DISKUSIA VÝSLEDKOV	55
	ZÁVER	56
	ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY	57
	ZOZNAM POUŽITÝCH SYMBOLOV A SKRATIEK.....	59
	ZOZNAM OBRÁZKOV	60
	ZOZNAM TABULIEK	62
	ZOZNAM PRÍLOH.....	63

ÚVOD

Voštiny sa skladajú z rady otvorených buniek, vytvorených z veľmi tenkých, navzájom spojených, vrstiev materiálu. Toto pomenovanie dostalo vďaka podobnosti s včelím plastom, ktorý môžeme nájsť voľne v prírode. Môžu byť vyrobené z ľubovoľného tenkého plochého materiálu. V minulosti bolo vyrobených viac ako 500 rôznych druhov voštín.

Základným predpokladom vytvorenia sendvičovej voštinovej konštrukcie je použitie tenkého, hustého a pevného poťahového materiálu spojeného s hrubším a ľahkým voštinovým jadrom. Takáto konštrukcia dosahuje jeden z najlepších pomerov hmotnosti k pevnosti a hmotnosti k tuhosti. Voštiny majú jedinečné a zaujímavé materiálové konfigurácie, ktoré ponúkajú množstvo výhod, ako napríklad dobré mechanické vlastnosti, nízke dielektrické vlastnosti, nízku tepelnú vodivosť, dobré akustické vlastnosti, malú plochu prierezu a mnoho ďalších.

Sendvičové konštrukcie nachádzajú uplatnenie v dopravnom, leteckom alebo kozmickom priemysle. Okrem týchto troch odvetví priemyslu, je možné tieto špeciálne typy kompozitných materiálov nájsť aj v stavebnom, lodnom, športovom ale aj vo vojenskom priemysle. Vo všetkých odvetviach sa využívajú hlavne kvôli ich vysokej pevnosti a tuhosti vzhľadom k nízkej hmotnosti.

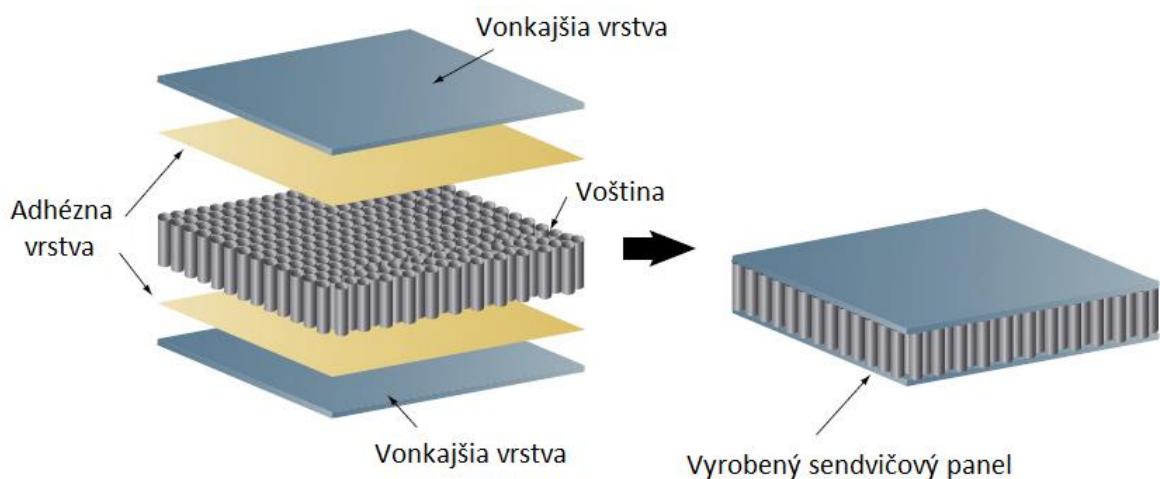
Teoretická časť tejto bakalárskej práce je venovaná základnému rozdeleniu a vlastnostiam sendvičových štruktúr. Okrem toho časť zahŕňa aj výrobu voštinových jadier a sendvičových panelov a ich aplikácie v rôznych odvetviach priemyslu.

V praktickej časti je uvedený návrh materiálového zloženia a technológie výroby danej sendvičovej konštrukcie, spolu s testovaním skúšobných vzoriek. Výsledný návrh a výsledky sú diskutované v závere tejto práce.

I. TEORETICKÁ ČASŤ

1 ROZDELENIE A VLASTNOSTI SENDVIČOVÝCH KOMPOZITNÝCH ŠTRUKTÚR

Sendvičové štruktúry môžeme zaradiť medzi kompozitné materiály pozostávajúce z dvoch alebo viacerých individuálnych komponentov s rozdielnymi vlastnosťami, ktorých kombináciou dosiahneme materiál vysokej kvality. V porovnaní s jednoliatymi kompozitami majú sendvičové štruktúry delenú štruktúru, v ktorej je jadrový materiál spojený s materiálom vonkajšej vrstvy. Materiál vonkajšej vrstvy sa prevažne vyznačuje vysokou tuhosťou, zatiaľ čo materiál jadra má zvyčajne vysokú pevnosť v tlaku a v šmyku. Spojením týchto častí dohromady vzniká sendvičová konštrukcia s vysokým modulom pružnosti.[1]



Obr. 1: Sendvičový panel [2]

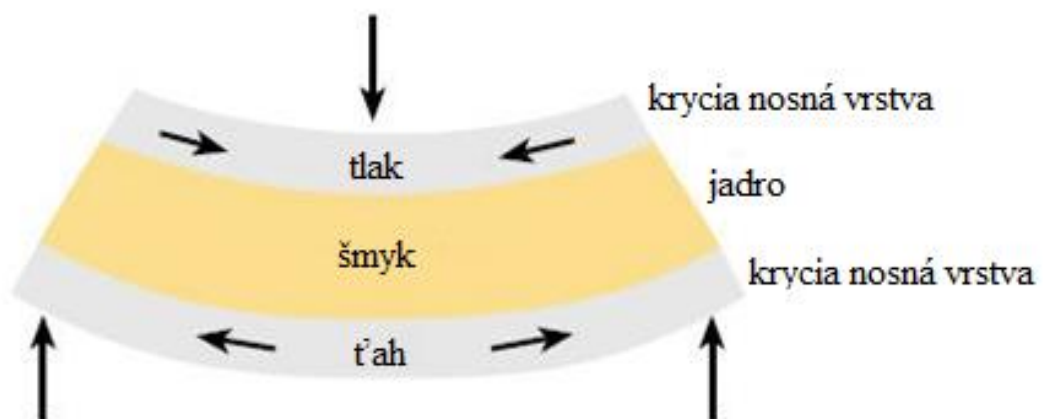
Vonkajšie vrstvy sú spojené s jadrom pomocou kvapalných alebo pastových lepidiel a zvyčajne vytvrdzujú použitím tepla a tlaku, aj keď niektoré lepidlá dokážu vytvrdzovať pri izbovej teplote. Vybrané lepidlo musí mať vhodné mechanické a tepelné vlastnosti, pre dosiahnutie kompatibility medzi materiálom vonkajšej vrstvy a materiálom jadra, a to najmä s ohľadom na rozdiely tepelnej rozťažnosti. [1]

Vlastnosti sendvičových štruktúr sú prevažne určené materiálom jadra. Medzi ich hlavné výhody patrí dosiahnutie vysokej pevnosti a tuhosti bez toho, aby sa výrazne zvýšila hmotnosť. Taktiež v závislosti na použitých materiáloch pôsobí ako tepelná izolácia. Medzi ďalšie výhody patrí napríklad tlmenie vibrácií a hluku, únavová odolnosť, odolnosť proti šíreniu trhlin, odolnosť proti rázom, tepelná odolnosť a ohňovzdornosť. [3,4]

1.1 Vlastnosti sendvičových štruktúr

1.1.1 Tuhosť a pevnosť v ohybe

Ohybová tuhosť sendviča je priamo úmerná druhej mocnine jej hrúbky. Výhodou je, že zo zväčšovaním hrúbky sendviča dochádza k veľmi malému nárastu jeho hmotnosti – zväčšuje sa len hrúbka ľahkého jadra, ktoré má bežnú hustotu okolo 80 kg/m^3 . Pevnosť v ohybe tiež rastie so vzdialenosťou poťahov, ale pri dimenzovaní sendviča je nutné zároveň posudzovať šmykovú pevnosť jadra. Obecne môžeme povedať, že pevnosť jadra v šmyku rastie s jeho hustotou. O pevnosti sendviča v tlaku v smere jeho hrúbky rozhoduje predovšetkým pevnosť jadra v tlaku, ale i tuhosť a hrúbka poťahov. Pevnosť v tlaku jadra rastie s jeho hustotou. [5]

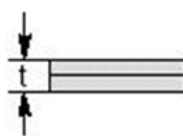
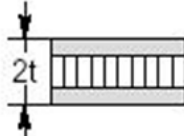
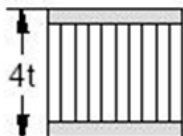


Obr. 2: Zaťaženie sendvičovej konštrukcie na ohyb [5]

Na obrázku 2 môžeme pozorovať, že pri zaťažení sendvičovej konštrukcie na ohyb, pôsobia na vonkajšie vrstvy ťahové a tlakové sily. Materiál jadra medzitým musí udržiavať konštantnú veľkosť prierezu a odoláva teda šmykovému zaťaženiu. [4,5]

V nasledujúcej tabuľke môžeme vidieť porovnanie pevnosti a tuhosti v ohybe celistvého materiálu a štruktúry s jadrom. Môžeme si všimnúť, že s použitím sendvičového materiálu a vhodnou voľbou hrúbky môžeme docieľiť značné zvýšenie týchto vlastností. Z tabuľky vyplýva, že tuhosť sa zvýši pri rovnakej hmotnosti konštrukcie 37 násobne a pevnosť v ohybe 9,2 násobne. Všeobecne teda môžeme povedať, že čím väčšia hrúbka jadra, tým väčšia pevnosť a tuhosť sendvičového panelu pri malej zmene hmotnosti. [5,6]

Tab. 1: Porovnanie pevnosti a tuhosti v ohybe [6]

	Celistvý materiál	Hrúbka jadra t	Hrúbka jadra $3t$
tuhosť v ohybe			
pevnosť v ohybe	1.0	7.0	37.0
hmotnosť	1.0	1.03	1.06

1.1.2 Tepelná odolnosť a odolnosť proti ohňu

Rovnako, ako pri strojárnských alebo iných výrobkoch, tak aj na výrobky zo sendvičových štruktúr sa kladú požiadavky na tepelnú odolnosť. V porovnaní s inými výrobkami sa však musí brať do úvahy tepelná odolnosť všetkých zložiek sendvičového panelu, t.j. poťahov, jadra a taktiež spojovacieho lepidla. Na tepelnú odolnosť má veľký vplyv tepelná vodivosť jednotlivých použitých materiálov. Napríklad pri ohreve sendvičového panelu len na jednej strane je ohrev sendviča nižší pri použití materiálov s vysokou tepelnou vodivosťou ako pri použití materiálov s nízkou tepelnou vodivosťou. Tieto užitočné vlastnosti sa využívajú napríklad v raketovom priemysle, pri stavbe kozmických rakiet, kde sa práve z tohto dôvodu používajú hliníkové voštiny. [4]

Pri návrhu sendvičov pre dopravnú techniku je nutné rešpektovať požiadavky odborových konštrukčných predpisov na odolnosť proti ohňu. Všetky použité materiály musia mať atest, že spĺňujú príslušné predpisy na odolnosť proti ohňu. [4]

1.1.3 Tlmenie zvuku

Zvuková izolácia je fyzikálna hodnota, ktorá ukazuje rýchlosť poklesu zvukovej energie na jednej strane povrch (napr. steny alebo strešného plášťa), pričom zdroj zvuku je na opačnej strane. Táto akustická hodnota vyjadruje schopnosť materiálu, povrchu alebo konštrukcie redukovať zvukovú energiu v decibeloch. Všeobecne platí, že sendvičové štruktúry s vyššou hmotnosťou sú vhodnejšie pre tlmenie zvuku v závislosti na frekvencii zvuku. Z toho dôvodu majú panely s jadrom z minerálnej vlny lepšie zvukové izolačné vlastnosti než panely s PUR izoláciou. [7]

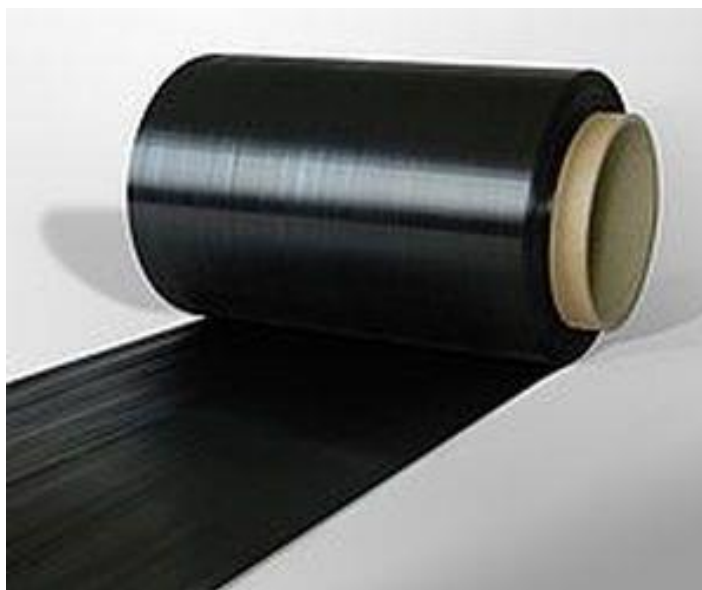
1.2 Vonkajšie vrstvy sendvičových štruktúr

1.2.1 Poťahy

Materiály poťahov môžu byť rozdelené do dvoch hlavných skupín, kovové a nekovové. Medzi najpoužívanéjšie kovové materiály patrí napr. oceľ, zliatiny ocele alebo zliatiny hliníku. Z nekovových materiálov sú najdôležitejšie lamináty vystužené vláknami - prepregy a drevo. Poťahy sú tenké, ale veľmi tuhé proti jadru. Sú vystavené účinkom vonkajšieho prostredia, a preto sa na ne kladú určité požiadavky ako napr. nízka hmotnosť, tuhosť a pevnosť, schopnosť odolávať nárazom, odolnosť proti opotrebeniu, vlhkosti, únave, teplote alebo chemikáliám, nehorľavosť, tepelná vodivosť, nízka cena a vzhľad apod. [8,9]

1.2.2 Prepregy

Prepregy sú špeciálne živice vystužené umelými vláknami ako napríklad uhlíkové, sklenené alebo aramidové vlákna. Po vytvrdzovaní prepregov, ktoré prebieha pri zvýšenej teplote a tlaku, dostaneme mimoriadne pevné no zároveň ľahké komponenty. Po pevnosti a nízkej hmotnosti majú ešte veľa ďalších výhod, medzi ktoré patrí napríklad odolnosť voči vonkajším vplyvom, odolnosť voči nárazom a nízke výrobné náklady. V sendvičových štruktúrach môžu byť použité samolepiace prepregy, ktoré nevyžadujú dodatočnú adhéznú vrstvu a umožňujú tak ďalšie zníženie hmotnosti a nákladov na výrobu. [10]

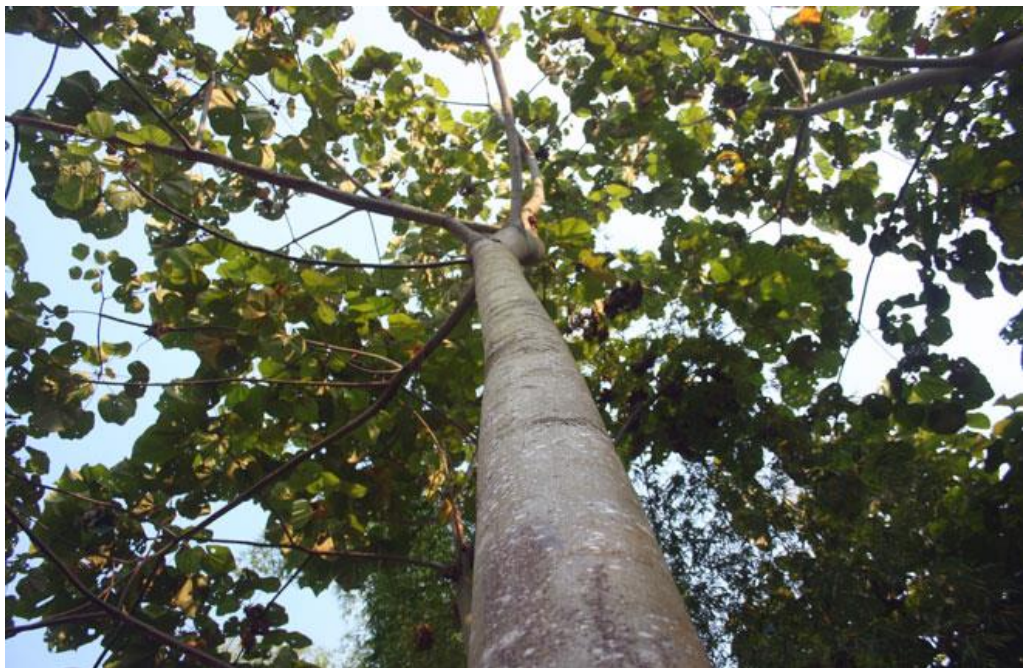


Obr. 3: Prepreg [11]

1.3 Druhy sendvičových jadier

1.3.1 Balzové drevo

Jadrá z balzového dreva sa prvýkrát objavili v roku 1940 v trupoch lietajúcich lodí, ktoré mali hliníkovú vonkajšiu vrstvu a jadro z balzového dreva, aby odolali opakovaným vplyvom pristátia na vode. Tento materiál sa získava spracovaním prírodnej balzy z balzových stromov, ktorý rastie v Južnej Amerike, najmä v oblasti Ekvádoru. Balzový strom patrí medzi najrýchlejšie rastúce stromy na svete. Zo sadenice vyrastie strom s priamym kmeňom, výškou až 30 metrov a priemerom približne 45 centimetrov v priebehu 5 až 7 rokov. Na spracovanie prírodného balzového dreva do konštrukčného jadrového materiálu je potrebné len veľmi malé množstvo energie. [12,13]



Obr. 4: Balzový strom (*Ochroma pyramidale*) [14]

Medzi výhody tohto materiálu patrí tuhosť, pevnosť, vysoká odolnosť proti nárazu, vynikajúca odolnosť proti vlhkosti, vynikajúca absorpcia zvuku a tepelná izolácia. Jedna z hlavných nevýhod balzy je jeho vysoká minimálna hustota, ktorá sa bežne pohybuje okolo 100 kg/m^3 . Tento problém je ešte zhoršený tým, že balzové drevo je schopné absorbovať veľké množstvo živice v priebehu laminácie. Jeho použitie je preto všeobecne obmedzené na projekty, kde nie je požadovaná úspora optimálnej hmotnosti alebo v lokálne vysoko namáhaných oblastiach. [12]

Pri použití balzového dreva v sendvičových štruktúrach so zrnom smerujúcim kolmo s rovinou vonkajších plôch, má výsledná zložka vlastnosti podobné umelým voštinám. Avšak aj cez rôzne chemické ošetrenia, ktoré sú v dnešnej dobe k dispozícii, sú všetky drevené jadrá náchylné k navlhaniu a hnilobe a to v prípade, keď jadro nie je dostatočne obklopené laminátom alebo živicom. [12]



Obr. 5: Dyha balzového dreva [13]

1.3.2 Polymérne peny

Polymérne peny patria medzi jedny z najbežnejšie používaných materiálov jadier sendvičových konštrukcií. Ich hustota zvyčajne býva v rozmedzí od menej ako 30 kg/m^3 do viac ako 300 kg/m^3 , aj keď najpoužívanejšie hustoty pien v kompozitných štruktúrach sa pohybujú v intervale od 40 do 200 kg/m^3 . Taktiež sú k dispozícii v rôznych hrúbkach, zvyčajne od 5 mm do 50 mm . Výhodou polymérnych pien je odolnosť voči pretlačeniu a nárazu, samozhášavosť, pevnosť a ohybnosť, teplotná odolnosť od -20 až 80°C , chemická odolnosť, nízka rádiolokačná priepustnosť a tiež môžu byť použité ako zvuková izolácia. [16]



Obr. 6: Polymérne peny [16]

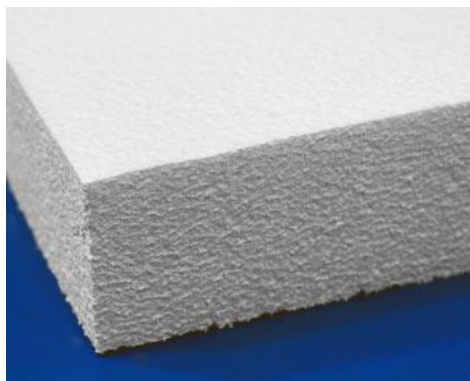
Najčastejšie používané syntetické polyméry, z ktorých sú vyrobené peny:

- **Polyvinylchlorid (PVC)** - Tento typ polymérnych pien môžeme rozdeliť na sieťované a nesieťované. Nesieťované sú v porovnaní so sieťovými tuhšie a ohybnejšie, no majú nižšie mechanické vlastnosti pri rovnakej hustote a tiež majú nižšiu odolnosť proti zvýšeným teplotám. Všeobecne majú PVC peny dobrú odolnosť proti absorpcii vody a vyvážené statické a dynamické vlastnosti. [16]



Obr. 7: PVC pena [16]

- **Polystyrén (PS)** - Kvôli svojim nízkym mechanickým vlastnostiam sa polystyrénové peny nemôžu používať pre výrobu konštrukčných prvkov s vysokou pevnosťou. Medzi ich výhody patrí nízka hmotnosť a cena. PS peny nemôžu byť použité v systéme spolu s polyesterovými živnicami, pretože by boli rozpustené styrénom, ktorý je v živici prítomný. [16]



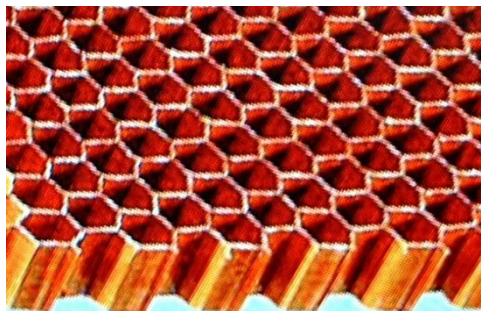
Obr. 8: Polystyrénová pena [15]

- **Polyuretán (PUR)** - Ich konštrukčné aplikácie sú väčšinou obmedzené na výrobu rámov z dôvodu slabších mechanických vlastností. Môžu byť však použité v menej zaťažovaných sendvičových paneloch, ktoré sú často používané ako tepelná izolácia. Sú ľahko spracovateľné a obrobené do požadovaných tvarov a profilov. [16]

- **Styrén-akrylonitril (SAN)** - SAN peny sú veľmi podobné tvrdeným sieťovaným PVC penám. Majú väčšinu statických vlastností PVC jadier, no majú oveľa vyššiu húževnatosť a pružnosť. Sú preto schopné absorbovať väčšie nárazové sily než konvenčné alebo dokonca aj spevnené PVC peny. Húževnatosť sa nebude výrazne meniť vekom z dôvodu nepoužívania zmäkčovadiel na spevnenie polyméru. [16]

1.3.3 Voštiny

Voština sa skladá z radu otvorených buniek v tvare n-uholníkov, vytvorených z veľmi tenkých vrstiev navzájom pospájaného materiálu. Názov voština bol určený pre podobnosť s včelími medovými plástmi nájdenými v prírode. Môže byť vyrobená z ľubovoľného tenkého plochého materiálu, preto bolo v minulosti vyrobených viac ako 500 rôznych druhov voštín. Voštinový papier bol prvýkrát vyrobený asi pred 2000 rokmi v Číne, ktorý ju používali na výrobu ornamentov a nie na konštrukčné využitie, ako je tomu dnes. [4]



Obr. 9: Voština [4]

Pre stanovenie optimálneho voštinového jadra vzhľadom k požadovanému výrobku je potrebné, aby sme poznali nasledujúce parametre:

- Materiál voštiny
- Typ voštinových buniek
- Veľkosť jednej bunky
- Hustota voštiny

1.3.3.1 Materiály voštín

Voštinová sendvičová konštrukcia môže zahŕňať neobmedzenú možnosť výberu materiálov a panelových konfigurácií. Široký rozsah kombinácií jadrových materiálov a materiálov vonkajších vrstiev zabezpečuje všestranné využitie v praxi. Medzi najbežnejšie používané železné i neželezné materiály v dnešnej dobe patrí hliník, Nomex (aramid), Korex, Kevlar alebo rôzne termoplastické polyméry. [4]

- **Hliníkové voštiny**

Tento typ voštín patrí medzi jeden z najlepších konštrukčných materiálov, vzhľadom k pevnostnému a hmotnostnému pomeru. Existujú rôzne konfigurácie adhézných spojení hliníkovej fólie, čo má za následok množstvo geometrických tvarov buniek, z ktorých sú najčastejšie používané bunky s hexagonálnym tvarom. Ich vlastnosti môžu byť riadené zmenou hrúbky fólie a zmenou veľkosti bunky. [17]



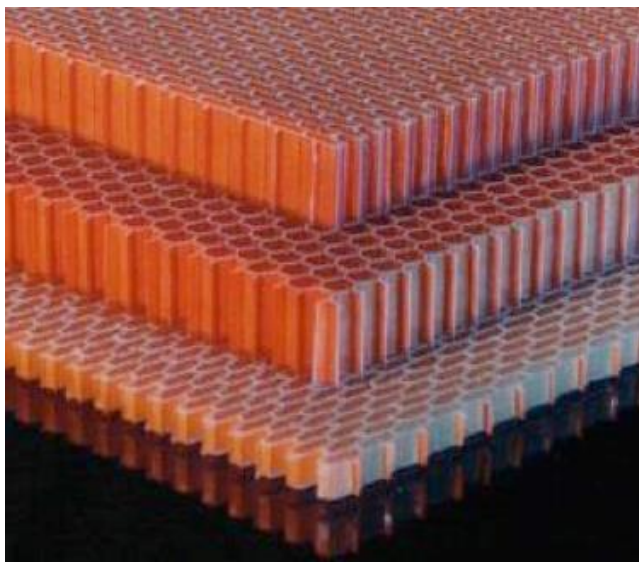
Obr. 10: Hliníková voština [18]

Napriek svojim dobrým mechanickým vlastnostiam a relatívne nízkej cene, sa hliníkové voštiny musia v niektorých prípadoch používať s opatrnosťou, napríklad v námorníctve, kde môže dôjsť k problémom s koróziou v prostredí slanej vody. Ďalšiu nevýhodu, ktorá môže mať vplyv na výrazné zníženie mechanických vlastností, je možné pozorovať pri deformácii nárazom, kedy sa odolný plášť vráti do pôvodného stavu, ale voštinové jadro zostane trvale deformované. Dá sa teda povedať, že hliníkové voštiny nemajú "mechanickú pamäť". [17]

- **Nomexové voštiny**

Základom aramidových voštín je nomexový papier, ktorý je tvorený kevlarovým alebo celulózovým vláknom. Vytvorená papierová voština je namáčaná do fenolickej živice, čím vznikne voštinové jadro s vysokou pevnosťou a veľmi dobrou odolnosťou proti ohňu. Tento typ voštín má široké uplatnenie v rôznych priemysloch, napríklad v dopravnom priemysle, kde sa vďaka svojej malej hmotnosti používajú ako panely v interiéroch

lietadiel. Niektoré druhy nomexových voštín sú pre zníženie horľavosti usposobené tak, že jednotlivé bunky jadra sú vyplnené fenolicou penou, čím sa tiež zväčší styčná adhézna plocha, a systém potom funguje ako izolácia. Vďaka svojim vynikajúcim mechanickým vlastnostiam, nízkej hustote a dlhodobej stabilite, sú tieto voštiny stále viac používané v leteckých komponentoch. [17,19]



Obr. 11: Nomexová voština [18]

- **Kevlarové voštiny**

Kevlarové voštiny patria medzi najnovšie druhy materiálov voštinových jadier. V porovnaní s Nomex voštinami vykazujú zlepšené vlastnosti v oblasti hmotnosti (40% ľahšie), pevnosti (4-násobne pevnejšie), tuhosti a únavy materiálu. Medzi ďalšie výhody patrí vysoká húževnatosť, vynikajúca tepelná stabilita a odolnosť proti vlhkosti. Kevlarové voštiny sú vyrobené z para-aramidového vláknového papiera, ktorý je impregnovaný v tepelne odolnej fenolickej živici. [18]



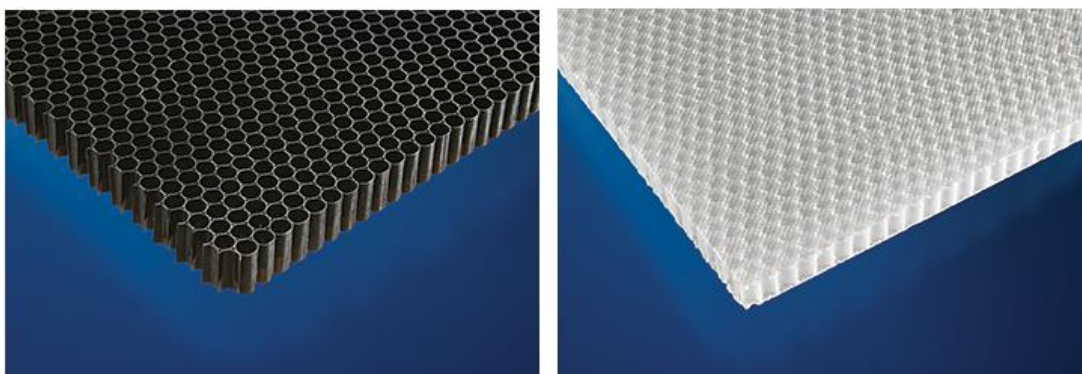
Obr. 12: Kevlarová voština [18]

- **Termoplastické voštiny**

Termoplastické materiály jadier majú nízku hmotnosť a poskytujú niekoľko užitočných vlastností a prípadne aj možnosti pre ľahšiu recykláciu. Ich hlavnou nevýhodou je náročné dosiahnutie dobrého spojenia medzi voštinou a vonkajším plášťom, a relatívne nízka tuhosť. Sú zriedkavo používané vo veľmi namáhaných konštrukciách, ale môžu byť užitočné v jednoduchých interiérových paneloch.

Najbežnejšie používané polyméry pre výrobu voštín sú:

- **ABS (AkrylonitrilButadienStyrén):** kvôli svojej tuhosti, rázovej pevnosti, húževnatosti, tvrdosti povrchu a rozmerovej stabilite
- **PC (Polykarbonát):** kvôli svojej UV-stabilite, vynikajúcej svetelnej priepustnosti, dobrej tepelnej odolnosti a samozhášavé vlastnosti.
- **PP (Polypropylén):** kvôli svojej dobrej chemickej odolnosti
- **PE (Polyetylén):** kvôli svojej univerzálnosti a nízkej cene materiálu. [17]



Obr. 13: Polykarbonátová a polypropylénová voština [20]

1.3.3.2 Typy voštinový buniek

- Hexagonálna
- OX-Core
- Vystužená hexagonálna
- Flex-Core
- Double-Flex

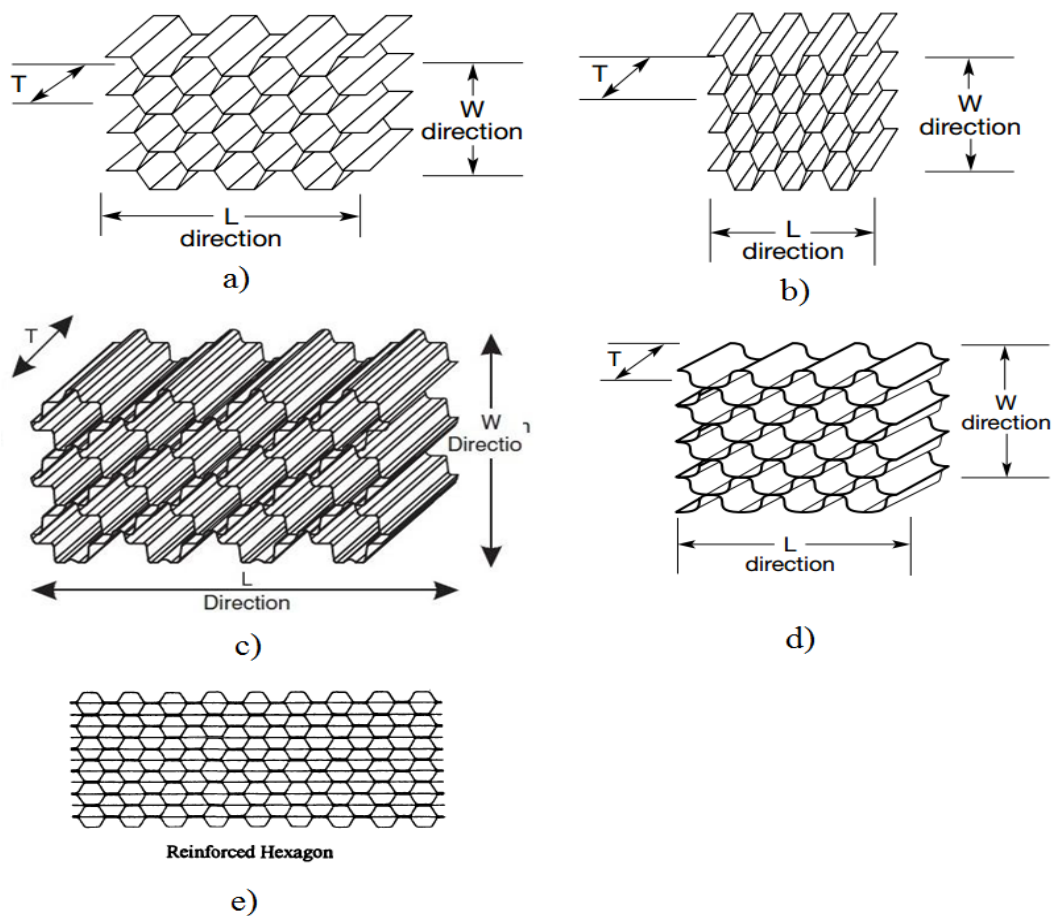
Hexagonálna: Hexagonálna (šesťhranná) voština patrí medzi základné a najpoužívanejšie adhézne spojené typy voštinových konfigurácií. Je bežne dostupná z nekovových aj kovových materiálov.

OX-Core: Konfigurácia OX je v podstate hexagonálna voština, predĺžená v smere W, kde poskytuje obdĺžnikovú konfiguráciu bunky a umožňuje zakrivenie alebo formovanie v smere L. V porovnaní s šesťhrannou voštinou má zvýšené šmykové vlastnosti v smere predĺženia W a zároveň znížené šmykové vlastnosti v smere L.

Vystužená hexagonálna: Tento typ voštiny má list podkladového materiálu, ktorý je umiestnený pozdĺž uzlov v smere pásu, pre zvýšenie hustoty a mechanických vlastností. Takýmto spôsobom bola vyrobená hliníková voština s hustotou až 880 kg/m^3 .

Flex-Core: Konfigurácia Flex-Core poskytuje výnimočné vlastnosti v oblasti tvárnosti a zakrivenia voštín bez vydutia bunkových stien. V porovnaní s šesťhrannými jadrami s rovnakou hustotou poskytujú Flex jadrá vyššiu pevnosť v šmyku. Ako výrobný materiál sa používa hliník, Nomex alebo sklolaminátové substráty.

Double-Flex: Double-Flex je unikátna veľká bunka hliníku Flex-Core s vynikajúcou tvarovateľnosťou a s vysokými špecifickými tlakovými vlastnosťami. [21,22]



Obr. 14: a) Šesťhranná voština, b) OX-Core voština, c) Flex-Core voština, d) Double-Flex voština, e) Vystužená hexagonálna voština [21,22]

2 VÝROBA 3D VOŠTINOVÝCH ŠTRUKTÚR

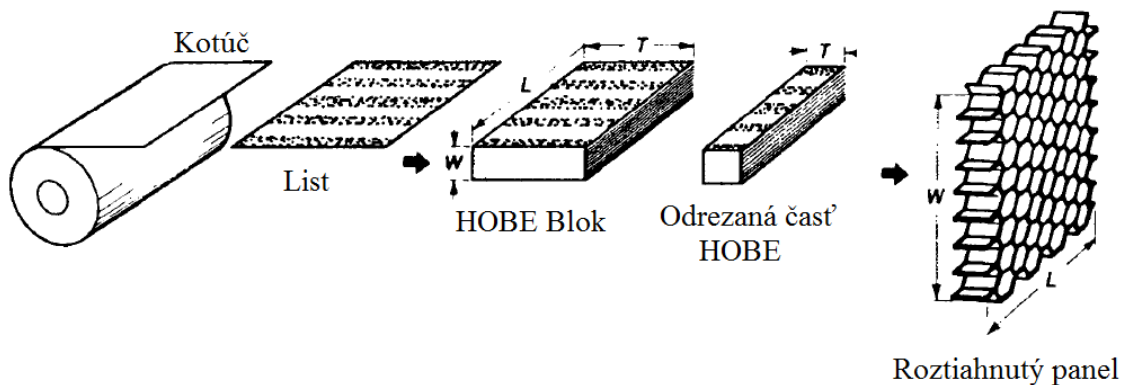
2.1 Výroba voštinových jadier

Existuje päť základných spôsobov výroby voštín: adhéznym spájaním, odporovým zváraním, spájkovaním, difúznym spájaním a tepelnou fúziou. Použitie týchto metód závisí na tom, ako sú uzly spojené. Najčastejší spôsob výroby je adhézne spájanie, ktorým je vyrobených približne 95% voštinových jadier. Odporové zváranie, spájkovanie a difúzne spájanie sú používané iba v jadrách, ktoré sú vystavené vysokým teplotám alebo náročným klimatickým podmienkam a to hlavne z dôvodu vysokej výrobnéj ceny. Niektoré termoplastické materiály nevyžadujú lepidlo k vytvoreniu voštiny. V uzloch bývajú zahrievané aby sa čiastočne roztavili a následne tlakom spojené dohromady. [22]

K premene plošného materiálu na voštinový sú bežne používané dva základné výrobné postupy:

- Expanzný proces
- Vrapovanie fólie

2.1.1 Expanzný proces

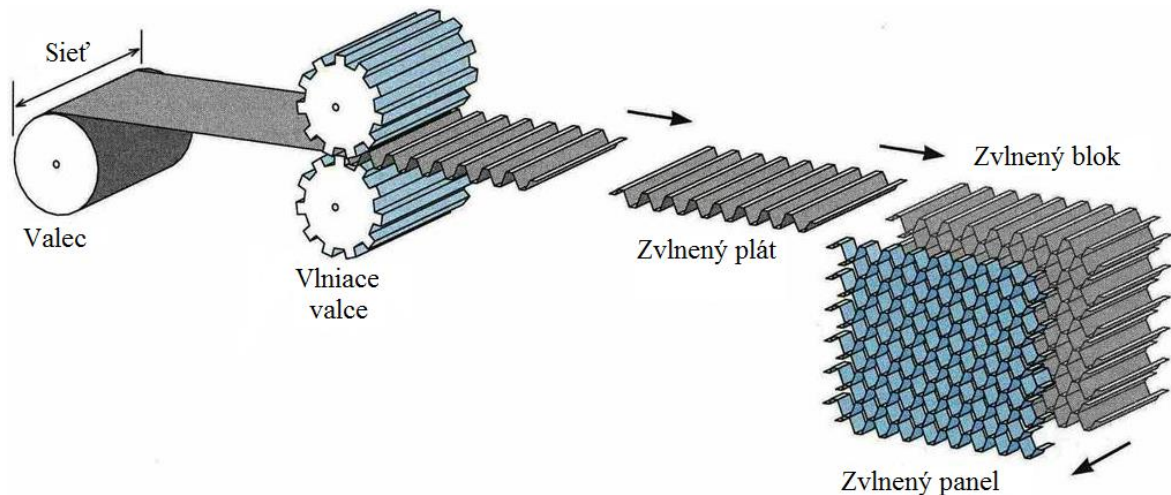


Obr. 15: Spôsob výroby roztiahnutého voštinového jadra [22]

Proces výroby roztiahnutého voštinového jadra začína nanosením pruhov lepidla v rovnomerných odstupoch na pásy, ktoré sú následne na seba rovnobežne naskladané, a ktoré sa navzájom zlepujú pod tlakom, eventuálne pri zvýšenej teplote. Po vytvrdení lepidla sa vzniknutý naskladaný blok roztiahne a pomocou reznej jednotky oddelí na požadovanú hrúbku. Druhý postup výroby spočíva v odrezaní určitej časti z naskladaného bloku, a následnému roztiahnutiu tejto časti.

V anglickej terminológii býva tento naskladaný blok nazývaný HOBE (HoneycombBeforeExpansion), čo v preklade znamená "voština pred rozťahnutím". Typ konfigurácie buniek v rozťahnutej voštine závisí na výške rozťahovania. Napríklad pri normálnom rozťahovaní vznikne hexagonálna štruktúra buniek, ale pri dlhšom rozťahovaní v smere W môže vzniknúť bunková štruktúra obdĺžnikovitého tvaru.[21]

2.1.2 Vrapovanie fólie



Obr. 16: Výroba voštinového jadra technológiou vrapovania fólie [4]

Jeden z moderných výrobných postupov pozostáva z vrapovania fólie. Táto metóda výroby voštinových jadier môže byť použitá ako na výrobu kovových jadier s vysokou hustotou, tak na niektoré typy nekovových jadier. Základom tejto technológie je spojenie zvlnených listov pomocou živice, ktoré sú naskladané na seba a vytvrdené v peci. Keďže na naskladaný blok môže byť aplikovaný len malý tlak, adhézne vrstvy sú oveľa hrubšie v porovnaní s expanzným jadrom. V skutočnosti môže hmotnosť živice byť až 10% z celkovej hmotnosti voštiny, pričom v rozťahnutom jadre je to len okolo 1%. [22]

2.2 Technológia výroby sendvičových voštinových štruktúr

Sendvičové voštinové štruktúry sú rozdelené do niekoľkých základných skupín, podľa spôsobu výroby. Medzi výrobné metódy patrí napríklad vyhrievané lisovanie, ktoré sa používa pre výrobu dosiek a jednoduchých panelov, vytvrdzovanie v peci, používané pre zakrivené a komplexné formy sendvičových panelov, a formovanie v uzavretej forme, ktoré je používané pre formovanie hotových tvarových panelov. Medzi ďalšie technológie používané v praxi patrí metóda ručné kladenia, RTM a podobne. [24]

2.2.1 Vytvrzovanie v autokláve

Vytvrzovanie v autokláve patrí medzi najzložitejšie a najnákladnejšie technológie sériovej výroby veľkorozmerných konštrukcií. Ako základný materiál sú používané prepregy, ktoré vytvrdzujú za zvýšených teplôt. Forma je pokrytá pružnou fóliou a následne umiestnená do vyhrievaného autoklávu. Najskôr musí prebehnúť evakuácia podtlakom (približne 0,08 MPa), po ktorej sa tlak v autokláve zvýši na približne 0,6 MPa. [22, 23]

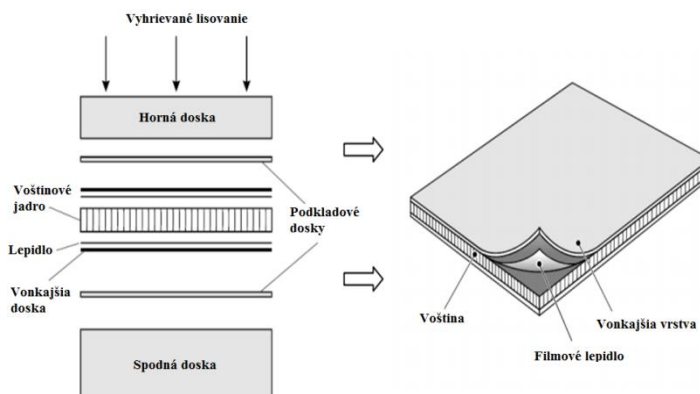
Po zahriatí autoklávu na požadovanú teplotu, ktorá sa zvyčajne pohybuje v rozmedzí 120 až 200 °C, nastáva vytvrzovanie živice. Jednotlivé vrstvy prepregu sú k sebe následne pritlačované nízkym pretlakom (desatiny MPa), čím sa zaručí minimálny obsah živice. [22]



Obr. 17: Autokláv [6]

2.2.2 Vyhrievané lisovanie

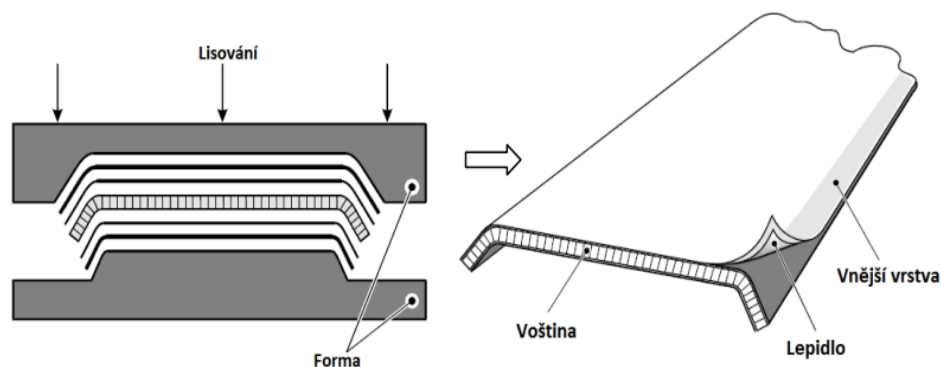
Výroba sendvičových voštinových štruktúr vyhrievaným lisovaním spočíva vo vložení vonkajších dosiek z prepregu alebo kovu medzi podkladové dosky, na ktoré sa nanesú dve vrstvy fóliového lepidla a do stredu voštinové jadro. K zalisovaniu dochádza na vyhrievanom lise. [22]



Obr. 18: Technológia vyhrievaného lisovania [23]

2.2.3 Formovanie v uzavretej forme

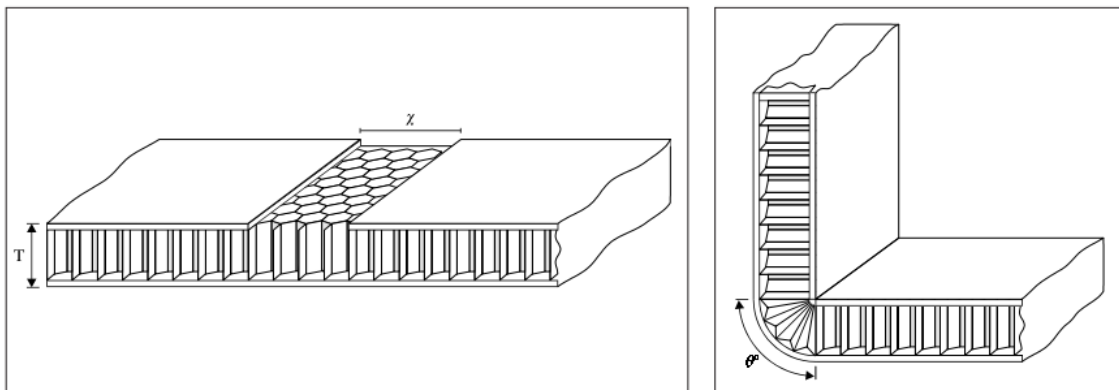
Táto metóda sa používa v prípadoch, keď potrebujeme dosiahnuť dobrú kvalitu povrchu a vysokú presnosť výrobku. Existuje niekoľko spôsobov dosiahnutia požadovanej teploty a tlaku. Najčastejšie používaným je vyhrievanie foriem s vonkajším mechanickým tlakom. Formovanie pri normálnej teplote, kde nie je použité vyhrievanie, sa používa v prípade, ak je konštrukcia príliš veľká alebo ak nemáme k dispozícii vyhrievacie zariadenie. [22, 23]



Obr. 19: Formovanie v uzatvorenej forme [22]

2.3 Ohýbanie voštinových štruktúr

Voštinové sendvičové panely môžu byť konštruované tak, aby vytvorili mechanicky pevné komponenty zložitých tvarov a ulov pomocou techniky "cut and fold", čo v preklade znamená "narezať a preložiť". Princíp tejto techniky, ako už napovedá sám názov, spočíva v odrezaní prúžku materiálu na jednej strane vonkajšej vrstvy voštinového panelu, nanosenie lepidla na otvorené jadro a následne prehnutie do požadovaného uhlu. Súčasť je zovretá, až kým kompletne prebehne vytvrdnutie lepidla. [6,23]



Obr. 20: Ohýbanie voštinového panelu technikou "cut and fold" [6]

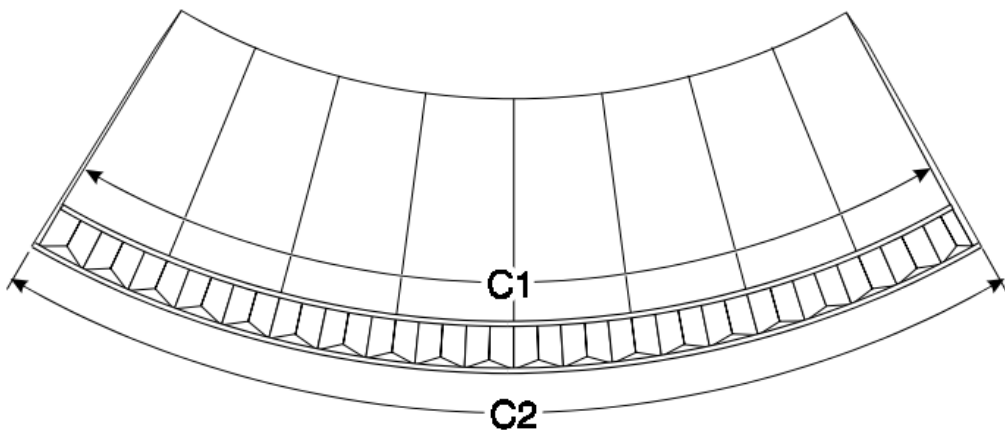
Šírka x odstraňovaného prúžku je určená požadovaným uhlom θ° a hrúbkou vrstvy T . Môže byť vypočítaná týmto spôsobom:

$$x = \frac{2 \cdot \pi \cdot T \cdot \theta^\circ}{360}$$

Pred začatím výroby ohýbaného voštinového panelu je vhodné vykonať skúšobný záhyb pre overenie výpočtu a posúdenie vhodnosti materiálu. Táto metóda vyžaduje minimálne používanie prípravkov a príslušenstva, je jednoduchá a je to hospodárne riešenie pre vytvorenie silnej jednotnej zložky. [6]

Zakrivenie voštinových panelov môže byť tiež dosiahnuté touto technikou. V tomto prípade sú však odrezané tenké, paralelné prúžky z jednej strany vonkajšej vrstvy. Počet drážok potrebných pre zakrivenie n môže byť určené týmto spôsobom:

$$n = \frac{\text{Dĺžka vonkajšej periférie (C2)} - \text{Dĺžka vnútornej periférie (C1)}}{\text{Hrúbka rezného nástroja}} \quad (1)$$



Obr. 21: Zakrivenie voštinového panelu technikou "cut and fold" [6]



Obr. 22: Príklad zakriveného sendviču s jadrom s polymérnej peny

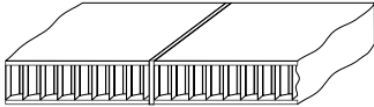
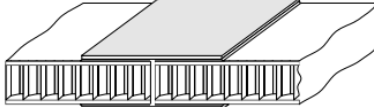
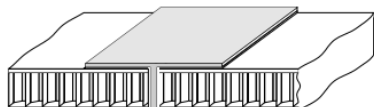

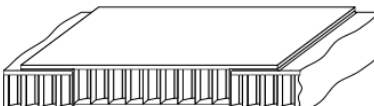
2.4 Spájanie voštinových štruktúr

2.4.1 Tvarové spájanie

Podľa tvaru spojenia, môžeme rozdeliť spoje sendvičových voštinových štruktúr do troch skupín, ktorých rôzne prevedenia sú zobrazené v nasledujúcich tabuľkách:

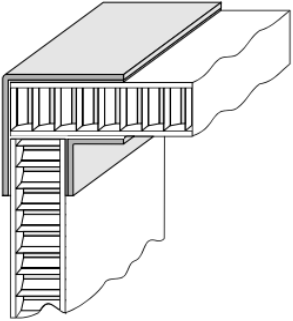
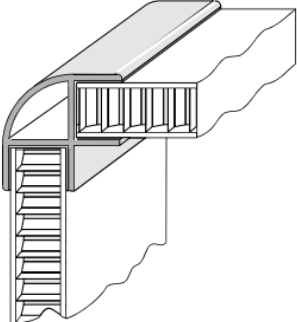
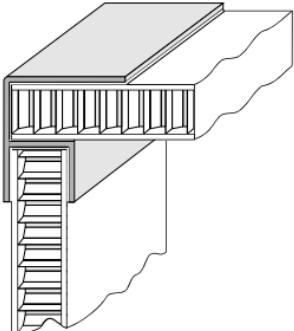
- **Ploché spájanie voštinových štruktúr**

Tab. 2: Typy plochých spojov voštinových štruktúr [21]

	<p>Čelá sendvičových panelov adhézne spojené. Nevhodné používať ako konštrukčné aplikácie.</p>
	<p>Čelá sendvičových panelov adhézne spojené, vystužené podpornými doskami.</p>
	<p>Styčné plochy spojené lepením pomocou dosky v tvare "H". Použitie v sériovej výrobe.</p>
	<p>Čelný lepený spoj, vystužený špeciálnym vnútorným blokom. Použitie v sériovej výrobe.</p>
	<p>Metóda zloženia panelových sekcií pri použití rovnakého panelového materiálu.</p>

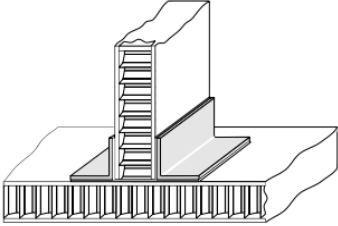
- **Rohové spájanie voštinových štruktúr**

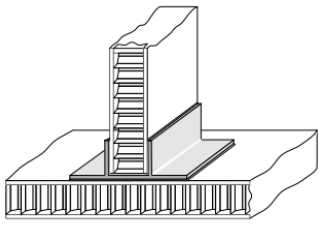
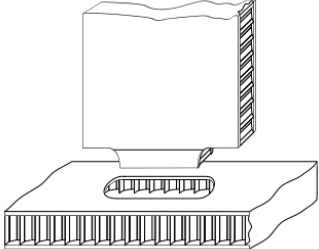
Tab. 3: Typy rohových spojení voštinových štruktúr [21]

	<p>Panely sú k sebe adhézne spojené a pre zvýšenie pevnosti spoja vystužené pomocou profilu v tvare L.</p>
	<p>Spojenie dvoch panelov pomocou špeciálneho profilu, pre vytvorenie zaoblených rohov v mieste spoja v hromadnej výrobe.</p>
	<p>Spojenie dvoch panelov pomocou špeciálneho profilu. Tieto spoje sa používajú pre vytvorenie pravouhlých spojení v hromadnej výrobe.</p>

- **Spojenie voštinových štruktúr v tvare T**

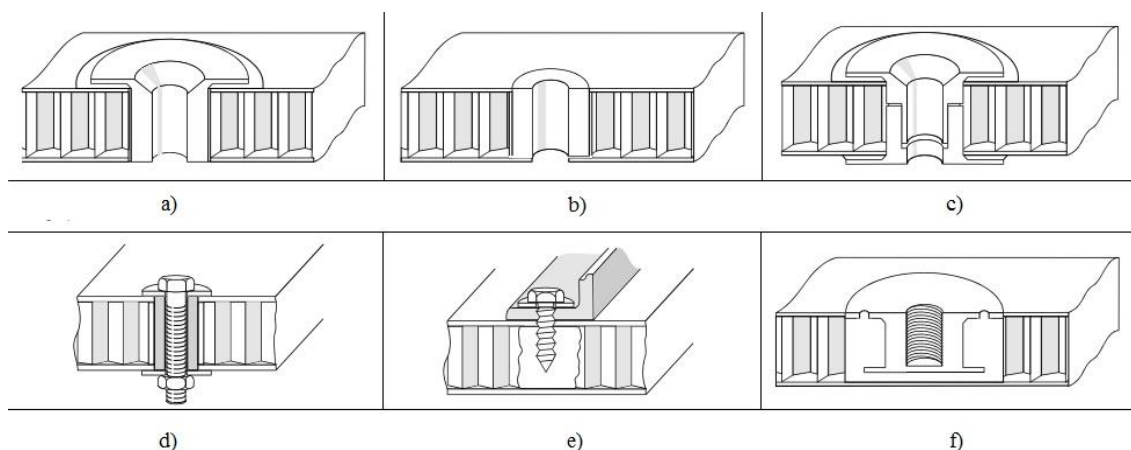
Tab. 4: Typy spojení voštinových štruktúr v tvare T [21]

	<p>Spoj dvoch voštinových panelov je adhézne spevnený pomocou dvoch profilov v tvare L.</p>
---	---

	<p>Spoj dvoch sendvičových voštinových panelov je upevnený a zlepený pomocou špeciálneho profilu. Používa sa prevažne v hromadnej výrobe.</p>
	<p>Kombinácia tvarového a lepeného spojenia voštinových panelov, kde výstupky na jednom paneli zapadnú do drážok vytvorených v druhom. Na výstupky a v drážkach je nanosená adhézna vrstva.</p>

2.4.2 Spojovacie prvky

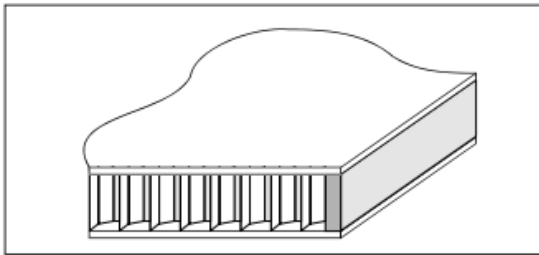
Upevňovacie prvky, alebo tiež inzerty, slúžia na pripojenie rôznych položiek k sendvičovému panelu. Existujú dva typy spojení: mechanické a zalisované. Zalisovaný typ spojenia býva častejšie používaný, ktorý má lepšiu konštrukčnú pevnosť vďaka tomu, že zalisovaná zmes spojuje upevňovací prvok s vonkajšou vrstvou a jadrom sendvičovej konštrukcie. Nevýhodou však je zvýšená hmotnosť panelu a časová náročnosť na inštaláciu v porovnaní s mechanickým typom spojenia.[21,22]



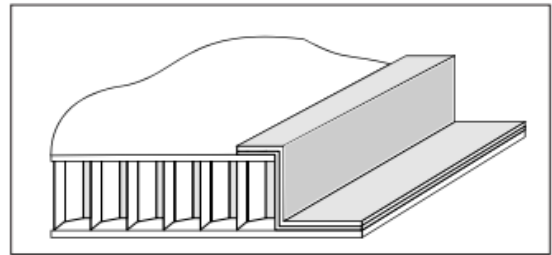
Obr. 23: Mechanické (a,b,c,d) a zalisované (e,f) spojovacie prvky: a) S ochranným krúžkom na jednej strane, b) Dištančná trubka, c) S ochranným krúžkom na oboch stranách, d) Na diaľku skrz panel pomocou skrutky a matice, e) Pomocou závrtnéj skrutky, f) Závitová vložka [21]

2.5 Uzatváracie prvky voštinových štruktúr

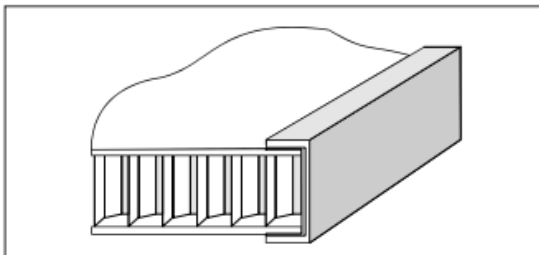
Uzatváracie prvky majú niekoľko dôležitých funkcií. Jednou z týchto funkcií je uzavrieť sendvičový panel a tým poskytnúť ochranu voštinového jadra a okrajov vonkajších vrstiev pred nárazovým poškodením alebo ochranu pred odlepením vonkajších vrstiev od jadra. Môžu taktiež slúžiť ako pevný člen, ktorým môže byť panel pripojený ku konštrukcii, alebo k inému panelu. Dôležitou funkciou však je použitie uzatváracích prvkov ako utesnenie okrajov vonkajších vrstiev od vody alebo vlhkosti. [22]



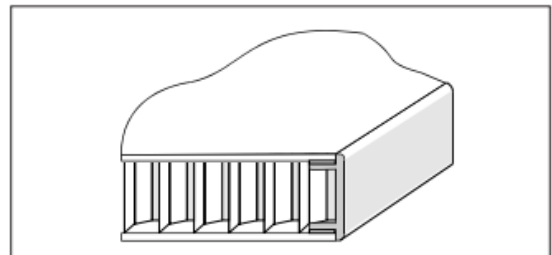
■ Hranová výplň



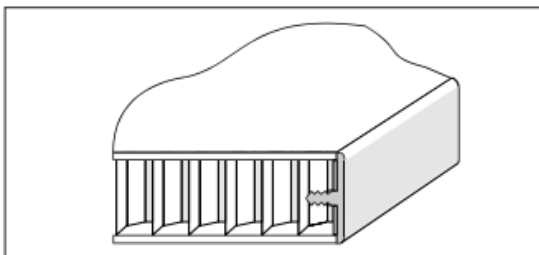
■ Prilepená časť tvaru Z



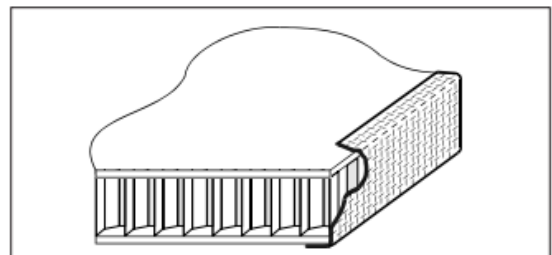
■ Prilepená časť tvaru U



■ Prilepená časť na uzatvorenie hrany. Vhodná pre hrubšie panely



■ Vtlačaná časť na uzatvorenie hrany. Vhodná pre tenšie panely.



■ Odolná samolepiaca páska

Obr. 24: Základné metódy uzatvárania hrán sendvičových panelov [21]

3 UPLATNENIE 3D VOŠTINOVÝCH ŠTRUKTÚR V PRIEMYSLE

Voštinové panely sú najčastejšie používané v štruktúrnych aplikáciách, a to z dôvodu vysokého pomeru medzi tuhosťou alebo pevnosťou a hmotnosťou konštrukcie. Sendvičové voštinové konštrukcie sú len ťažko prekonateľné v aplikáciách kde je vyžadovaná vysoká pevnosť a malá hmotnosť. Z toho dôvodu sa využívajú v rôznych priemysloch, ako napríklad dopravný, stavebný, letecký, športový, a iné. [25]

3.1 Dopravný priemysel

V dopravnom priemysle sa môžeme stretnúť so sendvičovými voštinovými panelmi v rôznych odvetviach dopravy, ako napríklad železničná, námorná alebo automobilová doprava. Medzi hlavné výhody, ktoré plynú z použitia týchto štruktúr v rôznych aplikáciách, patrí zvýšená bezpečnosť, lepší aerodynamický dizajn, úspora hmotnosti, prevádzková efektívnosť a vyššia pevnosť. [22,25]



Obr. 25: Strecha autobusu vyrobená z sendvičových voštinových panelov [4]

V železničnej doprave, presnejšie vo vlakových vagónoch, bývajú voštinové panely využívané ako podlahy, dvere, stropy ale aj bezpečnostné zariadenia ako sú absorbéry energie. V interiéroch vysokorýchlostných vlakov, metra, električiek alebo osobných vlakov sú často používané hliníkové voštinové panely, hlavne vďaka svojej nízkej hmotnosti, odolnosti voči stlačeniu, vysokej tuhosti, nehorľavosti a taktiež slúžia ako akustická izolácia. Používané bývajú najčastejšie ako toaletné moduly, prístupové rampy, podlahové krytiny alebo prípojky. [22]



Obr. 26: Využitie voštinových panelov vo vlakovom vagóne [4]

3.2 Lodná doprava

Hliníkové voštinové panely môžeme taktiež nájsť v lodnom priemysle a to napríklad vo výletných lodiach, veľkých jachtách, hliadkových člnoch alebo dokonca aj na vrtných plošinách. Najmä vo vysokorýchlostných plavidlách na prepravu cestujúcich sa využívajú tieto hliníkové voštiny, alebo iné materiály na báze rôznych hliníkových zliatin, a to hlavne z dôvodu zvýšenia rýchlosti. [25]



Obr. 27: Ukážka výroby člnu zo sendvičových voštinových štruktúr [4]

COREX voštiny sú tiež často používané v námorných aplikáciách, pretože ponúkajú vysoký pomer pevnosti k hmotnosti s pomerne nízkymi nákladmi. V použití s lepenými kompozitami alebo v sendvičových paneloch hmotnosť zostáva nízka, a preto sú obzvlášť vhodné pre výrobu interiérových panelov a priečok, nábytku, stropu a podlahových dosiek. [25]

3.3 Stavebný priemysel

Kompozitné materiály sú taktiež uprednostňované v stavebnom priemysle, vďaka svojim tepelno-izolačným vlastnostiam. Medzi dôležité vlastnosti opäť patrí vysoká pevnosť pri zachovaní nízkej hmotnosti, odolnosť voči korózii, nízka navlhavosť, odolnosť voči vonkajším vplyvom prostredia a UV žiareniu, dlhá životnosť a mnoho ďalších vlastností. Môžu byť využité pri stavbe obytných domov, napríklad ako rámy okien, ale aj pri stavbe priemyslových budov v podobe konštrukčných profilov, či lešenia. Okrem týchto aplikácií našli svoje uplatnenie pri výrobe rebríkov, schodišť alebo ako stavebné prvky mostných systémov apod. [25]



Obr. 28: Rôzne aplikácie v stavebnom priemysle [25]

3.4 Letectvo a kozmonautika

Letectvo a kozmonautika patria medzi prvé obory, ktoré začali vo väčšej miere využívať kompozitné materiály. Ťažké kovové diely sa postupne začali nahradzovať dielmi s nízkou hmotnosťou pre šetrenie paliva, predĺženie vzdialeností letu apod. Trupy lietadiel Boeing 787 a Airbus A350XWB tvoria z viac ako 50% kompozitné materiály.

Okrem trupov lietadiel sú tieto materiály využité na výrobu vrtule, krídiel, tlakových nádob na palivo, v radarovej technike a tryskách rakiet. Použité sú taktiež v interiéroch lietadiel v podobe sedadiel, palubných mechanizmov alebo poťahov a podláh. [24,25]



Obr. 29: Dopravné lietadlá Airbus A350 a Boeing 787 [24]

3.5 Šport a voľný čas

Kompozitné materiály majú tiež široké využitie v športovom priemysle. V tomto odvetví sa rovnako ako v mnohých predošlých najviac zúročuje vysoká pevnosť, pružnosť a nízka hmotnosť. Kompozity sú ideálnym materiálom pre výrobu športových pomôcok ako pre letné športy (vodné lyže, bicykle, tenisové rakety, golfové vozíky a pátky, rybárske prúty, surfy), tak pre zimné športy (snowboardy, lyže, boby, hokejky). [24,25]



Obr. 30: Lyžiarska výstroj z kompozitných materiálov [25]

II. PRAKTICKÁ ČASŤ

4 CIELE BAKALÁRSKEJ PRÁCE

Cieľom tejto bakalárskej práce je navrhnúť materiálovú skladbu, dizajn a technologické postupy výroby propagačného materiálu. Výrobok je určený k rozšíreniu informácií o študijnom obore. Finálna podoba výrobku môže byť uchytená na špeciálne upravený automobil, prípadne na vozík automobilu.

Jednotlivé ciele môžu byť formulované:

1. Návrh aplikácie výrobku so sendvičovou štruktúrou, zameraný na propagáciu študijného oboru.
2. Dizajn výrobku.
3. Návrh materiálového zloženia, vrátane špecifikácie materiálov a ich vzájomné usporiadanie.
4. Technologické odporúčenia jednotlivých výrobných krokov.
5. Výroba prototypu súčasti s ohľadom na testovanie príľnavosti kompozitného materiálu a voštinového jadra.
6. Záver.

5 NÁVRH APLIKÁCIE A DIZAJN VÝROBKU

5.1 Aplikácia výrobku

K reklamným alebo propagačným materiálom nepatria iba papiere a perá, ale môže sa jednať taktiež o nápaditejšie veci. Nechali sme sa inšpirovať inými komerčnými výrobkami a tak našim cieľom bude výroba propagačného materiálu v tvare plechovky, vyrobeného zo sendvičových voštinových štruktúr. Podobizeň plechovky môže byť použitá k rozšíreniu informácii o študijnom obore na univerzitných veľtrhoch, dňoch otvorených dverí alebo uchytená na automobil, prípadne na vozík, pre mestskú propagáciu.



Obr. 31: Plechovka uchytená k automobilu [26]

5.2 Dizajn výrobku

Ako predloha pre požadovaný dizajn slúžil komerčný výrobok od firmy RedBull, z ktorého boli prevzaté rozmery pre návrh plechovky. Model s danými hodnotami bol navrhnutý v softvéri Catia V5. Pre výslednú veľkosť výrobku boli tieto rozmery 15-násobne zväčšené. Ďalším krokom návrhu bola grafická stránka. Použitím loga a farieb fakulty technologickkej, bola navrhnutá potlač obvodu plechovky v softvéri Zoner Photo Studio 17.

K doplneniu autenticity výrobku, boli navrhnuté skratky fakulty a univerzity na otváraciej časti.



Obr. 32: Návrh dizajnu plechovky s detailom na otváraciu časť

6 NÁVRH MATERIÁLOVÉHO ZLOŽENIA A TECHNOLOGIE VÝROBY JEDNOLIVÝCH ČASTÍ

6.1 Otváracia časť

Pre výrobu otváracej časti bol vybraný epoxidový prepreg M49/39%/600T2X2/CS-12K vystužený tkaninou z uhlíkových vlákien. Prepreg obsahuje 39% epoxidovej živice a 12000 vlákien v jednom rovingu. Nominálna šírka vrstvy je 0,659 mm, čo znamená, že pre dosiahnutie 6 mm šírky výrobku bude potrebných 9 vrstiev tohto prepregu. Teplota vytvrdzovania sa pohybuje v rozmedzí od 85 do 140 °C. [Príloha P I]

Tab. 5: Doba vytvrdzovania vzhľadom na teplotu

Teplota vytvrdzovania	85 °C	90 °C	100 °C	120 °C	140 °C
Čas	720 min	360 min	120 min	60 min	30 min

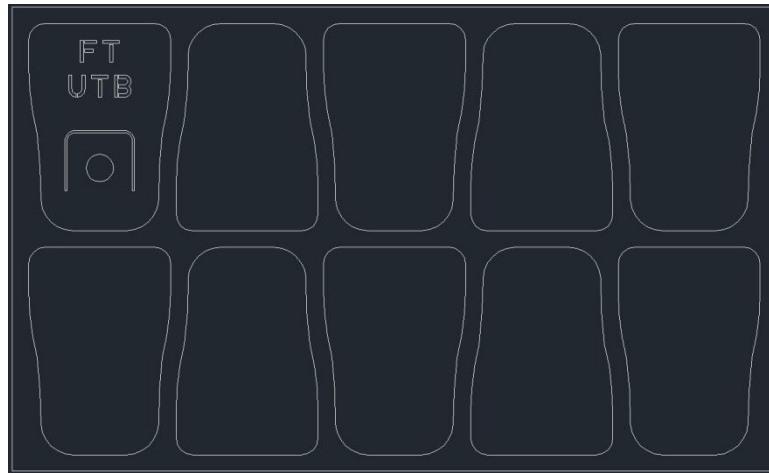
Vybraná epoxidová matrica má dobré mechanické vlastnosti, vysokú odolnosť proti nárazu a vykazuje nízku pórovitosť pri výrobe ručným kladením prepregov s vytvrdzovaním v peci. Z tohto dôvodu bola práve táto technológia výroby navrhnutá, ako optimálna.

Tab. 6: Mechanické vlastnosti prepregu

Mechanické vlastnosti	Hodnoty
Pevnosť v ťahu	840 MPa
Pevnosť v ohybe	780 MPa
Youngov modul (modul pružnosti v ťahu)	63 GPa
Modul pružnosti v ohybe	55 GPa

Pre vyrobenie 10 kusov otváracej časti je potrebné vyrobiť dosku prepregu s určitými rozmermi, z ktorého budú vyrezané. Optimálnou voľbou technológie je v tomto prípade rezanie vodným lúčom a to hlavne vďaka tomu, že nevytvára tepelne ovplyvnenú zónu materiálu, takže neovplyvňuje ani vnútornú štruktúru a súvisiace vlastnosti. Šírka rezu sa pohybuje v intervale medzi 0,1 až 1,5 mm, takže medzera medzi jednotlivými časťami môže mať len pár milimetrov, čo umožní ušetrenie materiálu. [27]

Navrhované rozmery dosky prepregu sú 1400 x 850 mm. Usporiadanie jednotlivých častí bolo zobrazené pomocou softvéru AutoCAD 2011.

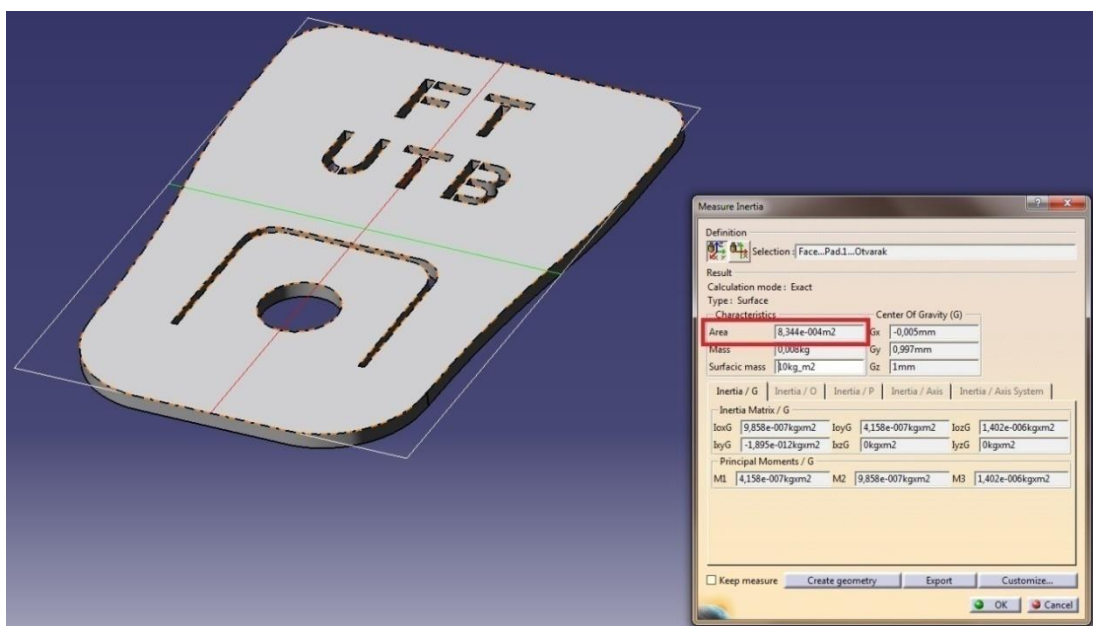


Obr. 33: Navrhované uloženie otváracích častí na doske prepregu

Rozmery dosky boli navrhované s ohľadom na odpad materiálu po vyrezaní všetkých kusov otváraciej časti. Percento využitia materiálu bolo vypočítané pomocou vzťahu (2).

$$k_M = \frac{S_V \cdot n}{S_P} \cdot 100 \quad (2)$$

- Kde: k_M [%] - koeficient využitia materiálu
 S_V [m²] - plocha vyrezanej otváraciej časti
 S_P [m²] - plocha dosky
 P_V [-] - počet vyrezávaných kusov



Obr. 34: Určenie povrchu otváraciej časti pomocou softvéru Catia V5

Plocha vyrezanej otváracej časti $S_V = 0,08344 \text{ m}^2$ bola určená pomocou programu Catia V5, kde bol vymodelovaný prototyp.

$$k_M = \frac{S_V \cdot n}{S_p} \cdot 100 = \frac{0,08344 \cdot 10}{1,4 \cdot 0,85} \cdot 100 = 70\% \quad (2)$$

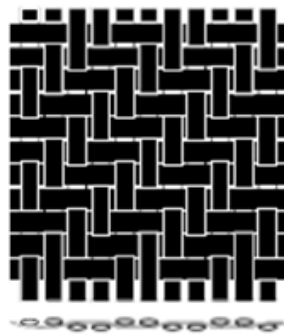
Z dosky prepregu s navrhnutými rozmermi sa využije približne 70 % materiálu. Výroba by teda mohla byť považovaná za ekonomicky nenáročnú.

6.2 Obvodová časť

Obvod výrobku z plechovky sa skladá z dvoch symetrických častí spojených dohromady. Materiálové zloženie a technológia výroby bude pre obe časti rovnaká, preto bude návrh zameraný len na jednu z týchto častí.

6.2.1 Materiálové zloženie

Materiál použitý na vonkajšie vrstvy sendvičovej konštrukcie bude podobný ako tomu bolo pri otváracej časti. V tomto prípade však bude vhodnejšie použiť epoxidový prepreg M49/45%/245T2/AS4-3K vystužený uhlíkovou tkaninou vo forme rovingových zväzkov. Tento prepreg má 3000 vlákien v jednom rovingu a obsahuje 42% živice, vďaka čomu dosahuje lepšiu lepiivosť a je vhodnejší pre výrobu sendvičového panelu lisovaním. Nominálna šírka prepregu je 0,286 mm, čo znamená, že pre výrobu 2 mm hrubého prepregu bude potrebných 7 vrstiev. [Príloha P I]



Obr. 35: Tkanina vo forme rovingových zväzkov [4]

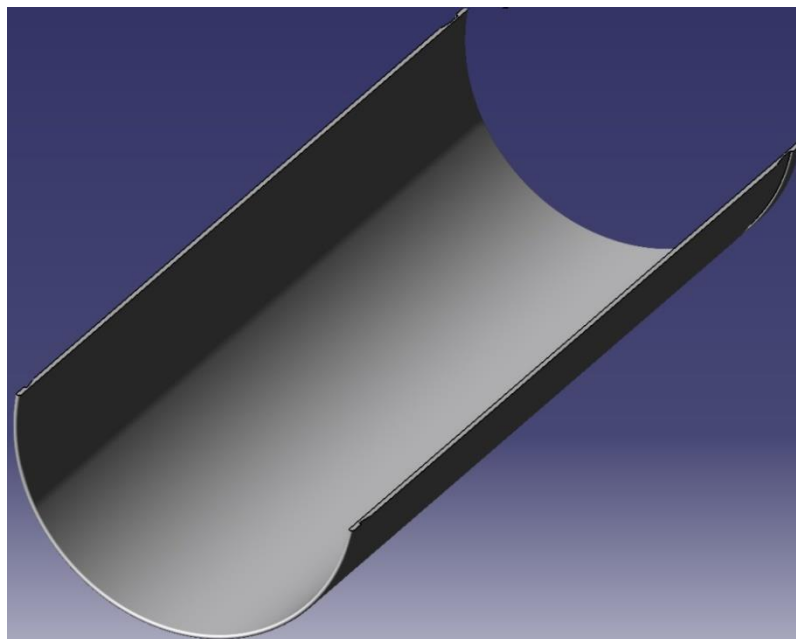
Jadro sendvičovej konštrukcie musí byť ľahké a zároveň pevné. Tieto vlastnosti splňujú jadrá z aramidovej voštiny s hexagonálnym tvarom buniek HRH-10 - 3,2 - 48. Z označenia tejto voštiny vyplýva, že šírka jednej bunky je 3,2 mm a nominálna hustota je 48 kg/m^3 . Hrúbka, v ktorej sú tieto jadrá vyrábané, sa pohybuje od 3 do 900 mm. Navrhnutá hrúbka voštiny 6 mm sa nachádza v tomto intervale, preto môže byť použitá. [Príloha P II]

Tab. 7: *Mechanické vlastnosti aramidovej voštiny HRH-10 - 3,2 - 48*

Mechanické vlastnosti	Hodnoty
Pevnosť v šmyku (smer L)	1,21 MPa
Pevnosť v šmyku (smer W)	0,34 MPa
Modul pružnosti v šmyku (smer L)	41 MPa
Modul pružnosti v šmyku (smer W)	24 MPa

6.2.2 Technológia výroby

Optimálna technológia výroby obvodových častí je vyhrievaným lisovaním (viz. podkapitola 2.2.2). Ďalšie technológia, ktorá môže byť použitá pre výrobu je ručné kladenie prepregov s vytvrdzovaním v peci, resp. v autokláve. Použitím zvoleného epoxidového prepregu kombinovaného s touto technológiou výroby sendvičových konštrukcií, nie je potrebné nanášať adhéznú vrstvu medzi jadro a vonkajšie vrstvy.



Obr. 36: *Návrh obvodovej časti v softwéri Catia V5*

Z návrhu na obrázku je zrejmé, že sendvičový panel musí byť zakrivený. Najrýchlejším a najekonomickejším spôsobom ako dosiahnuť požadovaného zakrivenia sendvičového panelu je pomocou technológie "cut and fold" (viz podkapitola 2.3). Počet drážok, potrebných pre výrobu zakrivenia požadovaných rozmerov, bude určený pomocou vzťahu (1).

Pre použitie daného vzťahu však musia byť vypočítané požadované dĺžky C_1 a C_2 . Vnútorý priemer obvodovej časti $d_1 = 740 \text{ mm}$, vonkajší priemer $d_2 = 760 \text{ mm}$.

$$C_1 = \frac{o}{2} = \frac{2 \cdot \pi \cdot \frac{d_1}{2}}{2} = \pi \cdot \frac{d_1}{2} = \pi \cdot \frac{740}{2} = 1162,4 \text{ mm} \quad (1.1)$$

$$C_2 = \frac{o}{2} = \frac{2 \cdot \pi \cdot \frac{d_2}{2}}{2} = \pi \cdot \frac{d_2}{2} = \pi \cdot \frac{760}{2} = 1193,8 \text{ mm} \quad (1.2)$$

Drážky budú vyrobené pomocou uhlovej brúsky s univerzálnym diamantovým rezným kotúčom Bosch Turbo 115 mm, so šírkou kotúča 2 mm.

$$n = \frac{C_2 - C_1}{h_r} = \frac{1193,8 - 1162,4}{2} = 15,7 \doteq 16 \text{ drážok} \quad (1)$$

Kde: C_1 - Dĺžka vnútornej periférie [mm]

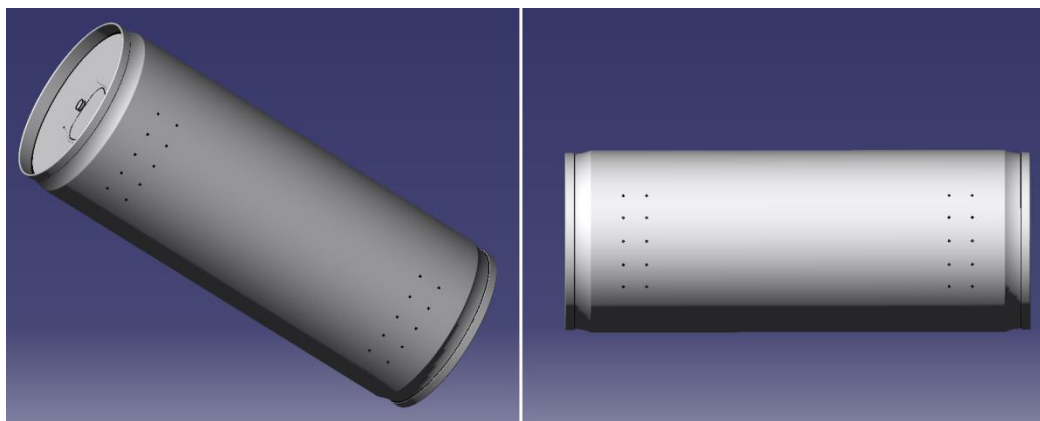
C_2 - Dĺžka vonkajšej periférie [mm]

h_r - Hrúbka rezného nástroja [mm]

n - Počet drážok [-]

o - Obvod [mm]

Uchytenie obvodových častí, a tým aj celého výsledného výrobku, k rôznym stojanom bude uskutočnené pomocou 20 závitových vložiek (viz. podkapitola 2.4.2). Navrhované usporiadanie závitov je zobrazené v nasledujúcom obrázku.



Obr. 37: Návrh uchytenia obvodových častí k stojanu

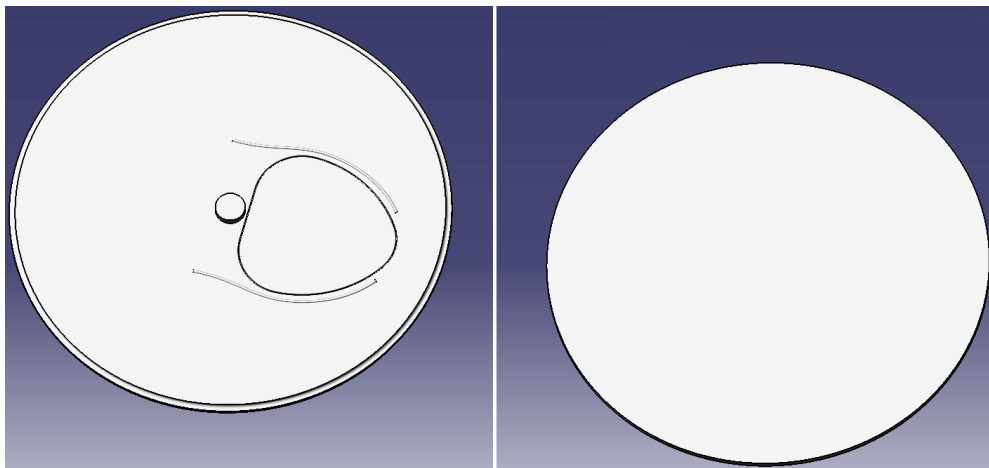
Pri výrobe sendvičovej konštrukcie budú v určitej vzdialenosti od kraja a v určitých rozstupoch do voštiny vyrezané diery, a následne vložené zabrúsené kartitové dosky o rozmeroch 30 x 30 x 6 mm, upevnené pomocou tmelu.

Po dokončení výroby budú do stredu uhlopriečok týchto dosiek vyvŕtané diery a do nich zavŕtané závitové vložky so závitom M10. Pre upevnenie sendvičovej konštrukcie k stojanu budú potrebné skrutky M10 podľa normy ČSN 02 1101.

Aby bol vzhľad vyrobenej sendvičovej konštrukcie čo najlepší, a pre ochranu pred odlepením vonkajších vrstiev od jadra, bude potrebné použiť niektorý z ukončovacích prvkov. Pre danú aplikáciu je najlepším riešením použitie vtláčenej hrany (viz. podkapitola 2.5). Uzatváranie pomocou vtláčenej hrany sa používa pre tenké prvky, čo je ideálne vzhľadom na šírku sendviču 10 mm.

6.3 Vrchná a spodná časť

Zvolený materiál pre výrobu vrchnej a spodnej časti bude rovnaký, aký bol navrhnutý pre výrobu obvodových častí. Na vonkajšie vrstvy bude použitý epoxidový prepreg M49/42%/245T2/ASK-3K a jadro bude tvoriť aramidová voština s hexagonálnym tvarom buniek HRH-10 o hrúbke 6 mm. Na jednu vonkajšiu vrstvu bude potrebné použiť 7 vrstiev tohto prepregu pre dosiahnutie hrúbky 2 mm.



Obr. 38: Návrh vrchnej a spodnej časti v softwére Catia V5

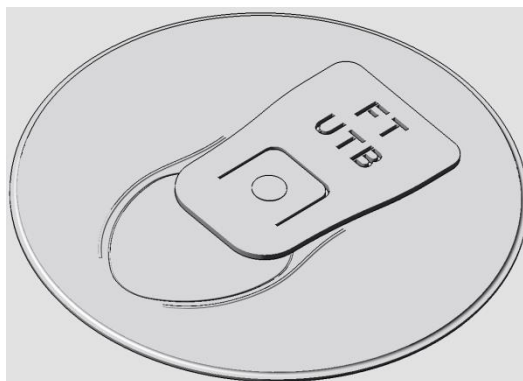
Obe časti budú vyrábané rovnakou technológiou, a to pomocou ručného kladenia prepregov s vytvrdzovaním v peci. (viz. podkapitola 2.2.3). Vzhľadom na výstupky a prehĺbenia na povrchu vrchnej časti je navrhnutá technológia najvhodnejšia pre jej výrobu.

Uzatvorenie sendvičovej konštrukcie bude uskutočnené pomocou hranovej výplne (viz. podkapitola 2.5). Tento typ uzatváracieho prvku bol zvolený, pretože po vložení výplne bude vytvorená rovná plocha, na ktorú bude jednoduchšie prichytiť suchý zips, ktorý bude spájať tieto časti s obvodovými. Spojovaniu jednotlivých častí k vytvoreniu celku, bude venovaná nasledujúca kapitola.

7 NÁVRH SPOJENIA JEDNOTLIVÝCH ČASTÍ

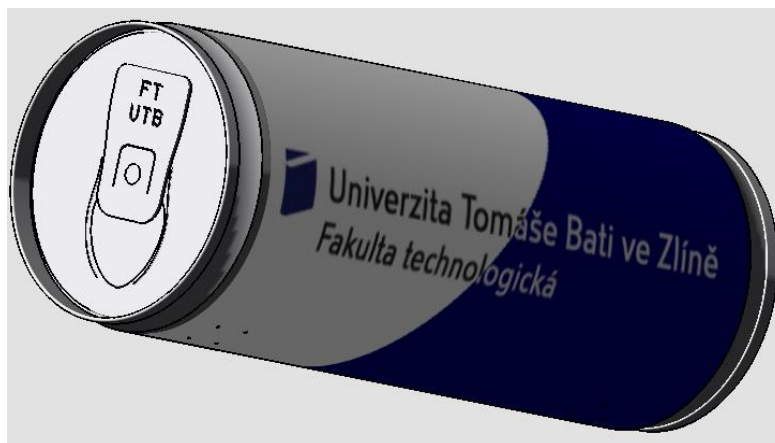
K navrhovanému spojeniu všetkých častí sendvičovej konštrukcie budú použité celkovo 3 metódy spájania. Obvodové časti budú spojené čelne, preto bude použitá metóda čelného spojenia s použitím špeciálneho vnútorného bloku ako výstuhy (viz. podkapitola 2.4.1). Použitím týchto výstuh sa zlepši pevnosť celého spoja a to hlavne vďaka tomu, že pôsobiace zaťaženie bude prenesené na tieto výstuhy. K spevneniu spoja bude použité 2-zložkové viacúčelové metakrylátové lepidlo Plexus MA310, ktoré je vďaka svojej vysokej pevnosti a húževnatosti ideálne pre použitie v danej aplikácii.

Spojenie otváracej a vrchnej časti sendvičovej konštrukcie bude uskutočnené takisto pomocou tohto lepidla. V tomto prípade však otváracia časť svojim tvarom zapadne do výstupku vytvoreného na vrchnej časti.



Obr. 39: Spojenie vrchnej a otváracej časti

Po spojení obvodových častí bude z oboch strán po vnútornom obvode nalepený suchý zips SJ3550. Druhá časť suchého zipsu bude prilepená na obvod vrchnej a spodnej časti konštrukcie. Po tomto spojení bude dosiahnutý výsledný tvar výrobku.



Obr. 40: Výsledný tvar výrobku

8 VÝROBA A TESTOVANIE SKÚŠOBNÝCH VZORIEK

8.1 Použité materiály

8.1.1 Voštinové jadro

Ako materiál jadra bola použitá voština s označením COREMASTER C2, vyrobená z listov papiera Nomex® T722 spojených a pokrytých pomocou fenolickej živice. Tvar buniek tejto voštiny je hexagonálny a šírka jednej bunky je 4,8 mm. Medzi výhody patrí napríklad vysoká tepelná odolnosť alebo dobré mechanické vlastnosti vzhľadom na pomer pevnosti a hmotnosti. K výrobe skúšobných vzoriek bola použitá voština o šírke 5 mm a s hustotou 48 kg/m³. Mechanické vlastnosti sú vypísané v nasledujúcej tabuľke (Tab. 7). [Príloha P III]

Tab. 8: Mechanické vlastnosti voštiny COREMASTER C2

Typ voštiny	Pevnosť v tlaku [MPa]		Pevnosť v šmyku [MPa]		Modul pružnosti v šmyku [MPa]	
	Prázdne	Stabilizované	L	W	L	W
C2 - 4,8 - 48	1,9	2,0	1,12	0,54	37,0	23,0

8.1.2 Epoxidový prepreg

Pre vonkajšie vrstvy sendviču bol použitý epoxidový prepreg M49/42%/245T2/AS4-3K. Doba vytvrdzovania vzhľadom na teplotu toto prepregu je zobrazená vyššie v (Tab. 4). Vďaka svojej odolnosti voči nárazom sú tieto prepregy vhodné pre výrobu dielov do závodných vozidiel. Medzi ďalšie výhodné vlastnosti patrí stabilita pod UV žiarením a dlhá životnosť. Prepreg je taktiež samolepiaci na voštiny. Mechanické vlastnosti sú uvedené v nasledujúcej tabuľke (Tab. 8). [Príloha P I]

Tab. 9: Vlastnosti epoxidového prepregu M49/42%/245T2/AS4-3K

Mechanické vlastnosti	Hodnoty
Pevnosť v ťahu	980 MPa
Pevnosť v ohybe	960 MPa
Youngov modul (modul pružnosti v ťahu)	66 GPa
Modul pružnosti v ohybe	60 GPa

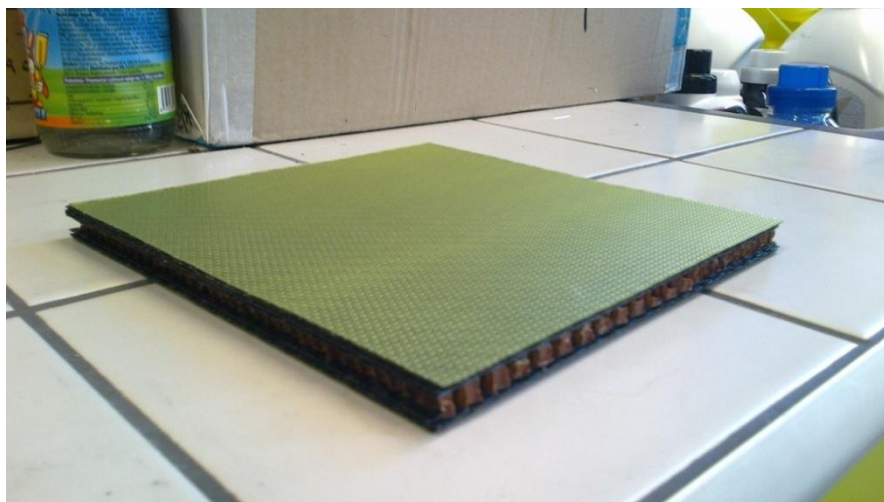
8.2 Postup výroby

Pre všetky skúšobné vzorky bola zvolená technológia výroby vyhrievaným lisovaním (viz. podkapitola 2.2.2). Pred začatím lisovania bola ručne nastrihaná voština spolu s epoxidovým prepregom na požadované rozmery.



Obr. 41: Nastrihané voštiny a prepregy na požadované rozmery

Pre výrobu skúšobných vzoriek bolo potrebné vyrobiť 4 sendvičové panely s rozmermi 160 x 160 mm a s rozličnou šírkou vonkajších vrstiev. V 2 paneloch boli použité 3 vrstvy epoxidového prepregu a v ďalších dvoch bolo týchto vrstiev použitých 7. Medzi vonkajšie vrstvy bolo vložené voštinové jadro.



Obr. 42: Sendvičová doska nachystaná na lisovanie

Lisovanie bolo prevedené v laboratórnom vulkanizačnom lise (Obr. 43) zloženého z izolačných a temperovaných dosiek. K vyvolaniu potrebného lisovacieho tlaku a stlačeniu jednotlivých vrstiev slúži hydraulický zdvihák. Pred začatím lisovania bol na podkladové dosky nanesený separačný vosk a lis bol vytemperovaný na teplotu 130 °C. Technické údaje vulkanizačného lisu sú uvedené v nasledujúcej tabuľke (Tab. 10).

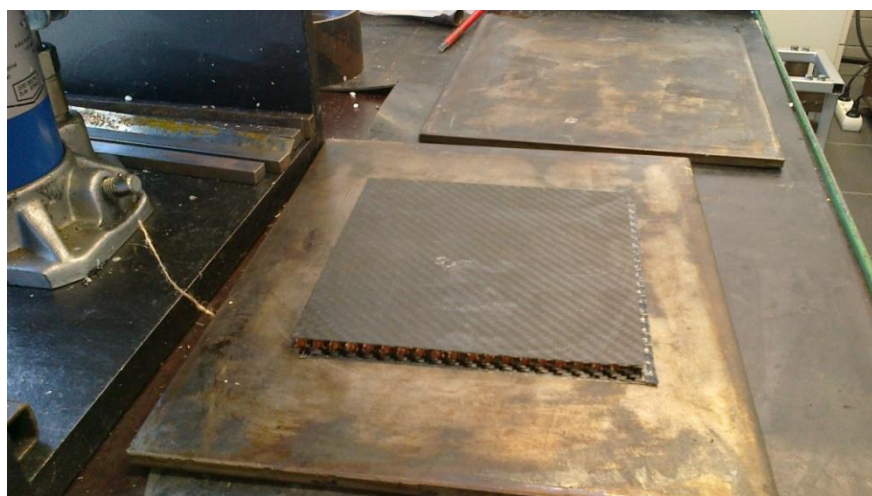


Obr. 43: Laboratorný vulkanizačný lis

Tab. 10: Technické údaje vulkanizačného lisu

Rozmery dosiek	250 x 250 mm
Maximálna teplota	200 °C
Zvieracia sila	5 t

Nachystaný sendvič bol položený na podkladové dosky, na ktoré bola nanosená separačná vrstva, a vložený do lisu na 15 min. Po 15 minútach bol hotový sendvičový panel vytiahnutý z lisu. Rovnaký postup bol opakovaný aj pri výrobe všetkých 4 panelov.



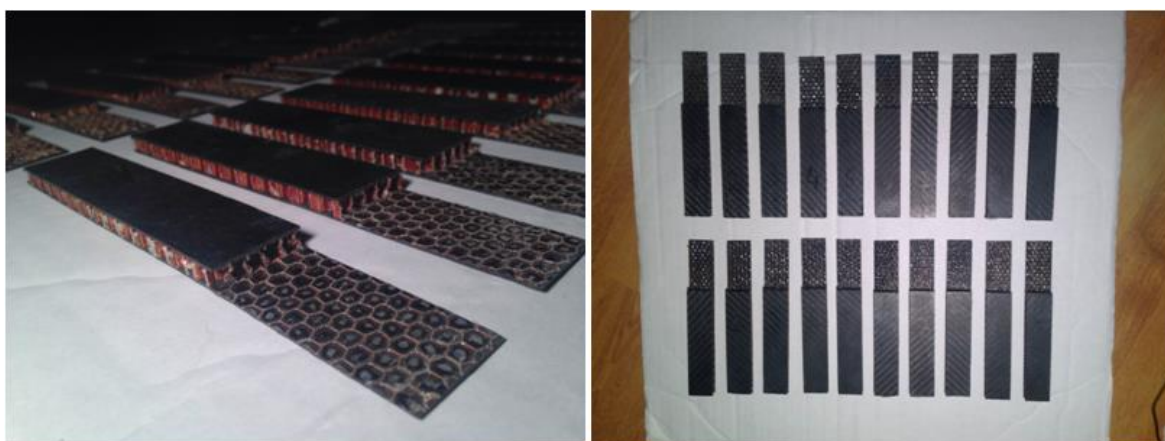
Obr. 44: Hotový výrobok po vytiahnutí z lisu

Po dokončení výroby sendvičových panelov nasledovalo ich rezanie. Zvolené rozmery všetkých skúšobných vzoriek boli 155 x 25 mm. Pred začatím rezania boli rozmery na povrch telesa orýsované. K rezaniu bola použitá stolná píla Scheppach HS 80. Z každého z vyrobených panelov bolo narezaných 5 vzoriek s požadovanou šírkou vrstvy.



Obr. 45: Stolná píla Scheppach HS 80

Aby mohli byť narezané skúšobné vzorky použité na testovanie odlupovania voštiny od vonkajších vrstiev, musela byť voština s jednou stranou vonkajšej vrstvy odstránená do určitej vzdialenosti. Jedna strana vonkajšej vrstvy a jadro boli do zvolenej vzdialenosti 50 mm odrezané pomocou ručnej píly. Konečný tvar a počet skúšobných vzoriek pripravených na testovanie je zobrazený na obrázku nižšie (Obr. 46).



Obr. 46: Skúšobné vzorky pripravené na testovanie

8.3 Testovanie skúšobných vzoriek

Testovanie skúšobných telies na odlupovanie bolo prevedené v laboratórnom centre fakulty technologickej v Zlíne. K testovaniu bol použitý univerzálny skúšobný stroj ZWICK 1456. Vyhodnotenie nameraných dát prebiehalo v softvéri TestXpert v2.1, ktorý sa nachádza v počítači pripojenom ku stroju.



Obr. 47: Skúšobný stroj ZWICK 1456

Testovanie skúšobných vzoriek na odlupovanie prebiehalo podľa normy ISO 4578. Do stroja boli upevnené dve podpery s rozpätím 65 mm, do ktorých bolo vložené testované teleso. Na odokrytú časť vonkajšej vrstvy pôsobil tŕň konštantnou rýchlosťou 15 mm/min. Všetkých 20 vzoriek bolo testovaných rovnakým spôsobom pri izbovej teplote. Meraním bola zisťovaná maximálna sila potrebná k odlepeniu vonkajšej vrstvy od jadra sendviču.



Obr. 48: Skúšobné teleso vložené v podperách

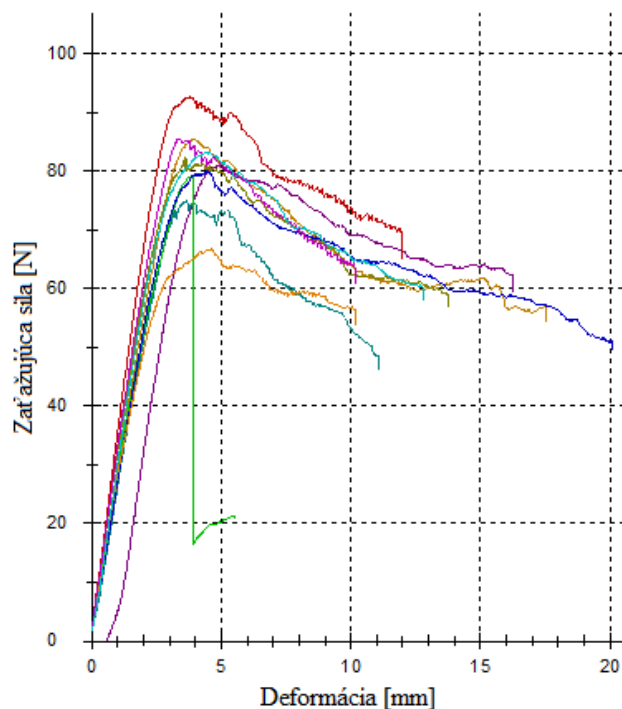
8.3.1 Namerané hodnoty

V nasledujúcich tabuľkách sú zapísané namerané hodnoty z 10 vzoriek s vonkajšou vrstvou zloženou z 3 vrstiev prepregu (Tab. 11) a zo zvyšných 10 s vonkajšou vrstvou zo 7 prepregov (Tab. 12). Z uvedených grafov je možné pozorovať závislosť zaťažujúcej sily na deformácii jednotlivých vzoriek.

- Testovanie vzoriek s vonkajšou vrstvou zloženou z 3 prepregov

Tab. 11: Namerané hodnoty maximálnej sily vzoriek č. 1

n	$F_{\max.}$ [N]
1	85,5
2	80,9
3	75
4	82,2
5	92,6
6	78,9
7	80
8	66,7
9	85,5
10	83,2
\bar{x}	81,05
s	6,89
v	4,89

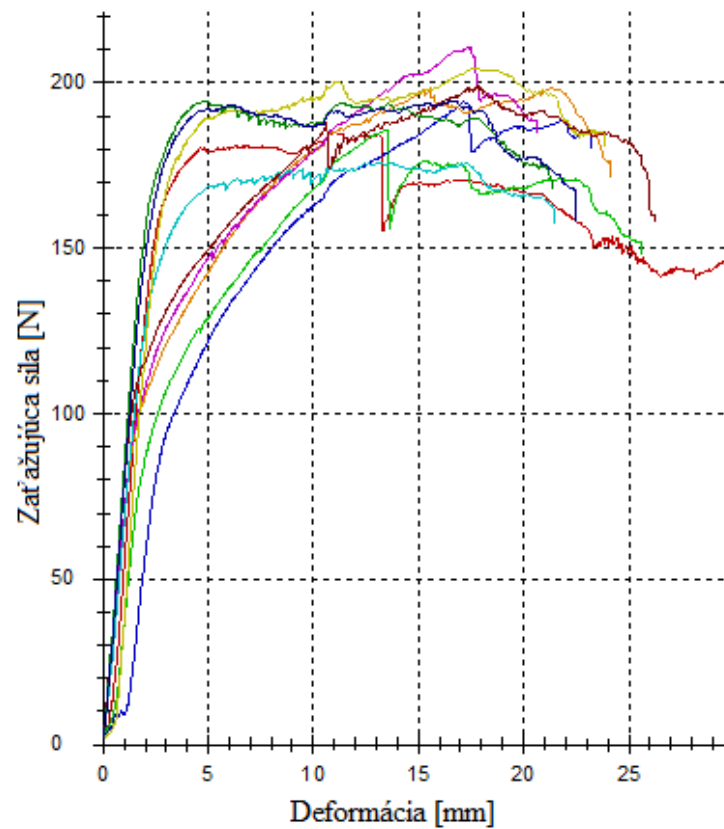


Obr. 49: Graf závislosti zaťažujúcej sily na deformácii vzoriek č. 1

- Testovanie vzoriek s vonkajšou vrstvou zloženou zo 7 prepregov

Tab. 12: Namerané hodnoty maximálnej sily vzoriek č. 2

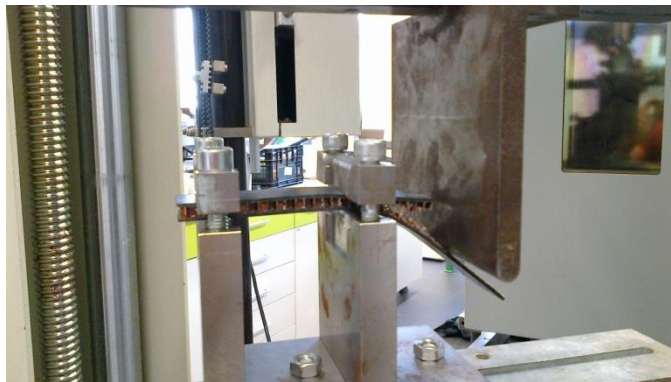
n	$F_{\max.}$ [N]
1	185
2	186
3	194
4	198
5	211
6	176
7	205
8	199
9	195
10	195
\bar{x}	194,4
s	10,2
v	5,19



Obr. 50: Graf závislosti zaťažujúcej sily na deformácii vzoriek č. 2

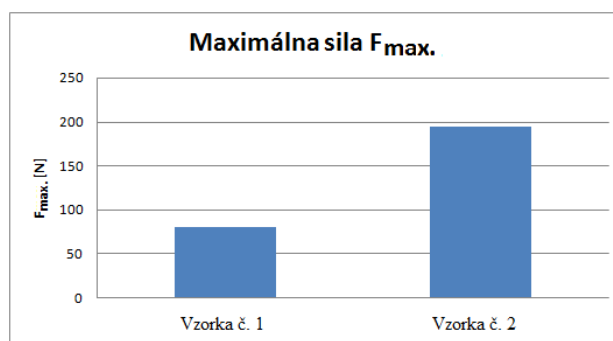
8.4 Diskusia výsledkov

Pri testovaní príľnavosti kompozitného materiálu a voštinového jadra bola meraná maximálna zaťažovacia sila, pri ktorej sa tieto dve vrstvy začnú od seba odliepať. V tabuľkách 11 a 12 sú zapísané namerané hodnoty síl, ako aj vypočítané príslušné parametre. Pri vzorkách, kde boli použité na jednu vonkajšiu vrstvu 3 prepregy bola nameraná priemerná maximálna sila 81 N a vo vzorkách, kde bolo použitých 7 prepregov to je 194 N. Z týchto hodnôt je zrejmé, že pre daný návrh materiálového zloženia bude lepšie použiť 7 epoxidových prepregov na jednu vonkajšiu vrstvu. V týchto sendvičových paneloch bola príľnavosť jadra a vonkajšej vrstvy tak silná, že pri sile 194 N sa miesto odlupovania začalo voštinové jadro trhať.



Obr. 51: Roztrhnutá voština počas zaťažovania vzorku č. 2

V nasledujúcom obrázku je zobrazené porovnanie priemerných maximálnych síl jednotlivých vzoriek.



Obr. 52: Porovnanie priemerných maximálnych síl jednotlivých vzoriek

Z celkových výsledkov môžeme povedať, že čím viac prepregov je použitých na vonkajšie vrstvy, tým je príľnavosť medzi týmito vrstvami a jadrom silnejšia. Taktiež môžeme povedať, že ak je použitá hrubšia vonkajšia vrstva pri namáhaní na odlup je sendvičový panel len tak silný, ako jeho voštinové jadro.

ZÁVER

Táto bakalárska práca sa zaoberá návrhom vhodného materiálového zloženia a technológie výroby sendvičovej voštinovej konštrukcie, so zameraním na propagáciu.

V teoretickej časti je zo začiatku popísané základné rozdelenie a vlastnosti sendvičových štruktúr. V ďalšej časti už je práca zameraná na výrobu voštinových jadier a sendvičových panelov s voštinovým jadrom. Na konci teoretickej časti sú popísané ich aplikácie v rôznych odvetviach priemyslu.

V praktickej časti bolo najprv potrebné navrhnuť dizajn tvaru a vonkajšieho vzhľadu. Tvarový návrh bol vymodelovaný pomocou softvéru Catia V5 a finálny vzhľad výrobku bol navrhnutý v programe Zoner Photo Studio 17. Ďalej bolo navrhnuté materiálové zloženie a technológia výroby jednotlivých častí. Optimálna technológia výroby všetkých častí je ručným kladením prepregov s vytvrdzovaním v peci. Konkrétne materiálové zloženie bolo uvedené v jednotlivých podkapitolách. Ako posledné bolo potrebné vyrobiť skúšobné vzorky, ktoré boli následne testované na odlupovanie.

Z nameraných výsledkov vyplýva, že pri použití viacerých prepregov na jeden poťah sa zvýši príľnavosť k jadru sendviču. Je to spôsobené tým, že viac vrstiev prepregu obsahuje viac živice, ktorá sa pri zahriatí roztaví a pri pôsobení tlaku lepšie spojí voštinu s vonkajšou vrstvou.

ZOZNAM POUŽITÉJ LITERATURY

- [1] Twi-global.com [online]. [cit. 2015-12-03]. *Sendvičové štruktúry*. Dostupné z: <http://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/material-faqs/faq-what-is-a-sandwich-structure/>
- [2] AvStop.com [online]. [cit. 2015-12-03]. Dostupné z: http://avstop.com/ac/Aviation_Maintenance_Technician_Handbook_General/images/fig5-14.jpg
- [3] Sendvičové štruktúry [online]. [cit. 2015-12-03]. Dostupné z: <http://altairenlighen.com/2012/07/sandwich-structures/>
- [4] RUSNÁKOVÁ, Soňa. *Zpracovatelské inženýrství kompozitů*. Prednášky 2012
- [5] STANĚK, Lukáš. *Návrh skladby sendvičového kompozitního materiálu pro dopravní a stavební aplikace*. 2013. 100 s. Bakalářská práce
- [6] Hexcel.com [online]. [cit. 2015-12-07]. *Sandwich panel fabrication technology*. Dostupné z: http://www.hexcel.com/Resources/DataSheets/Brochure-Data-Sheets/Sandwich_Panel_Fabrication_Technology.pdf
- [7] Swedsteel-metecno.com [online]. [cit. 2015-12-08]. *Heat insulated sandwich panels*. Dostupné z: <http://swedsteel-metecno.com/en/products/heat-insulated-sandwich-panels/>
- [8] HOLČÍK, Ján. *Výzkum adheze a koheze a jejich vlivu na vlastnosti sendvičových struktur*. 2014. 99 s. Diplomová práce
- [9] BUCŇÁK, Ondřej. *Analýza sendvičových struktur metodou konečných prvků*. 2014. 52 s. Bakalářská práce
- [10] Hexcel.com [online]. [cit. 2015-12-08]. *Prepreg technology*. Dostupné z: http://www.hexcel.com:82/pdf/Technology%20Manuals/Prepreg_Technology/index.html#?page=4
- [11] Directindustry.com [online]. [cit. 2015-12-09]. Dostupné z: http://img.directindustry.com/images_di/photo-g/37818-6670741.jpg
- [12] Netcomposites.com [online]. [cit. 2015-12-09]. *Wood cores*. Dostupné z: <http://www.netcomposites.com/guide-tools/guide/core-materials/wood-cores/>
- [13] AirexBaltekBanova.com [online]. [cit. 2015-12-09]. *Baltek balsa*. Dostupné z: <http://www.airexbaltekbanova.com/baltek-balsa.html>

- [14] Ecuadorbalsa.com [online]. [cit. 2015-12-09]. Dostupné z: <http://ecuadorbalsa.com/images/balsa-plan-tree.jpg>
- [15] FoamByMail.com [online]. [cit. 2015-12-10]. *Closed-Cell foam*. Dostupné z: <http://www.foambymail.com/closed-cell-foams.html>
- [16] Netcompositec.com [online]. [cit. 2015-12-10]. *Core materials*. Dostupné z: <http://www.netcomposites.com/guide-tools/guide/core-materials/>
- [17] Azom.com [online]. [cit. 2015-12-10]. *Foam cores*. Dostupné z: http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=1092#_Foam_Cores
- [18] Corecomposites.com [online]. [cit. 2015-12-10]. *Honeycomb*. Dostupné z: <http://www.corecomposites.com/products/honeycomb>
- [19] Havel-Composites.com [online]. [cit. 2015-12-10]. *Cz katalog*. Dostupné z: http://www.havel-composites.com/ktlgfiles/cz_katalog.pdf
- [20] Plastcore.com [online]. [cit. 2015-12-11]. *Thermoplastic oneycomb cores*. Dostupné z: <http://www.plascore.com/products/honeycomb-cores/thermoplastic>
- [21] Hexcel.com [online]. [cit. 2015-12-11]. *Honeycomb attributies and properties*. Dostupné z: http://www.hexcel.com/Resources/DataSheets/Brochure-Data-Sheets/Honeycomb_Attributes_and_Properties.pdf
- [22] BITZER, Tom. *Honeycomb technology*. V UK 1. vyd. Glasgow: Springer-Science+Business Media, 1997, 230 s. ISBN 978-94-010-6474-3
- [23] ONDROUŠEK, David. *Vliv teploty na mechanické chování sendvičových konstrukcí s polymerním jádrem*. 2015. 104 s. Bakalářská práce
- [24] Kt.tul.cz [online]. [cit. 2015-12-12]. *Výzkum trhu kompozitů*. Dostupné z: <http://www.kht.tul.cz/items/A-BP/2010/%C5%A0afa%C5%99%C3%ADkov%C3%A1%20-%20V%C3%BDzkum%20trhu%20kompozitn%C3%ADch%20materi%C3%A1l%C5%AF%20v%20C4%8CR.pdf>
- [25] Hexcel.com [online]. [cit. 2015-12-14]. *Products*. Dostupné z: <http://www.hexcel.com/products>
- [26] Carblog.be [online]. [cit. 2015-12-14]. *RedBull cars*. Dostupné z: http://www.carblog.be/bestanden/images/Boston_-_Red_Bull_cars_02.JPG
- [27] Microste.sk [online]. [cit. 2016-01-05]. *Rezanie vodným lúčom*. Dostupné z: <http://www.hexcel.com/products>

ZOZNAM POUŽITÝCH SYMBOLOV A SKRATIEK

PUR	Polyuretán
PVC	Polyvinylchlorid
PS	Polystyrén
ABS	Akrylonitrilbutadienstyren
PC	Polykarbonát
PP	Polypropylén
PE	Polyetylén
°C	Stupeň celsia
MPa	Megapascal
kg	Kilogram
F	Zaťažujúca sila
mm	Milimeter
m ³	Meter kubický
n	Počet drážok
C1	Dĺžka vnútornej periférie
C2	Dĺžka vonkajšej periférie
k _M	Koeficient využitia materiálu
S _p	Plocha dosky
S _v	Plocha vyrezanej otváracej časti
P _v	Počet vyrezávaných kusov
o	Obvod
d ₁	Vnútorný priemer obvodovej časti
d ₂	Vonkajší priemer obvodovej časti
h _r	Hrúbka rezného nástroja

ZOZNAM OBRÁZKOV

<i>Obr. 1: Sendvičový panel [2]</i>	12
<i>Obr. 2: Zaťaženie sendvičovej konštrukcie na ohyb [5]</i>	13
<i>Obr. 3: Prepreg [11]</i>	15
<i>Obr. 4: Balzový strom (Ochroma pyramidale) [14]</i>	16
<i>Obr. 5: Dyha balzového dreva [13]</i>	17
<i>Obr. 6: Polymérne peny [16]</i>	17
<i>Obr. 7: PVC pena [16]</i>	18
<i>Obr. 8: Polystyrénová pena [15]</i>	18
<i>Obr. 9: Voština [4]</i>	19
<i>Obr. 10: Hliníková voština [18]</i>	20
<i>Obr. 11: Nomexová voština [18]</i>	21
<i>Obr. 12: Kevlarová voština [18]</i>	21
<i>Obr. 13: Polykarbonátová a polypropylénová voština [20]</i>	22
<i>Obr. 14: a) Šesťhranná voština, b) OX-Core voština, c) Flex-Core voština, d) Double-Flex voština, e) Vystužená hexagonálna voština [21,22]</i>	23
<i>Obr. 15: Spôsob výroby rozťahnutého voštinového jadra [22]</i>	24
<i>Obr. 16: Výroba voštinového jadra technológiou vrapovania fólie [4]</i>	25
<i>Obr. 17: Autokláv [6]</i>	26
<i>Obr. 18: Technológia vyhrievaného lisovania [23]</i>	26
<i>Obr. 19: Formovanie v uzatvorenej forme [22]</i>	27
<i>Obr. 20: Ohýbanie voštinového panelu technikou "cut and fold" [6]</i>	27
<i>Obr. 21: Zakrivenie voštinového panelu technikou "cut and fold" [6]</i>	28
<i>Obr. 22: Príklad zakriveného sendviču s jadrom s polymérnej peny</i>	28
<i>Obr. 23: Mechanické (a,b,c,d) a zalisované (e,f) spojovacie prvky: a) S ochranným krúžkom na jednej strane, b) Dištančná trubka, c) S ochranným krúžkom na oboch stranách, d) Na diaľku skrz panel pomocou skrutky a matice, e) Pomocou závrtnnej skrutky, f) Závitová vložka [21]</i>	31
<i>Obr. 24: Základné metódy uzatvárania hrán sendvičových panelov [21]</i>	32
<i>Obr. 25: Strecha autobusu vyrobená z sendvičových voštinových panelov [4]</i>	33
<i>Obr. 26: Využitie voštinových panelov vo vlakovom vagóne [4]</i>	34
<i>Obr. 27: Ukážka výroby člnu zo sendvičových voštinových štruktúr [4]</i>	34
<i>Obr. 28: Rôzne aplikácie v stavebnom priemysle [25]</i>	35

<i>Obr. 29: Dopravné lietadlá Airbus A350 a Boeing 787 [24]</i>	36
<i>Obr. 30: Lyžiarska výstroj z kompozitných materiálov [25]</i>	36
<i>Obr. 31: Plechovka uchytaná k automobilu [26]</i>	39
<i>Obr. 32: Návrh dizajnu plechovky s detailom na otváraciu časť</i>	40
<i>Obr. 33: Navrhované uloženie otváracích častí na doske prepregu</i>	42
<i>Obr. 34: Určenie povrchu otváracej časti pomocou softvéru Catia V5</i>	42
<i>Obr. 35: Tkanina vo forme rovingových zväzkov [4]</i>	43
<i>Obr. 36: Návrh obvodovej časti v softwéri Catia V5</i>	44
<i>Obr. 37: Návrh uchytania obvodových častí k stojanu</i>	45
<i>Obr. 38: Návrh vrchnej a spodnej časti v softwére Catia V5</i>	46
<i>Obr. 39: Spojenie vrchnej a otváracej časti</i>	47
<i>Obr. 40: Výsledný tvar výrobku</i>	47
<i>Obr. 41: Nastrihané voštiny a prepregy na požadované rozmery</i>	49
<i>Obr. 42: Sendvičová doska nachystaná na lisovanie</i>	49
<i>Obr. 43: Laboratórny vulkanizačný lis</i>	50
<i>Obr. 44: Hotový výrobok po vytiahnutí z lisu</i>	50
<i>Obr. 45: Stolná píla Scheppach HS 80</i>	51
<i>Obr. 46: Skúšobné vzorky pripravené na testovanie</i>	51
<i>Obr. 47: Skúšobný stroj ZWICK 1456</i>	52
<i>Obr. 48: Skúšobné teleso vložené v podperách</i>	52
<i>Obr. 49: Graf závislosti zaťažujúcej sily na deformácii vzoriek č. 1</i>	53
<i>Obr. 50: Graf závislosti zaťažujúcej sily na deformácii vzoriek č. 2</i>	54
<i>Obr. 51: Roztrhnutá voština počas zaťažovania vzorku č. 2</i>	55
<i>Obr. 52: Porovnanie priemerných maximálnych síl jednotlivých vzoriek</i>	55

ZOZNAM TABULIEK

<i>Tab. 1: Porovnanie pevnosti a tuhosti v ohybe [6]</i>	14
<i>Tab. 2: Typy plochých spojov voštinových štruktúr [21]</i>	29
<i>Tab. 3: Typy rohových spojení voštinových štruktúr [21]</i>	30
<i>Tab. 4: Typy spojení voštinových štruktúr v tvare T [21]</i>	30
<i>Tab. 5: Doba vytvrdzovania vzhľadom na teplotu</i>	41
<i>Tab. 6: Mechanické vlastnosti prepregu</i>	41
<i>Tab. 7: Mechanické vlastnosti aramidovej voštiny HRH-10 - 3,2 - 48</i>	44
<i>Tab. 8: Mechanické vlastnosti voštiny COREMASTER C2</i>	48
<i>Tab. 9: Vlastnosti epoxidového prepregu M49/42%/245T2/AS4-3K</i>	48
<i>Tab. 10: Technické údaje vulkanizačného lisu</i>	50
<i>Tab. 11: Namerané hodnoty maximálnej sily vzoriek č. 1</i>	53
<i>Tab. 12: Namerané hodnoty maximálnej sily vzoriek č. 2</i>	54

ZOZNAM PRÍLOH

- Príloha P I Technický list epoxidovej živice M49
- Príloha P II Technický list voštiny HRH-10
- Príloha P III Technický list voštiny COREMASTER C2

PRÍLOHA P I:



Description

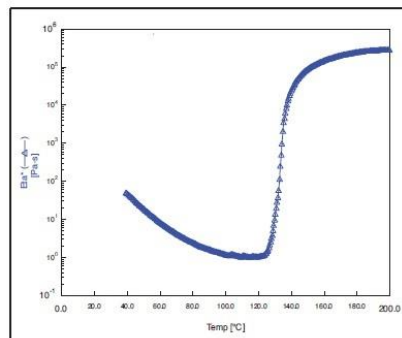
HexPly® M49 is a 120°C curing toughened epoxy matrix with good impact resistance suitable for use in performance cars. The matrix is highly tolerant to a wide variety of production techniques and equipment making it easy to process. HexPly® M49 is especially suitable for carbon look applications (eg car interiors).

Benefits and Features

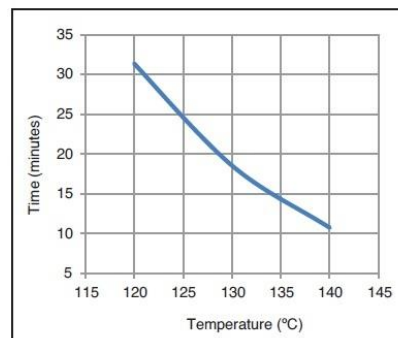
- High Toughened epoxy
- Good impact resistance
- Autoclave process for cosmetic application
- Self-adhesive on honeycomb
- Vacuum bag process with low porosity level achieved
- Good stability under UV
- Long shelf life and out life at room temperature
- Excellent tack and drape

Resin Matrix Properties

Rheology (EN 6043-A, 2°C/min)



Gel time (hot plate)



- | | |
|--|--|
| ■ Colour | Transparent |
| ■ Density | 1,18 g/cm ³ |
| ■ Maximum Glass Transition Temperature, (TG onset dry) | 105°C (depending of the reinforcement) |
| ■ TG onset wet | 80 °C |



HexPly® M49

Alternative Cure Cycles

HexPly® M49 is a versatile curing system which can be cured from 85°C to 140°C.

The nominal cure cycle is 1 hour at 120°C but alternative cure cycles can be used:

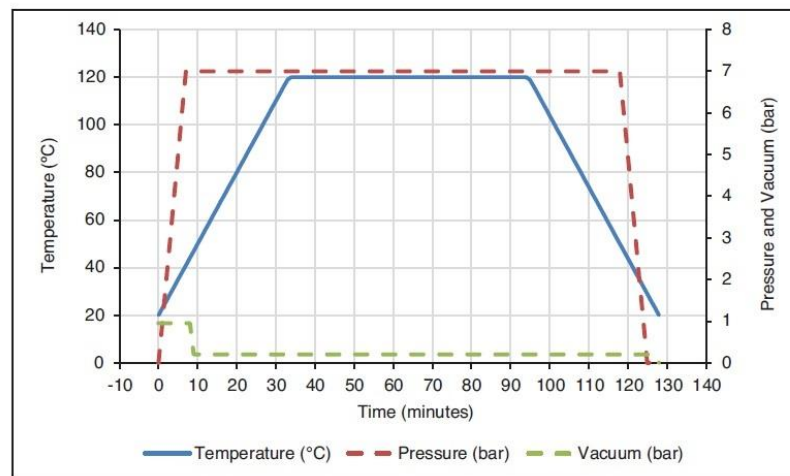
Cure Temperature	85°C	90°C	100°C	120°C	140°C
Time	720 min	360 min	120 min	60 min	30 min
Tg	Up to 105°C*				

*Depending of the reinforcement

Recommended Cure Cycle for thin parts

NB : For carbon look parts, autoclave process is recommended (contact Hexcel for optimal cure cycle).

1. Apply the full vacuum (0.9 bar)
2. Apply 7 bar gauge autoclave pressure
3. Reduce vacuum to a safety value of 0.2 bar when the autoclave pressure reaches around 1 bar gauge
4. Heat at 1 to 3 ° C/min to 120° C
5. Hold at 120° C for 60 minutes
6. Cool at 2 to 5° C/minute
7. Vent autoclave pressure when the part reaches 60° C or below



Heat-up rates are dependent on component thickness, eg, slow heat-up rates should be used for thicker components and large tools. Accurate temperature measurements of the component should be made during the cure cycles by using thermocouples. For a honeycomb sandwich panel, a cure cycle of 1 to 3 bar should be used, dependent on honeycomb density.

Performance testing should accompany alternative cure cycles to ensure suitability for the particular application.

120°C curing epoxy matrix

Prepreg Physical Properties (Examples only. For the wider prepreg range contact Hexcel®)

Product Designation		M49/42%/200T2X2/CHS-3K	M49/42%/245T2/AS4-3K	M49/42%/370T2/CHS-12K	M49/39%/600T2X2/CHS-12K	M49/32%/600S8/GE-300
Fibre	-	HS Carbon 3K	HS Carbon 3K	HS Carbon 12K	HS Carbon 12K	E Glass -
Tow	-					
Weave	-	Twill 2x2	Twill 2x2	Twill 2x2	Twill 2x2	Satin 8
Mass	g/m ²	200	245	370	600	600
Nominal Cured Ply Thickness	mm	0.235	0.286	0.433	0.659	0.473
Nominal Fibre Volume	%	47.8	47.6	47.5	50.6	49.5
Nominal Laminate Density	g/cm ³	1.47	1.47	1.47	1.47	1.20

Cured Prepreg Mechanical Properties (Examples only. For the wider prepreg range contact Hexcel®)

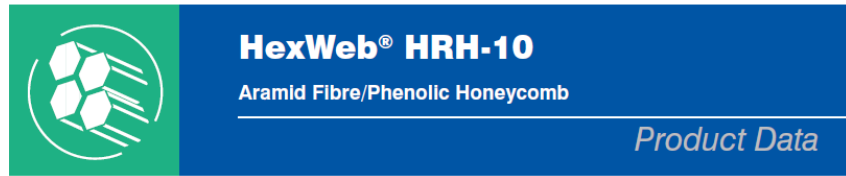
Mechanical Properties are based on 120°C cure for 60 minutes, at 7 bar pressure and -0.9 bar vacuum.

Data is the result from several tests on autoclave cured laminates. Some of the values achieved will have been higher, and some lower than the figure quoted. These are nominal values.

Test	Methods	Units	M49/42%/200T2X2/CHS-3K	M49/42%/245T2/AS4-3K	M49/42%/370T2/CHS-12K	M49/39%/600T2/CHS-12K	M49/32%/600S8/GE-300
Tensile Strength	Carbon EN2561	MPa	1050	980	1000	840	550
Tensile Modulus	Glass EN 2747	GPa	68	66	66	63	20
Flexural Strength	Carbon EN 2562	MPa	1000	960	800	780	660
Flexural Modulus	Glass EN 2746	GPa	60	60	55	55	21
ILSS	Carbon EN 2563 Glass EN 2377	MPa	60	57	60	62	56
Comp. Strength	EN 2850 B	MPa	730	760	650	500	460

NB : Data normalised to Fibre Volume Content (55% for fabrics; 60% for UD) except for ILSS and Flexural.

PRÍLOHA P II:



Description

HexWeb HRH-10 is manufactured from aramid fibre sheets. A thermosetting adhesive is used to bond these sheets at the nodes, and, after expanding to the hexagonal or 'OX-Core' configuration, the block is dipped in phenolic resin. After curing the resin, slices are cut to the desired thickness. For special applications, such as air directionalizing, the honeycomb can be provided without the phenolic resin. Using this process, a wide range of cell sizes, thicknesses, and densities can be produced. The current product range is shown under Mechanical Properties.

Features

- High Strength at Low Densities
- Small Cell Sizes at Low Densities
- Damage Resistant Under Normal Shop Use
- Formable
- Fire-Resistant (self-extinguishing)
- Water and Fungus Resistant
- Excellent Dielectric Properties
- Good Bonding Surfaces
- Good Thermal and Electrical Insulator

Applications

HexWeb HRH-10 has been widely accepted throughout the aerospace industry and several commercial areas as a very tough, environmentally resistant core material in sandwich panels. It has been designed and used in flat and contoured shapes, with a wide variety of facing materials and adhesives, and it has extensive service in both structural and nonstructural parts. Most of the interior panels of commercial aircraft are made with this core material primarily because of its resilience, small cell size/low density combination, and its fire resistance. Exterior aircraft parts such as radomes, fairings, helicopter blades, flaps, etc., are designed with HRH-10 because of the features listed above. Surfboards and high-performance boats are but two additional applications where this core has been used because of its toughness and resistance to corrosive attack. The OX configuration is a hexagonal honeycomb that has been overexpanded in the W direction, providing a rectangular cell shape that facilitates curving or forming in the L direction.

*Flex-Core, HRH, OX-Core, Hexcel, and the Hexcel logo are registered trademarks of Hexcel Corporation, Dublin, California.





HexWeb® HRH-10

Standard Dimensions

HexWeb HRH-10 honeycomb is typically available in the following sizes.

Products	L	W	T maximum	T minimum	m ² Per Panel
All HRH-10 Materials	1100 -0/+50mm	2500 -0/+100mm	900mm	3mm	2.75
	1250 -0/+50mm	2500 -0/+50mm	900mm	3mm	3.125

Thickness Tolerance

Tolerances on cut thickness are as follows:

3 to 50mm tolerance will be ± 0.125 mm

50 to 100 tolerance will be ± 0.25 mm

100mm and over tolerance will be ± 3.0 mm

Special thickness tolerances as well as other L, W, and T dimensions are available upon special request. For large volume requirements it may be possible to supply panels to your specific size at little or no additional charge. Tolerances on L and W for pieces cut to size will depend on the core type and panel dimensions. Tight tolerances are not always possible because of the flexible nature of this material.

Type Designation

HexWeb HRH-10 honeycomb is designated as follows:

Material – Cell Size – Density

Example: HRH-10 – 3.2 – 48

Where:

HRH-10 - designates honeycomb type

3.2 - is the cell size in mm

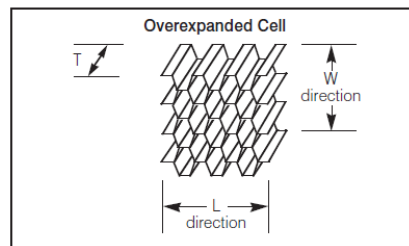
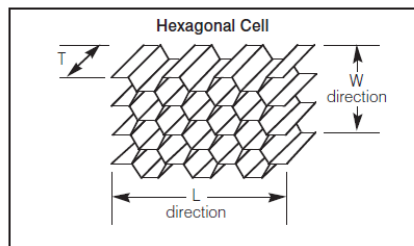
48 - is the nominal density in kg/m³

Dimensional Nomenclature

T = Thickness, or cell depth

L = Ribbon direction

W = Direction of Expansion, or direction perpendicular to the ribbon



PRÍLOHA P III:

CORMASTER C2

High performance lightweight material from SCHÜTZ for industrial applications.



ADVANTAGES

- Excellent cost-benefit ratio.
- Superior mechanical properties with high strength to weight ratios.
- High dimensional stability under heat and moisture.
- High temperature capabilities, service temperature up to 180°C.
- Product uniformity and exceptional resin to paper cohesion.

DELIVERY TIME

- A lot of CORMASTER C2 honeycombs types are available on stock.
- **When the honeycomb is on stock:** delivery time never exceeds 5 working days.
 - **When the honeycomb has to be manufactured:** delivery time never exceeds 10 working days.

MATERIAL

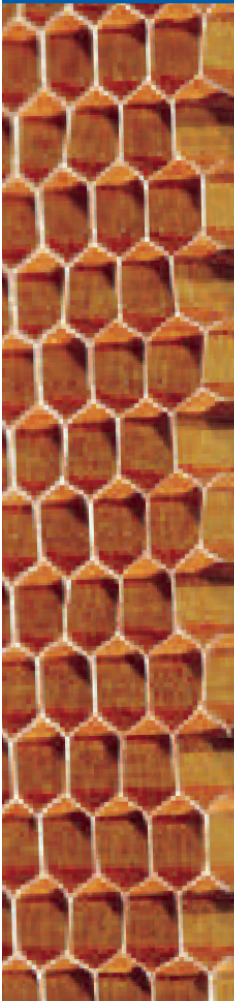
- non metallic structures made from NOMEX® T722 paper sheets
- bonded together and coated with a phenolic resin



APPLICATION

- Main structural sandwich applications in industrial applications (f.e. automotive, naval, rail, transport and sports industries)

CORMASTER C2

Technical data



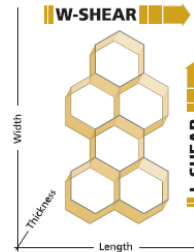
CORMASTER TYPE	Compressive strength (MPa)		Shear strength (MPa)		Shear modulus (MPa)		
	bare	stabilized	L	W	L	W	
HEXAGONAL CONFIGURATION							
 C2 - 3,2	- 48	1,8	2,0	1,2	0,7	36,0	24,0
	- 64	3,2	3,4	1,6	1,95	50,0	35,0
	- 80	4,4	4,6	1,75	1,0	56,0	32,0
	- 123	9,9	10,0	3,0	2,0	91,0	65,0
C2 - 4,8	- 32	0,8	0,9	0,55	0,32	18,0	13,0
	- 48	1,9	2,0	1,12	0,54	37,0	23,0
	- 64	3,0	3,2	1,6	0,85	50,0	27,0
	- 96	6,5	6,8	2,35	1,3	74,0	36,0
C2 - 6,4	- 32	0,6	0,7	0,5	0,32	17,0	13,0
	- 50	1,9	2,0	1,1	0,53	37,0	16,0
	- 64	3,2	3,3	1,35	0,72	46,0	23,0
C2 - 9,5	- 32	0,6	0,7	0,6	0,3	15,0	12,0
	- 48	1,8	2,0	1,3	0,85	40,0	33,0
OVEREXPANDED CONFIGURATION							
 C2 - 4,8	- 29 OX	0,5	0,6	0,3	0,3	9,0	14,0
	- 48 OX	1,7	2,0	0,7	1,7	25,0	25,0
C2 - 6,4	- 48 OX	1,8	2,0	0,65	0,65	16,0	23,0
	- 56 OX	2,0	2,1	0,7	0,7	19,0	29,0

16.041.0010/RENNES/BAUCH & OZAMER (Technical changes reserved)



To submit an offer we need the CORMASTER type with cell size and density together with the dimensions (width, length and thickness) of the required honeycomb product. Please notice, that it is very important to consider the different properties for L- and W-Shear. Do not hesitate to contact us, if you have particular requirements.

C2 - 4,8	- 48
meta-aramid C2 paper sheets coated with resin	
Cell size in mm	
Density in kg/m ³	



SCHÜTZ GmbH & Co. KGaA
 Schützstraße 12
 D-56242 Selters
 Phone +49 (0) 2628/77-221
 Fax +49 (0) 2628/77-431
 E-mail: info3@schuetz.net
 www.schuetz.net