

# Vliv jádra na mechanické chování sendvičových kompozitních materiálů

Bc. Přemysl Chvilíček

---

Diplomová práce  
2018



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2017/2018

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Přemysl Chvilíček**

Osobní číslo: **T16261**

Studijní program: **N3909 Procesní inženýrství**

Studijní obor: **Výrobní inženýrství**

Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Vliv jádra na mechanické chování sendvičových kompozitních materiálů**

Zásady pro vypracování:

1. Literární rešerše v oblasti sendvičových kompozitních materiálů.
2. Výroba a popis způsobu výroby polymerních a 3D jader.
3. Popis zpracovatelských technologií vhodných pro výrobu sendvičových materiálů.
4. Přehled a popis sendvičových kompozitních materiálů v konkrétních aplikacích průmyslu.
5. Návrh materiálového složení sendvičových kompozitních materiálů s různou hustotou jádra.
6. Experimentální výroba sendvičových kompozitních materiálů dle zvolené technologie.
7. Testování mechanických vlastností sendvičových kompozitních materiálů.
8. Závěr diplomové práce a diskuze dosažených výsledků.

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

**Dle doporučení vedoucího práce**

Vedoucí diplomové práce:

**doc. Ing. Soňa Rusnáková, Ph.D.**

Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce:

**2. ledna 2018**


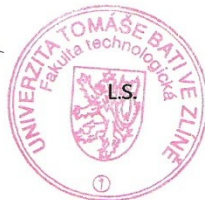
Termín odevzdání diplomové práce:

**18. května 2018**

Ve Zlíně dne 5. února 2018



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



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

Příjmení a jméno: CHVILÍČEK PŘEMYSL

Obor: VÝROBNÍ INŽENÝRSTVÍ

## 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 obhajoby<sup>1)</sup>;
- 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. 3<sup>2)</sup>;
- beru na vědomí, že podle § 60<sup>3)</sup> 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 § 60<sup>3)</sup> 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 14.5.2018

Michal Páral

<sup>1)</sup> 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 nevdálečně 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.

<sup>2)</sup> 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).

<sup>3)</sup> 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 užít 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**

Diplomová práce se zabývá vlivem hustoty jádra na mechanické vlastnosti sendvičových konstrukcí. Teoretická část práce obecně seznamuje a podává základní informace o technologiích a materiálech používaných při výrobě sendvičových konstrukcí a taky o možnostech použití těchto materiálů v praxi. Praktická část diplomové práce se zaměřuje na zkoušku tříbodovým ohybem a zkoušku hořlavosti žhavou smyčkou. Závěr práce slouží k zhodnocení naměřených výsledků.

Klíčová slova: Prepreg, jádro, sendvič, mechanické vlastnosti

## **ABSTRACT**

The diploma thesis deals with influence of core density on mechanical properties of sandwich structures. The theoretical part of the thesis generally introduces and provides basic information about the technologies and materials used in the production of sandwich structures and about the possibilities of using these materials in practice. The practical part of the diploma thesis focuses on the three-point bend test and the flammability test with a glowing loop. The conclusion of the thesis serves to evaluate the measured results.

Keywords: Prepreg, core, sandwich, mechanical properties

Děkuji vedoucímu diplomové práce paní doc. Ing. Soně Rusnákové, Ph.D. za příležitost pracovat na daném tématu, konzultace, rady, cenné připomínky a hlavně za věnovaný čas. Dále bych chtěl také poděkovat panu Ing. Milanu Žaludkovi, Ph.D. za pomoc a cenné rady ohledně mechanického testování.

*„Intelligence je schopnost přizpůsobit se změně.“*

Stephen Hawking

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

# OBSAH

<b>ÚVOD .....</b>	<b>10</b>
<b>I TEORETICKÁ ČÁST .....</b>	<b>11</b>
<b>1 SENDVIČOVÉ STRUKTURY .....</b>	<b>12</b>
1.1 SLOŽENÍ SENDVIČOVÉ KONSTRUKCE .....	13
1.1.1 Vnější vrstvy sendvičové konstrukce .....	13
1.1.2 Jádro sendvičové konstrukce .....	15
1.2 VÝROBA SENDVIČOVÝCH KONSTRUKCÍ .....	18
1.2.1 Ruční kladení .....	18
1.2.2 Vakuové lisování prepregů .....	18
1.2.3 RTM technologie .....	19
1.2.4 Lisování za tepla .....	20
1.2.5 Vakuová infuze .....	21
1.3 VLASTNOSTI SENDVIČOVÝCH STRUKTUR .....	21
1.3.1 Ohybová pevnost a tuhost .....	21
1.3.2 Tepelná odolnost a odolnost proti ohni .....	22
1.3.3 Akustická izolace .....	22
<b>2 POLYMERNÍ JÁDRA .....</b>	<b>23</b>
2.1 VÝROBA POLYMERNÍCH A 3D VOŠTINOVÝCH JADER .....	23
2.1.1 Expanzní proces .....	23
2.1.2 Vrapování fólie .....	24
2.2 DRUHY MATERIÁLŮ PRO VÝROBU JADER .....	24
2.2.1 Polymerní pěnová jádra .....	25
2.2.2 Voštiny .....	27
<b>3 POUŽITÍ SENDVIČOVÝCH STRUKTUR .....</b>	<b>29</b>
3.1 LETECKÝ PRŮMYSL .....	29
3.2 LODNÍ PRŮMYSL .....	29
3.3 STAVEBNÍ PRŮMYSL .....	30
3.4 AUTOMOBILOVÝ PRŮMYSL .....	31
3.5 ŽELEZNIČNÍ PRŮMYSL .....	31
<b>II PRAKTICKÁ ČÁST .....</b>	<b>32</b>
<b>4 CÍLE PRÁCE .....</b>	<b>33</b>
<b>5 METODY TESTOVÁNÍ SENDVIČOVÝCH STRUKTUR .....</b>	<b>36</b>
5.1 ZKOUŠKA OHYBEM .....	36
5.1.1 Třibodová zkouška ohybem .....	36
5.1.2 Čtyřbodová zkouška ohybem .....	37
5.2 ZKOUŠKA ŽHAVOU SMYČKOU .....	38
<b>6 VÝROBA ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ .....</b>	<b>39</b>
6.1 POUŽITÉ MATERIÁLY .....	39
6.1.1 Prepreg VV320P-DT806R-37 .....	39
6.1.2 Prepreg Gurit PHG 840-300-42 .....	39
6.1.3 Nomexová voština CORMASTER C2 .....	40



6.2	POUŽITÁ ZAŘÍZENÍ.....	40
6.2.1	Laboratorní vyhřívaný lis.....	40
6.2.2	Stolní pila Scheppach HS 80.....	41
6.2.3	Univerzální zkušební stroj ZWICK 1456.....	42
6.2.4	Zařízení pro zkoušku žhavou smyčkou.....	43
<b>7</b>	<b>EXPERIMENTÁLNÍ TESTOVÁNÍ.....</b>	<b>44</b>
7.1	ZKOUŠKA TŘÍBODOVÝM OHYBEM.....	44
7.2	ZKOUŠKA ŽHAVOU SMYČKOU.....	49
7.3	VYHODNOCENÍ ZKOUŠKY TŘÍBODOVÝM OHYBEM.....	52
7.4	VYHODNOCENÍ INDEXU HOŘLAVOSTI ŽHAVOU SMYČKOU (GWFI).....	53
	<b>ZÁVĚR.....</b>	<b>54</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....</b>	<b>55</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....</b>	<b>58</b>
	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ.....</b>	<b>59</b>
	<b>SEZNAM TABULEK.....</b>	<b>61</b>
	<b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>	<b>62</b>

## ÚVOD

Sendvičové konstrukce patří mezi kompozitní materiály, které tvoří jádro o malé hmotnosti spojené s dvěma vnějšími vrstvami. Dojde-li k porušení kterékoliv částí této konstrukce, může dojít k selhání celé sendvičové konstrukce. Hlavní použití pro pokročilé aplikace najdeme především v leteckém, kosmickém a dopravním průmyslu, kde se využívá jejich hlavních předností, a to nízké hmotnosti při zachování vysoké ohybové tuhosti a pevnosti. Sendviče však můžeme nalézt i v ostatních průmyslových odvětvích. Ohybová tuhost a pevnost nejsou jedinými jejich přínosy. K dalším výhodám patří také únavová odolnost, odolnost proti šíření trhlin, odolnost proti rázům, tepelná odolnost a odolnost proti ohni, tlumení a tepelná a akustická izolace. Všechny tyto vlastnosti jsou určeny převážně materiálem jádra.

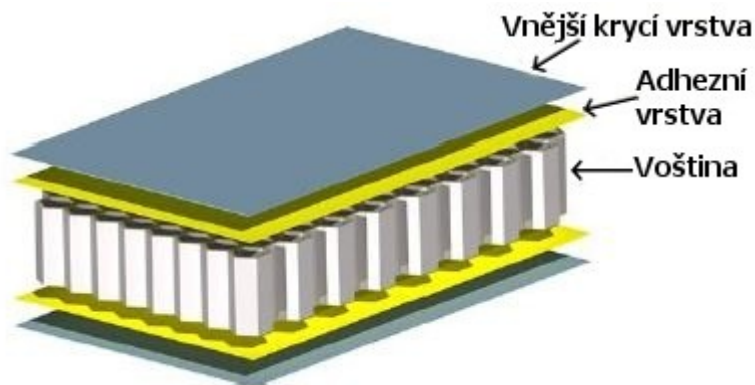
Teoretická část diplomové práce se věnuje popisu jednotlivých materiálů jak pro jádra, tak pro vnější vrstvy. Mimo jiné taky zahrnuje možnosti výroby voštinových jader a sendvičových panelů a jejich následné aplikace v různých odvětvích.

V praktické části diplomové práce je popsán průběh výroby daných sendvičových konstrukcí a jejich následné testování tříbodovým ohybem a zkouškou hořlavosti žhavou smyčkou. Konkrétně se práce zabývá změnou mechanických vlastností sendvičové struktury s třemi různými hustotami jádra.

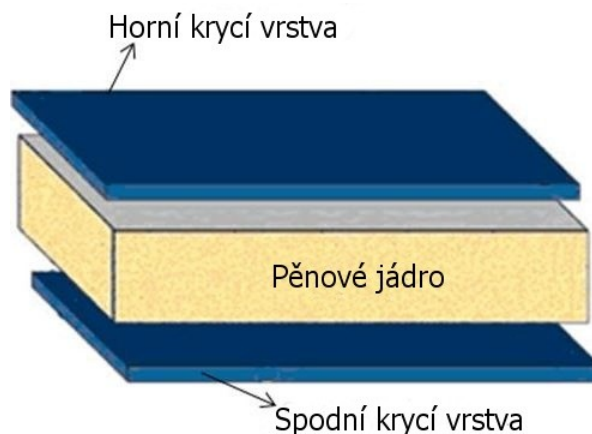
## **I. TEORETICKÁ ČÁST**

## 1 SENDVIČOVÉ STRUKTURY

Sendvičové struktury patří mezi vrstvené kompozitní materiály. Výhodou těchto materiálů je vysoká ohybová pevnost a tuhost, odolnost proti poškození (rázům), schopnost tlumení a nízká hmotnost. Jejich využití najdeme hlavně v technicky zaměřených průmyslech (automobilový, železniční, letecký, lodní, kosmonautika), ale taky ve stavebnictví, kde se využívají především jako izolace. Efektivní sendvičová struktura je tvořena dvěma pevnými vnějšími vrstvami, které jsou zatěžovány tahovými a tlakovými silami a jádrem, které má za úkol přenášet smykové síly mezi vnější vrstvy. Sendvičová konstrukce je složena ze tří materiálových vrstev. Ze dvou vnějších vrstev, které jsou tenké, tuhé a pevné. Dále pak z jádra, které je charakterizováno větší tloušťkou, pevností a nižší hmotností. Poslední součástí může být adhezní vrstva, která zajišťuje přenos zatížení mezi jednotlivými složkami sendviče. Adhezní vrstva nemusí být součástí vždy, například u prepregů, kde je adheze zajištěna pryskyřicí uvnitř prepregu. [1],[2]



Obr. 1 Složení sendvičového panelu. [3]



Obr. 2 Sendvičová struktura s pěnovým jádrem. [4]

## 1.1 Složení sendvičové konstrukce

### 1.1.1 Vnější vrstvy sendvičové konstrukce

Většinu konstrukčních materiálů, které máme v podobě desky nebo plechu můžeme použít pro výrobu vnější vrstvy sendvičových konstrukcí. Materiály musí splňovat požadavky na výrobu s ohledem na profilování a ohýbání, dále pak funkční požadavky jako je odolnost proti korozi a ohni, a těsnost vůči vodě a větru. Používané materiály dělíme do dvou základních skupin, na kovové a nekovové. [3]

- **Suché tkaniny**

Skládají se z vláken, které jsou uloženy v polymerním či jiném materiálu zvaném matrice. Jsou to plošné výrobky z vláken nebo pramenců. Vlákna či pramence plní funkci výztuže ve dvou směrech. Vyšším počtem vláken v osnově vznikají různé typy křížení nazývané se vazby. Vytuzující tkaniny využívají plátňovou vazbu, keprovou vazbu a atlasovou (saténovou) vazbu. Plátňová vazba je jednoduchá, vyznačuje se dobrou rozměrovou stálostí. Keprová vazba je vhodná pro tvarově složitější výrobky, je ohebnější. Atlasová vazba má v porovnání s keprovou menší vychýlení vláken a tím umožňuje dosažení velmi hladkého povrchu. [2],[3]



Obr. 3 Druhy vazeb. [3]

- **Semipreg**

Jsou to jednostranně impregnované tkaniny fóliovou pryskyřicí. Výsledkem je velká variabilita výsledné kompozice semipregu, protože lze vycházet ze široké škály pryskyřic. Kromě základních typů, se vyrábějí semipregy s vysokou tepelnou odolností (až 250°C) nebo s vysokou rázovou houževnatostí. Výhodou je minimální zdravotní nezávadnost, se-

mipregy neobsahují rozpouštědla a díky tomu se při jejich zpracování a vytvrzování neodpařují žádné nebezpečné látky, dále při výrobě laminátu není potřeba autokláv. [21]

- **Prepregy**

Prepreg je vláknový výztužný materiál, který je před-impregnován reaktivní pryskyřicí. Nejčastější používaná pryskyřice je epoxidová a fenolická. Před-impregnované prepregy se musí skladovat při nízkých teplotách kolem  $-20^{\circ}\text{C}$ , aby nedocházelo k jejich vytvrzování a stárnutí. Stárnutím se snižuje jeho lepivost. Po vyjmutí materiálu z mrazicího boxu se nechá vytemperovat při pokojové teplotě, kvůli možnému orosení povrchu prepregu, navlhnutí vláken i matrice. Ze ztuhlé role by nebylo možné odvinout potřebný pás. Nejčastější technologií pro zpracování je vakuové lisování nebo vytvrzováním v peci či autoklávu. [5]

- **Kovové materiály**

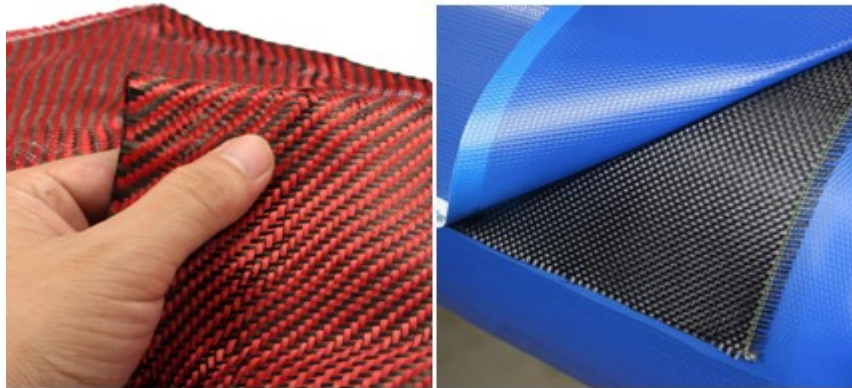
Nejpoužívanější kovový materiál pro výrobu vnějších vrstev je ocel, dále pak slitiny titanu a slitiny hliníku. Většinou se používají za studena válcované plechy s ochranou proti korozi. Korozi lze zabránit žárovým zinkováním plechů. Hliníkové plechy se hojně používají v potravinářském průmyslu kvůli speciálním požadavkům na hygienu. Tloušťka hliníkového plechu se pohybuje od 0,7 až 1,2 mm. Výhodou kovových materiálů je vysoká pevnost a tuhost, odolnost proti nárazům. Nevýhodou je vyšší hustota oproti nekovovým materiálům. [3]

**Výhody:**

- Nevznikají přesycená nebo suchá místa, protože prepreg je rovnoměrně nasycen
- Lepší vzhled povrchu oproti ručnímu laminování, nevznikají bubliny
- Jednoduché použití a opakovatelnost výroby [5]

**Nevýhody:**

- Náročné podmínky skladování a doba zpracování
- Vysoké náklady na pořízení
- Vytvrzovací teplota kolem  $130^{\circ}\text{C}$  a výdrž na této teplotě 2 a více hodin [5]



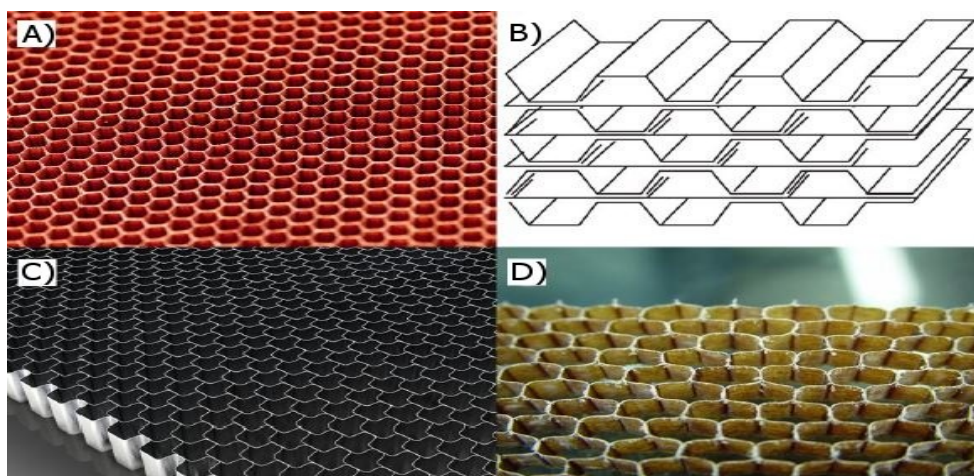
Obr. 4 Ukázka uhlíkové tkaniny a prepregu s uhlíkovou tkaninou. [6]

### 1.1.2 Jádru sendvičové konstrukce

Hlavními parametry, podle kterých jsou jádra vybírána jsou hustota, modul pružnosti ve smyku, tuhost, tepelně a zvukově izolační vlastnosti, odolnost proti vlhkosti a ohni. Nejčastěji se používají pěny, balza nebo voštinové materiály. [2]

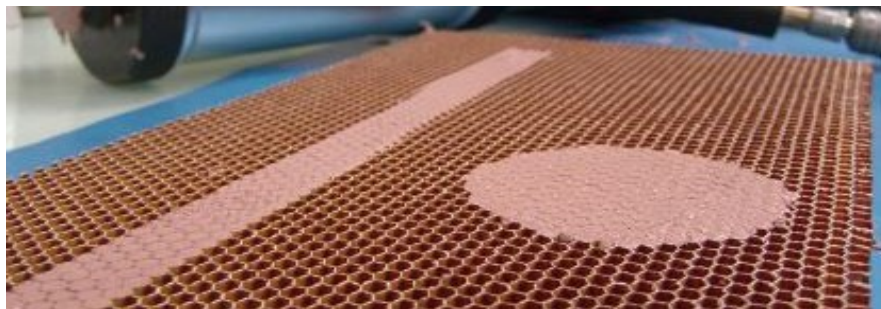
- **Voština**

Voština je složena z řady otevřených buněk v tvaru n-úhelníků, které jsou vyrobeny z velmi tenkých vrstev navzájem spojeného materiálu. Nejčastější tvar buněk je hexagonální, který odvozen z podobnosti se včelími plásty. Může být vyrobena z většiny tenkých plochých materiálů a v mnoha geometrických konfiguracích. Volba tvaru závisí na způsobu namáhání sendviče a způsobu zpracování. Voštiny jsou dostupné v mnoha materiálových alternativách jako je lepenkový papír, hliník, ocel, titan, aramidové (Nomex, Kevlar), skelné nebo uhlíkové vlákno v kombinaci s určitým typem matrice. [9]



Obr. 5 Příklady geometrických tvarů voštin: A) hexagonální, B) hexagonální vyztužená, C) Flex-Core, D) OX-Core. [17],[18]

Stěny kovových voštin mohou být děrované. Buňky lze vyplnit pěnou, kde po vyplnění dochází k lepší adhezi s potahem, nárůstu mechanických vlastností a lepší tepelné a akustické izolaci. Hustota voštin se pohybuje od 16 do 880 kg/m<sup>3</sup>. Po srovnání pěnových a voštinových jader, bylo zjištěno, že voštinová jádra mají lepší mechanické vlastnosti než jádra pěnová při srovnatelné hustotě. Mechanické vlastnosti závisí na tloušťce stěny buňky a materiálu. Rozsah je od papírových voštin s nízkou pevností a tuhostí až po uhlíkové s vysokou pevností, vysokou tuhostí a skvělými žáruvzdornými vlastnostmi. [2],[3]



Obr. 6 Výplň voštinového jádra. [4]

- **Balza**

Tento materiál se získává zpracováním přírodní balzy z balzových stromů, rostou hlavně v Jižní Americe. Balzový strom patří mezi nejrychleji rostoucí stromy na světě. Ze sazenice vyroste strom s přímým kmenem o výšce až 30 m a průměrem kolem 45 cm v průběhu 5 až 7 let. Na zpracování balzového dřeva do konstrukčního jádrového materiálu není potřeba využití velké energie. Výhodami je tuhost, pevnost, vysoká odolnost proti nárazu, vynikající absorpce zvuku a tepelná izolace. Hlavní nevýhodou je minimální hustota, kolem 100 kg/m<sup>3</sup>. To je způsobeno tím, že balza je schopná absorbovat velké množství pryskyřice v průběhu laminování. Při použití balzového dřeva v sendvičových konstrukcích se zrnem směřujícím kolmo s rovinou vnějších ploch, má výsledná složka vlastnosti podobné umělým voštinám. I přes různá chemická ošetření, jsou všechna dřevěná jádra náchylná k navlhání. [20]



Obr. 7 Dýha balzového dřeva. [20]

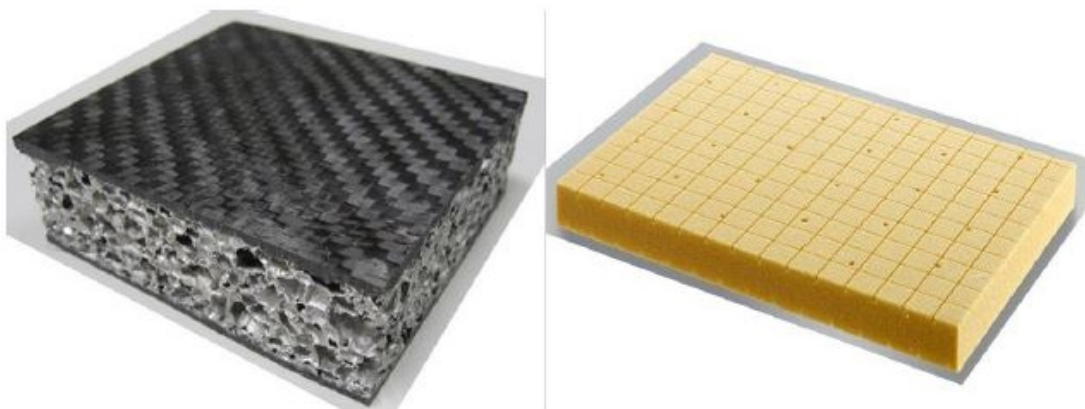


- **Pěny**

Nejběžněji používaný jádrový materiál. Polotovar je ve formě pěnového bloku. Je to materiál, u kterého je jeho měrná hmotnost výrazně nižší, než u plných materiálů. Snížení hustoty je způsobeno přítomností bublin. Principem zpěňování materiálů je vmíchání molekul plynu do horkého polymeru nebo do tekutého monomeru. Následuje expanze bublin a jejich stabilizace, poté se pěna ochladí. Plyn do polymeru dostává dvěma způsoby, buď mechanickým mícháním nebo vmícháním zpěňovacího přídatku (nadouvadla). Nadouvadla máme fyzikální nebo chemická. Polymerní pěny se vyrábí se z mnoho druhů polymerů. Jejich výhodou je nízká hmotnost, dobrá tvarovatelnost, nižší cena oproti voštinovým materiálům, výborné zvukové a tepelně izolační vlastnosti a schopnost absorpce energie při rázu. Hustota pěn se pohybuje mezi 30 až 300 kg/m<sup>3</sup>. S rostoucí hustotou rostou i mechanické vlastnosti. [2],[7]

**Typy polymerních pěn:**

- Polypropylen - PP
- Polyvinylchlorid - PVC
- Polyuretan - PUR
- Polystyren - PS
- Polyetylenetereftalát - PET
- Polymetakrilid - PMI
- a další ...



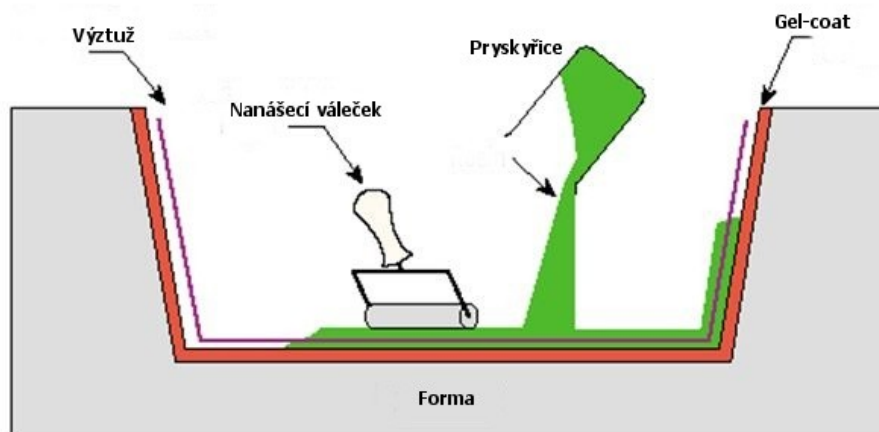
Obr. 8 Hliníková pěna (vlevo) a polymerní pěna (vpravo). [7]

## 1.2 Výroba sendvičových konstrukcí

Pro výrobu sendvičových konstrukcí máme celou řadu výrobních technologií. Vybraná technologie výrazně ovlivňuje konečné vlastnosti výrobku, je tedy nutné se jí dostatečně věnovat. Základní parametry určující volbu technologie pro výrobu dílce jsou sériovost, složitost, kvalita povrchu, vybrané materiály, kvalita povrchu a požadované vlastnosti (hmotnost a pevnost). [2]

### 1.2.1 Ruční kladení

Výrobní metoda ručního kladení se řadí mezi nejstarší metody. Jedná se o mokrou metodu, tedy metodu kdy jsou jednotlivé výztužné materiály nebo jádra impregnovány pryskyřicí. Na začátku výroby se musí na formu nanést separační činidlo, které usnadní vyjmutí výrobku z formy. Dále může následovat vrstva gel-coatu, která tvoří hladkou pohledovou stranu výrobku. Pryskyřice je nanášena pomocí štětce či válečku. Následuje kladení jednotlivých vrstev a jejich postupné prosycování. Kvalitu výrobku můžeme zvýšit stlačením všech vrstev podtlakem pomocí pružné fólie. Hlavní výhodou této metody jsou její nízké náklady a možnost vytvrzování pryskyřice při pokojové teplotě. [2],[10]

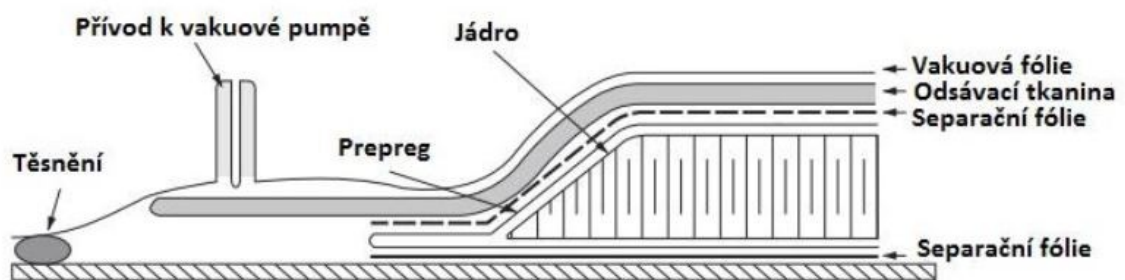


Obr. 9 Technologie výroby ručního kladení. [9]

### 1.2.2 Vakuové lisování prepregů

Tato technologie používá již předem nasycené materiály, nepotřebuje tedy pryskyřici. Jedná se o suchou technologii. Jednotlivé vrstvy mohou být předem nařezány na potřebné rozměry a jsou kladeny do dutiny formy. Na naskládané jednotlivé vrstvy ve formě se postupně kladou další technologicky potřebné materiály. Je to odtrhová tkanina, separační fólie, odsávací rohož, vakuovací fólie a těsnění. Separační fólie slouží k oddělení výrobku

od pomocných materiálů, odsávací rohož zajišťuje odsávání vzduchu z uzavřeného systému a absorbuje nadbytečnou pryskyřici přes separační fólii. Těsnicí páska zajistí vzduchotěsný spoj celého systému, tedy mezi formou a vakuovací fólií. Po kontrole vzduchotěsnosti je forma připravena na vytvrzování. K vytvrzování se používají vytvrzovací pece nebo autoklávy, u kterých je umožněno reprodukovatelně řídit teplo. Chladnutí je pozvolné až na pokojovou teplotu. Následuje odstranění všech pomocných materiálů, vyjmutí výrobku z formy a příprava formy pro další výrobní cyklus. [2],[10]



Obr. 10 Technologie výroby vakuovým lisováním. [11]

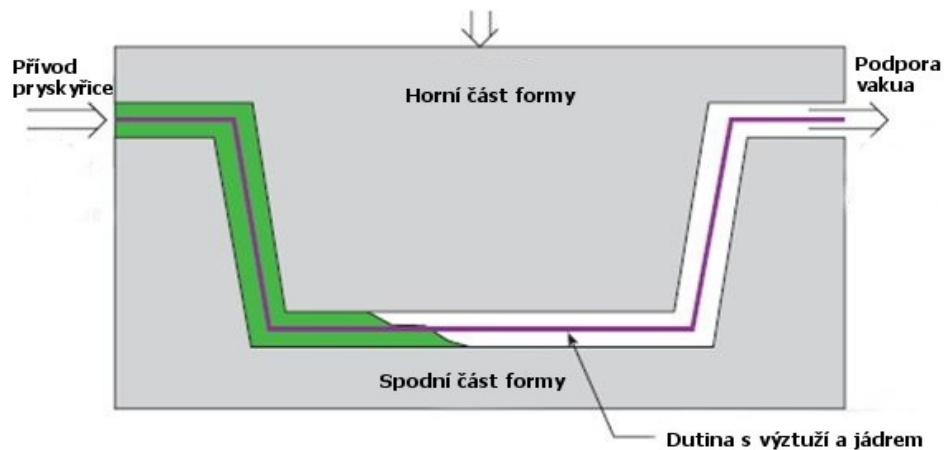


Obr. 11 Ukázka autoklávu. [12]

### 1.2.3 RTM technologie

K výrobě pomocí technologie RTM je potřeba dvoudílné formy, díky které je výrobek oboustranně pohledový. Suché výztuže společně s jádrem se postupně kladou do dutiny spodní části formy. Po uložení všech částí se forma uzavře pomocí horní části formy. Následuje vstříknutí pryskyřice pod tlakem. Vstříkovaná pryskyřice může být zahřívána kvůli snížení viskozity a je přiváděna až do chvíle, kdy dojde k zaplnění odtokových otvorů. Vytvrzování probíhá za pokojové teploty, ale může probíhat i za zvýšené teploty formy.

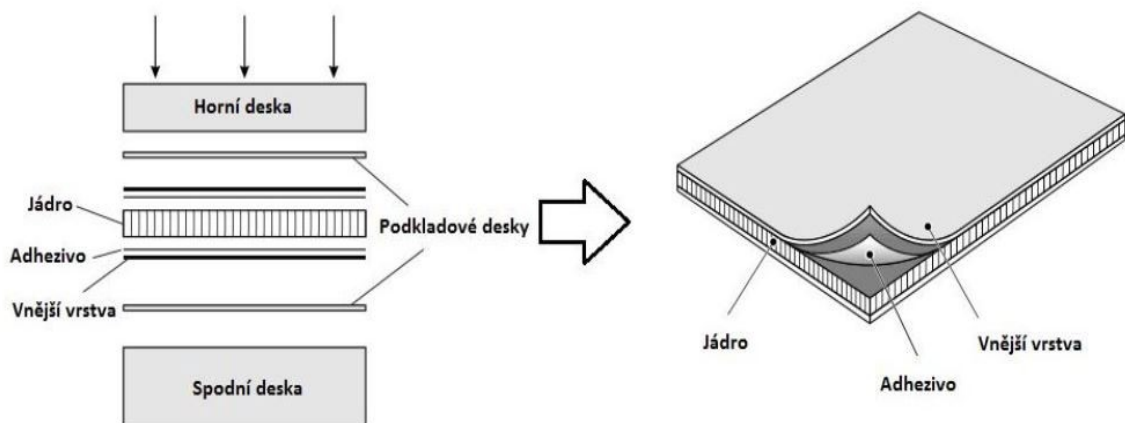
Vytvrzování by nemělo začít dřív než je forma zcela zaplněna pryskyřicí, aby nedošlo ke vzniku suchých míst nebo vzduchových bublin. V některých případech je možno použití vakua kvůli odstranění vzduchu z dutiny formy. Tato technologie se nazývá VA-RTM. [2],[10]



Obr. 12 Technologie RTM. [9]

#### 1.2.4 Lisování za tepla

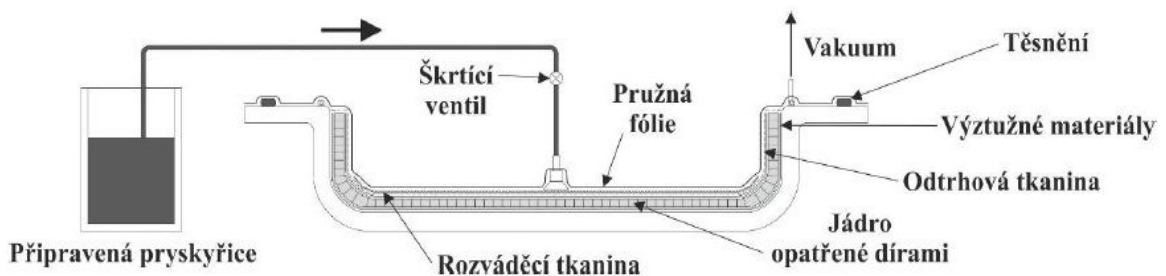
Technologie slouží především k výrobě sendvičových struktur s vnější vrstvou z prepregu nebo kovu. Principem je vložení jednotlivých materiálových částí do předehřátých lisovacích desek nebo do uzavřené formy. Po vložení následuje zalisování. Abychom dosáhli požadované teploty a tlaku používá se vyhřívání forem s vnějším mechanickým tlakem. Výhodou lisování je oboustranně pohledový výrobek a krátký výrobní cyklus. Naopak nevýhodou jsou vysoké provozní náklady z důvodu výroby kovové formy a provozu lisu. Technologie je vhodná pro velkosériovou výrobu. [10],[13]



Obr. 13 Lisování pomocí lisovacích desek. [13]

### 1.2.5 Vakuová infuze

Tato technologie používá pouze jeden díl formy, podobně jako vakuové lisování, ke kladení vrstev. Do formy jsou postupně kladeny suché materiály, které tvoří sendvičovou konstrukci. Dále jsou zde pomocné materiály (vrstvy), a to odtrhová tkanina, rozváděcí tkanina, vakuovací fólie a těsnění. Pomocí vakuovací fólie jsou všechny vrstvy slisovány. Pryskyřice je do formy přiváděna pomocí vakua a rozváděcí tkaniny. Vytvrzování probíhá při pokojové teplotě. Výhodou vakuové infuze je lepší poměr výztuže a pryskyřice oproti ručnímu kladení, a taky zamezení kontaktu obsluhy se škodlivými látkami, protože proces probíhá v uzavřeném systému. Nevýhodou může být vznik nenasycených míst. [9],[10],[14]



Obr. 14 Metoda vakuové infuze. [14]

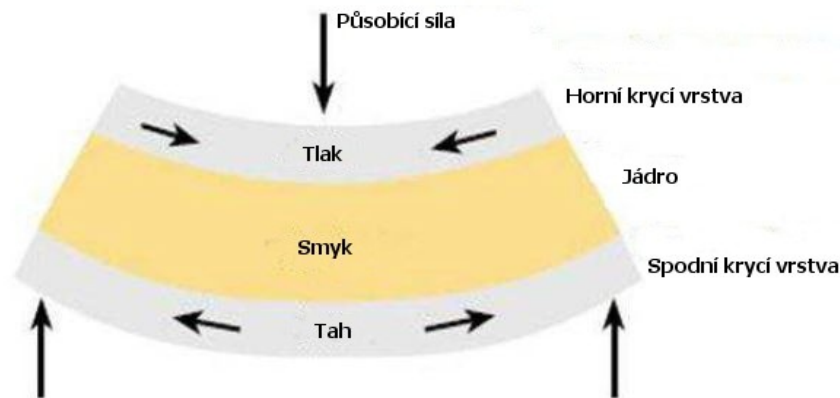
## 1.3 Vlastnosti sendvičových struktur

Hlavní a nejdůležitější vlastnosti sendvičových konstrukcí jsou mimo jejich nízkou hmotnost taky ohybová pevnost a tuhost. Dalšími výhodami jsou únavová odolnost, odolnost proti rázům, tepelná odolnost, tepelná a akustická izolace. Jedná se o vlastnosti, které výrazně ovlivňuje materiál jádra. Sendvičové konstrukce vždy nemusí být rovinné desky. Mohou vytvářet různorodé plochy s prolisy a výstupky. Pro tyto konstrukce je velmi nákladné použití kovových vnějších vrstev. Často se používají kompozitní vnější vrstvy. Složitost výrobku značně ovlivňuje také volbu vhodného jádra. Například pro zakřivené sendviče se používá voština se speciálními tvary buňky. (lasturový průřez, obdélníkový průřez, atd.). Lze taky použít tepelně zpracovanou pěnu. [5]

### 1.3.1 Ohybová pevnost a tuhost

Ohybová tuhost sendvičové konstrukce je přímo úměrná druhé mocnině jeho tloušťky. Zvětšující se tloušťka sendviče způsobuje jeho nepatrné zvýšení hmotnosti, zvětšuje se pouze tloušťka jádra. Ohybová pevnost taky roste s rostoucí vzdáleností vnějších vrstev.

Při dimenzování sendviče je nutné nezapomenout posoudit smykovou pevnost jádra. Pevnost jádra ve smyku roste s jeho hustotou. Pevnost sendviče v tlaku ve směru jeho tloušťky je ovlivněna především pevností jádra v tlaku, tuhostí a tloušťkou vnějších vrstev. Pevnost jádra v tlaku roste s jeho hustotou. Mechanické vlastnosti voštinových jader jsou lepší než u jader pěnových o stejné hustotě. [9],[15]



Obr. 15 Namáhání sendvičové konstrukce při ohybu. [8]

### 1.3.2 Tepelná odolnost a odolnost proti ohni

Už při samotném návrhu výrobku je nutné brát v potaz odolnou tepelnost všech složek sendvičové konstrukce, tedy jádra, vnějších krycích vrstev a lepidla. Na tepelnou odolnost má velký vliv tepelná vodivost použitých materiálů. Při vysoké tepelné vodivosti je ohřev sendviče nižší než při nízké při jednostranném ohřevu. Těchto vlastností se využívá zejména v kosmonautice, kde se používají hliníkové voštiny. Při navrhování sendvičových konstrukcí pro některé aplikace je nutné respektovat požadavky oborových konstrukčních předpisů na odolnost proti ohni. Všechny použité materiály musí mít atest na odolnost proti ohni. [9],[15]

### 1.3.3 Akustická izolace

Akustická izolace je fyzikální hodnota, která nám ukazuje rychlost poklesu zvukové energie na jedné straně, přičemž zdroj zvukové energie je na druhé straně. Vyjadřuje schopnost materiálu redukovat (absorbovat) zvukovou energii v decibelech. Pro tlumení zvuku jsou vhodné sendvičové konstrukce s vyšší hmotností. Panely s jádrem z minerální vlny mají lepší izolační schopnosti, než panely s jádrem z PUR pěny. [16]

## 2 POLYMERNÍ JÁDRA

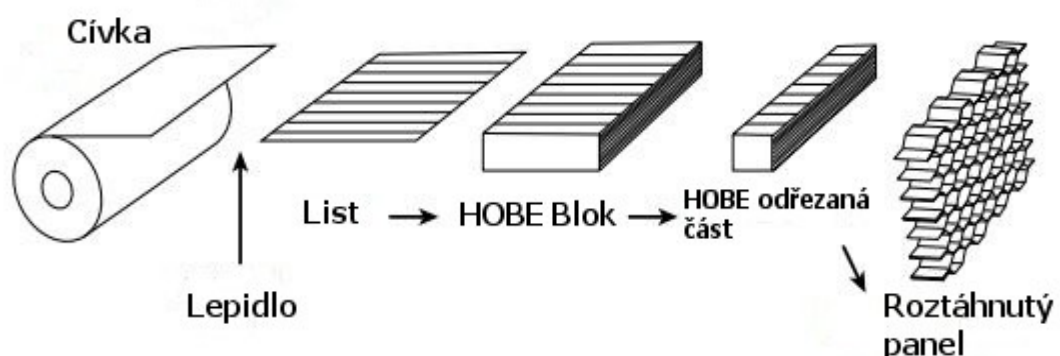
### 2.1 Výroba polymerních a 3D voštinových jader

Pro výrobu voštin existuje pět základních typů výroby. Je to adhezní spojování, odporové svařování, pájení, difúzní spojení nebo tepelnou fúzí. Použití těchto metod závisí na tom, jak jsou uzly voštin spojené. Nejčastějším způsobem výroby je adhezní spojení. Tímto způsobem je vyrobeno asi 95 % voštinových jader. Odporové svázení, pájení a difúzní spojení jsou používány pouze tam, kde jsou jádra vystaveny vysokým teplotám nebo náročným klimatickým podmínkám. Výroba je velmi nákladná. V uzlech jsou zahřívány aby se částečně roztavili a následně tlakem spojili dohromady. [17]

Přeměna plošného materiálu na voštinový probíhá dvěma základními výrobními postupy.

#### 2.1.1 Expanzní proces

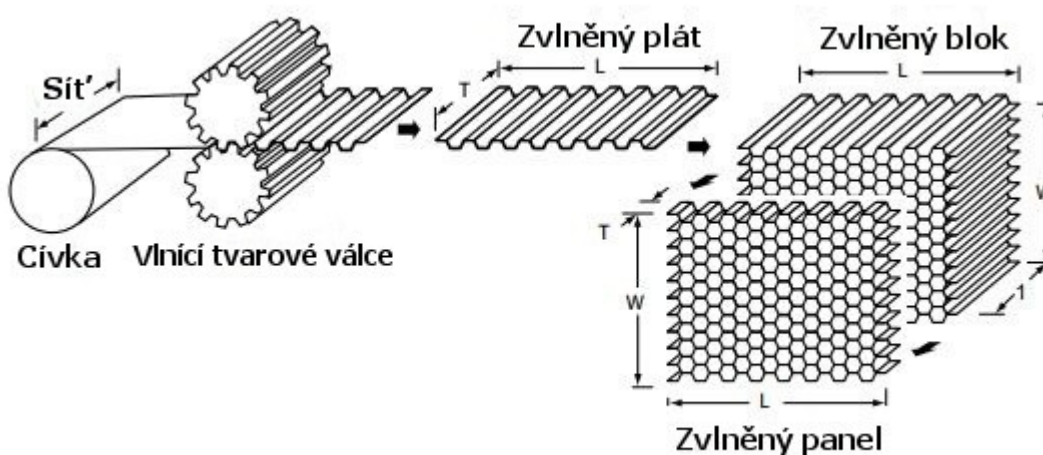
Výrobní proces roztáhnutého voštinového jádra začíná nanesením pruhů lepidla v rovnoměrných odstupech na pásy, které jsou následně na sebe rovnoběžně naskládány, a které se navzájem slepí pod tlakem nebo při zvýšené teplotě. Pro vytvrzení lepidla se vzniknutý blok roztáhne a pomocí řezačky se nařeže na požadovanou tloušťku. Druhý postup výroby spočívá v odřezání určité části z naskládaného bloku a následnému roztáhnutí této části. HOBE (z angl. Honeycomb Before Expansion) je voština před roztažením. Typ konfigurace buněk v roztáhnuté voštině závisí na výšce roztáhnutí. [18]



Obr. 16 Způsob výroby roztáhnutého voštinového jádra. [18]

### 2.1.2 Vrapování fólie

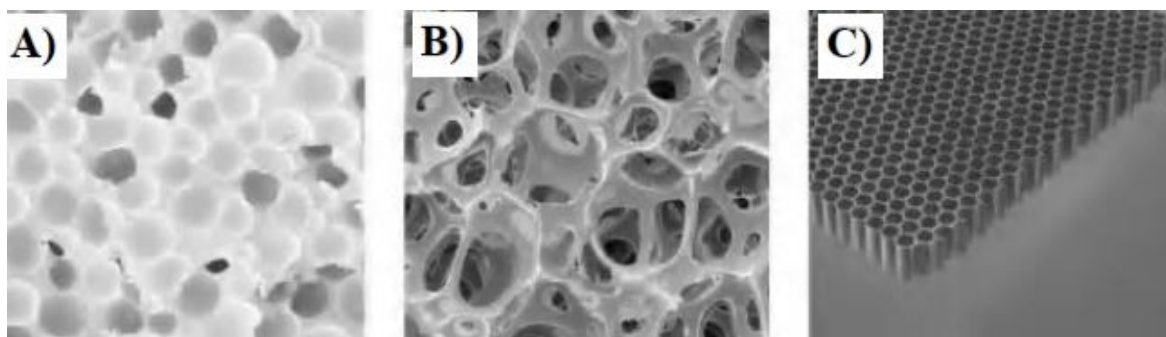
Dalším výrobním postupem je vrapování fólie. Pomocí této metody výroby voštinových jader může být voština vyrobena z kovových jader s vysokou hustotou nebo také z některých typů nekovových jader. Základem této technologie je spojení zvlněných plátů pomocí pryskyřice, které jsou naskládány na sebe a vytvrzené v peci. Jelikož na naskládání blok může být vyvinut jen malý tlak, adhezní vrstvy jsou větší v porovnání s expanzním jádrem. Ve skutečnosti může hmotnost pryskyřice být až 10% z celkové hmotnosti voštiny, přičemž v roztáhnutém jádru je to jen kolem 1%. [18]



Obr. 17 Výroba voštinového jádra technologií vrapování fólie. [18]

## 2.2 Druhy materiálů pro výrobu jader

Existuje velké množství materiálů pro výrobu jader. Nejznámějšími jsou polymerní pěny a voštinová jádra. Na následujícím obrázku můžeme vidět hlavní typy buněčných struktur.



Obr. 18 Typy buněčných struktur, A) 3D uzavřená buněčná struktura - pěna, B) 3D otevřená buněčná struktura - pěna, C) 2D buněčná struktura - voština. [14]



### 2.2.1 Polymerní pěnová jádra

- **Polyethylentereftalát (PET)**

PET pěny se řadí mezi termoplasty. Jejich typickými vlastnostmi je dobrá odolnost proti vysokým teplotám a chemická odolnost, vynikající přilnavost a mechanické vlastnosti, recyklovatelnost, kompatibilita se všemi typy kompozitních výrobních technik. V současnosti se využívá nová technologie "LITE" povrchové úpravy ke snížení absorpce pryskyřice. Tato technologie snižuje absorpci pryskyřice o 0,6 - 0,8 kg/m<sup>2</sup>. Vyrábí se v širokém rozmezí hustot od 60 do 200 kg/m<sup>3</sup> a je možné je zpracovávat téměř ve všech technologiích výroby sendvičových struktur. Typické aplikace PET pěn najdeme hlavně v námořním, dopravním a větrném průmyslu (vrtule větrných turbín). [8]



*Obr. 19 PET pěna. [19]*

- **Polyvinylchlorid (PVC)**

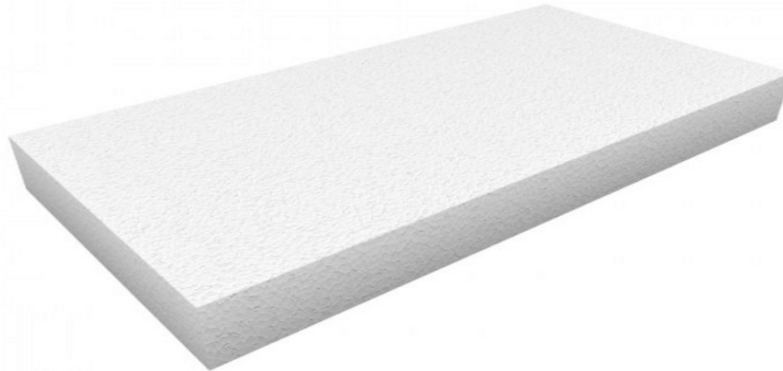
Dělí se na síťované a nesíťované. Nesíťované jsou v porovnání se síťovými tužší a ohebnější, ale mají nižší mechanické vlastnosti při stejné hustotě, taky mají sníženou odolnost proti zvýšeným teplotám. Obecně mají PVC pěny dobrou odolnost proti absorbování vody a vyvážené statické a dynamické vlastnosti. [20]



*Obr. 20 PVC pěna. [20]*

- **Polystyren (PS)**

Kvůli svým nízkým mechanickým vlastnostem se polystyrenové pěny nemohou používat pro výrobu konstrukčních prvků a vysokou pevností. Výhodou je jejich cena, dobrá tepelná izolace a nízká hmotnost. PS pěny nemohou být používány v systému společně s polyesteryovými pryskyřicemi, protože by byly rozpuštěny styrenem obsaženým v pryskyřici. Vyrábí se v hustotách od 15 do 300 kg/m<sup>3</sup>. [20]



*Obr. 21 PS pěna. [19]*

- **Polyuretan (PUR)**

Z důvodu nižších mechanických vlastností je jejich použití omezené. Používají se zejména v méně zatěžovaných sendvičových panelech, používaných hlavně jako tepelná izolace. Jsou lehce opracovatelné do požadovaných tvarů a profilů. Typická aplikace je použití PUR jako výplň hran při výrobě letadel a lodí, nebo jako omezovače nárazů při crash-testech. Dále mohou sloužit jako jádra pro RTM. Vyrábějí se v hustotách od 30 do 500 kg/m<sup>3</sup>. [20]

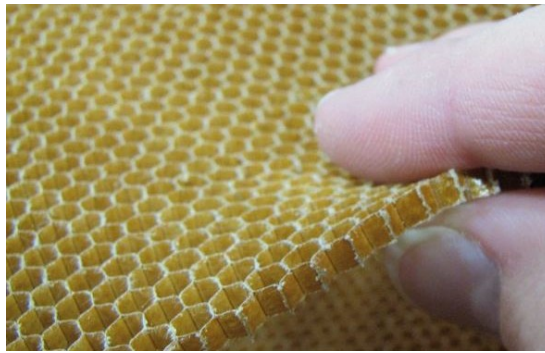


*Obr. 22 Forma z PUR pěny. [19]*

### 2.2.2 Voštiny

- **Nomexové voštiny**

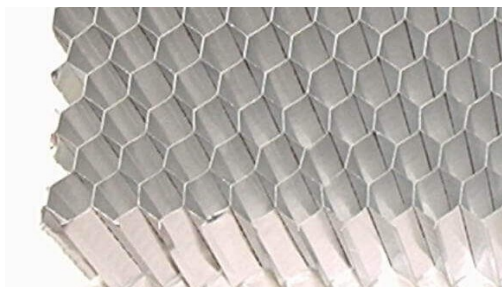
Základ aramidových voštin tvoří nomexový papír, který je tvořený kevlarovým nebo celulózovým vláknem. Vytvořená papírová voština je namáčena do fenolické nebo polyesterové pryskyřice, a tím vznikne voštinové jádro s vysokou pevností a velmi dobrou odolností proti ohni. Tyto voštiny mají široké uplatnění v různých průmyslech, obzvláště pak v leteckém průmyslu, kde se používají jako panely v interiérech letadel. Některé druhy aramidových voštin mají vyplněné buňky jádra fenolickou pěnou, čímž se zvýší adhezní plocha a systém funguje jako izolace a zároveň se sníží jejich hořlavost. [22]



*Obr. 23 Aramidová (nomexová) voština. [23]*

- **Hliníkové voštiny**

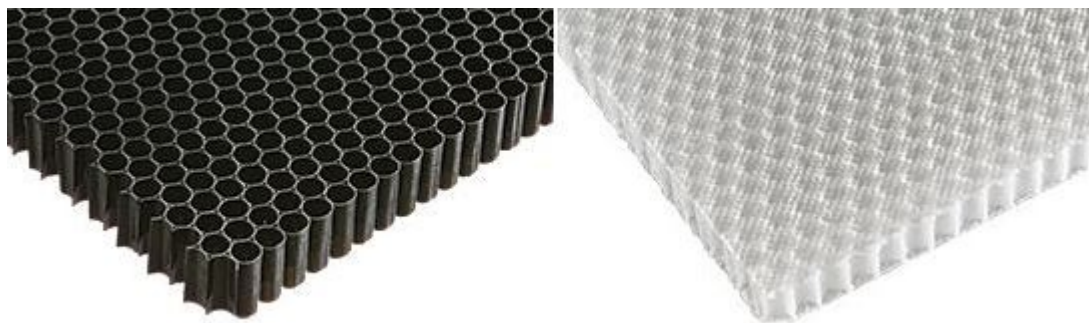
Patří mezi nejlepší konstrukční materiály vzhledem k pevnostnímu a hmotnostnímu poměru. Existují různé konfigurace adhezních spojení hliníkové fólie, což má za následek velké množství geometrických tvarů buněk. Vlastnosti buněk mohou být ovlivňovány změnou tloušťky fólie a změnou velikosti buňky. I přes své dobré mechanické vlastnosti se hliníkové voštiny v některých případech musí používat s opatrností. Jde například o použití v lodním průmyslu, kde po kontaktu se slanou vodou může dojít ke korozi. Další nevýhodou, která má vliv na snížení mechanických vlastností je deformace jádra po nárazu. Krycí vrstva se vrátí do původního stavu, ale voštinové jádro zůstane trvale zdeformované. [24]



*Obr. 24 Hliníková voština. [24]*

- **Termoplastické voštiny**

Termoplastická typy voštin mají nízkou hmotnost a je jednodušší jejich recyklace. Hlavní nevýhodou je náročné dosažení dobrého spojení mezi voštinou a vnějším krycí vrstvou. Jejich použití v namáhaných konstrukcích je minimální, spíše se používají v jednoduchých interiérových panelech. Nejběžněji používané materiály jsou PP, PC, ABS a PE. PC se vykazuje vynikajícími dielektrickými vlastnostmi, odolností proti korozi a vlhkosti, malými velikostmi buněk s vysokou hustotou a používá se při protipožárních aplikacích. U PP je hlavní výhodou vysoký poměr pevnosti k hmotnosti, schopnost tlumit vibrace a zvuk, absorpce energie a recyklovatelnost. [26]



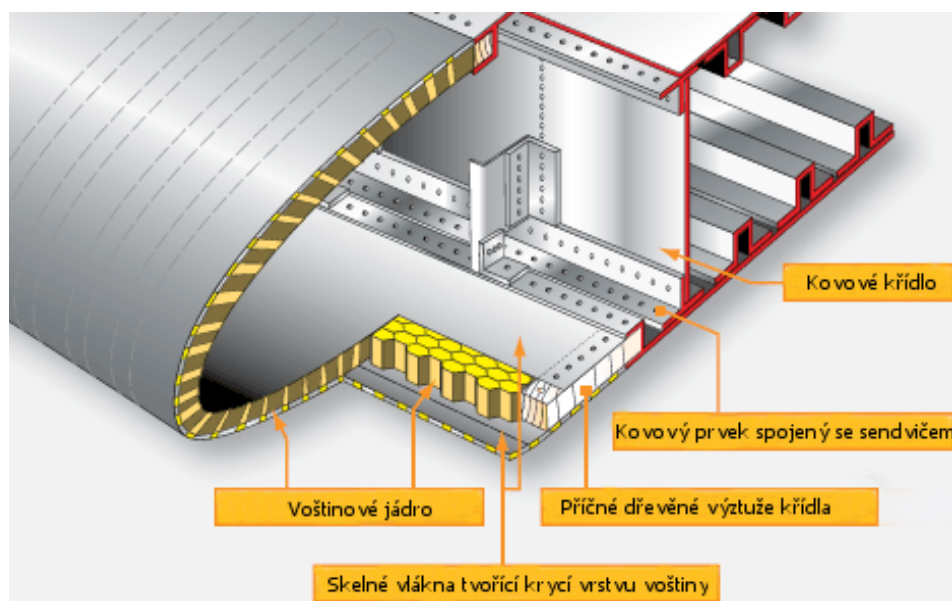
*Obr. 25 Polykarbonátová voština (vlevo) a polypropylenová voština (vpravo). [26]*

### 3 POUŽITÍ SENDVIČOVÝCH STRUKTUR

Sendvičové materiály nacházejí uplatnění v mnoha oblastech průmyslu. Především tam, kde je potřeba snížit hmotnost, vyztužit konstrukci nebo další potřeby, které konvenční materiály nenabízí. Nejčastěji se používají v leteckém a kosmickém průmyslu. Dále pak v lodním, stavebním, kolejovém nebo automobilovém průmyslu. Speciální uplatnění pak najdeme ve sportovním odvětví, kde se sendvičové struktury používají u výroby lyží, snowboardů, pingpongových pálek, kajaků a pro kanoe. Pěnové materiály se aplikují do ráfků kol ke snížení váhy a zlepšení boční tuhosti kola.

#### 3.1 Letecký průmysl

V leteckém průmyslu a kosmonautice je používání sendvičových struktur velmi oblíbené vzhledem k jejich hlavním výhodám, jež jsou velmi vysoká ohybová pevnost a tuhost při zachování nízké hmotnosti. Sendviče jsou používány pro výrobu konstrukcí letadel a spousty jejich komponentů, jako jsou křídla, vrtule, podvozek, podlahy, dveře apod. Interiér letadla pak tvoří například sedadla, palubní mechanismy, potahy. [27]



Obr. 26 Využití sendviče v křídle letadla. [28]

#### 3.2 Lodní průmysl

V lodním průmyslu mají sendviče široké využití. Můžeme je najít u závodních člunů, výletních lodích, jachtách nebo i na vrtných plošinách. Velké využití mají sendviče s pěnovým jádrem, splňující požadavky na vzpěr a mají dobrou odolnost vůči mořské vodě. Lze

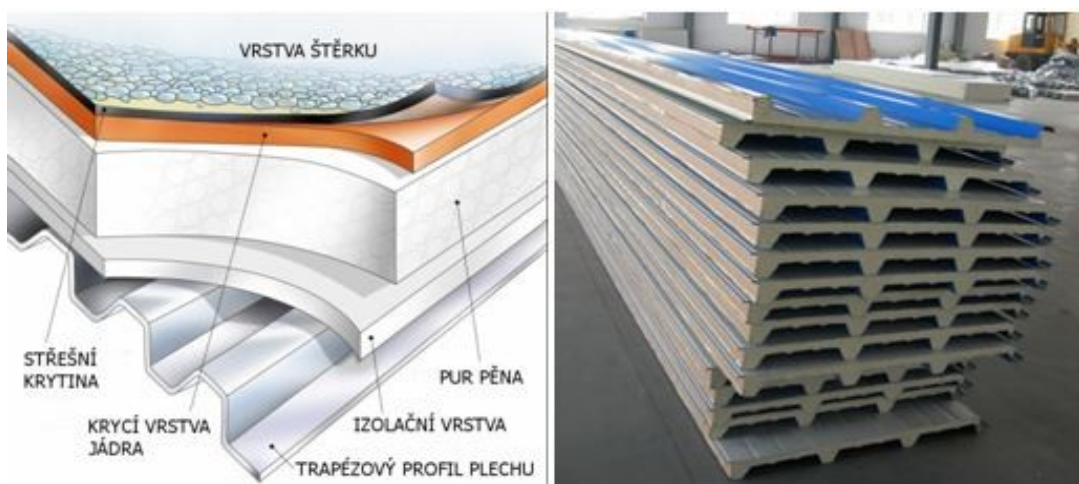
využít i hliníkové voštiny, protože nabízí vysoký poměr pevnosti k hmotnosti s poměrně nízkými náklady. Další prvky jsou v podobě panelů a přepážek, které tvoří interiér i paluby. Mohou tvořit i celé trupy lodí. [27]



*Obr. 27 Univerzální loď "Austal HSSV 72" vytvořena zejména pomocí hliníkových voštin. [29]*

### 3.3 Stavební průmysl

Sendvičové struktury jsou používány také ve stavebním průmyslu, a to zejména díky své výborné tepelné a zvukové izolaci. Používají se zejména pěnová jádra. Mezi důležité vlastnosti patří jejich vysoká pevnost při zachování nízké hmotnosti, odolnost vůči korozi, vlhkosti a UV záření a mnoho dalších. Ve stavebnictví je možné najít celou řadu jejich využití. Jsou to střechy, stěny, venkovní obložení, střešní díly, kancelářské příčky, schodiště nebo jako konstrukční profily při stavbě průmyslových budov. [30]



*Obr. 28 Střešní panely plněné PUR pěnou. [30]*

### 3.4 Automobilový průmysl

Hlavním důvodem využívání sendvičových struktur v automobilovém průmyslu jsou stále větší požadavky na odlehčení automobilů. Hlavními výhodami používání sendvičových struktur jsou zvýšení bezpečnosti, lepší aerodynamický design, úspora hmotnosti, vyšší pevnost a nižší nároky na údržbu, jelikož sendviče mají vysokou odolnost proti korozi a poškození chemikáliemi. Nejčastější výrobky jsou nárazníky, dveře, podlahy, panely a střechy automobilů i autobusů. [9],[27]



*Obr. 29 Vojenské vozidlo "Panther Command Vehicle" se speciálním podvozkem z hliníkové voštiny odolné proti výbušninám. [24]*

### 3.5 Železniční průmysl

V železniční dopravě bývají voštinové panely používány jako podlahy, dveře, přístupové rampy, stropy ale i jako bezpečnostní prvky pro absorpci energie. Najdeme je v interiérech vysokorychlostních vlaků, metra, tramvají nebo osobních vlaků. Využívány jsou opět zejména kvůli nízké hmotnosti, vysoké pevnosti a tuhosti, nehořlavosti a taky slouží jako zvuková izolace. [27]



*Obr. 30 Vysokorychlostní vlak "Hitachi Class 800". [31]*

## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**



## 4 CÍLE PRÁCE

Cílem praktické části diplomové práce je návrh a výroba kompozitních sendvičových konstrukcí s různou hustotou jádra. Dále je zaměřena na testování mechanických vlastností a jejich následnému srovnání, jak hustota jádra ovlivňuje mechanické vlastnosti. Zjišťování mechanických vlastností bude prováděno pomocí zkoušky tříbodovým ohybem a zkoušky hořlavosti žhavou smyčkou.

Mezi hlavní cíle diplomové práce patří:

- Výroba sendvičových konstrukcí a příprava zkušebních těles.
- Testování tříbodových ohybem.
- Zkouška hořlavosti žhavou smyčkou.
- Vyhodnocení a diskuze výsledků.

## AKTUÁLNÍ STAV DANÉ PROBLEMTIKY

### **Dynamic Response of Soft Core Sandwich Beams with Metal-Graphene Nanocomposite Skins (autor: M. A. R. Loja)**

Sendvičové struktury s mřížkovým jádrem vyztuženým voštinou byly zkoumány v podmínkách komprese v rovině, ve srovnání s sendvičovými strukturami s plástovým jádrem nebo mřížkovým jádrem. Experimentální výsledky ukázaly, že kombinované jádrové sendvičové vzorky vykazují vynikající nosnost, tuhost, absorpci energie a specifickou tuhost, které jsou rozhodující pro letecké aplikace a jiné lehké konstrukce.

Výsledky ukázaly, že interakce mezi voštinovým pláštěm a mřížkou poskytuje vysokou odolnost před poškozením než jednoduché jádro. Na jedné straně byla oblast mezifázového kontaktu a mezifázová houževnatost výrazně zvýšena výstupem z hliníkových plástů. Na druhé straně byl zajištěn vysoký moment setrvačnosti silnou mřížkou, aby se zabránilo místnímu vzpěru. Kombinace plástů a mřížky proto zabraňovala jak oddělování povrchu, tak i lokálnímu vzpěru jádra. Poté studie parametrů ukázaly, že tloušťka voštinové stěny, tloušťka plechu a výška jádra by měly postupně vyšší vliv na kritické zatížení sendviče.

Stručně řečeno, tato studie ukázala, že sendvičové struktury s mřížkovým jádrem zpevněné voštinou jsou schopny poskytnout vynikající mechanické vlastnosti pro různé aplikace.

[35]

**Effect of Core Material Stiffness on Sandwich Panel Behavior Beyond the Yield Limit (autor: Salin N. Akour, Hussein Z. Maaitah)**

Materiál jádra se měnil kvůli studiu jeho vlivu na chování sendvičového panelu. Pokud jádro začne vystupovat z konstrukce zvyšuje se tím jeho maximální napětí a začíná klesat maximální namáhání. To znamená, že zátěž se přenáší na čelní vrstvu. Je to hlavní výhoda zvýšení zátěže za hranici výtěžnosti materiálu jádra. Čím více je měkčí materiál zatížen, tím více přechází zatížení z jádra na vnější vrstvu a jádro začíná vystupovat. Je zřejmé, že únosnost panelu se zvyšuje s rostoucí tuhostí materiálu. Stříhové namáhání vzhledem k zatížení se snižuje s nárůstem zatížení. Deformace funguje jako mechanismus, který převede přebytečné zatížení na vnější vrstvy. Rozložené zatížení nad zatíženou oblastí se stává reakční silou soustředěnou na ploše, kde jsou hraniční podmínky. Distribuované zatížení je převedeno na koncentrované zatížení, takže oblast kde jsou hraniční podmínky dosáhne vytižení namáháním než jiné části panelu. [36]

**Composite sandwich structures with rapid prototyped cores (autor: Richard R. Williams, William E. Howard, Scott M. Martin)**

Možnost použití technologií RP (rapid prototyping) k výrobě jader pro kompozitní sendvičové struktury. Vlhkost charakterizovala proveditelnost umístování geometrie do jádrové struktury, která by umožnila optimalizaci mechanických vlastností, jako je tuhost nebo pevnost. Na základě zatížení při výpadku a tuhosti v ohybu se ukázaly kompozitní sendvičové struktury vyrobené z jader SLA (stereolitografie) nejvhodnější díky vynikající vnitřní síle a adhezi k uhlíkovým epoxidovým povlakům. 3DP (3D printing) a FDM (fused deposition modeling) jádra se ukázaly být méně použitelné. Kompozitní sendvičové konstrukce vyrobené z vlnitých 3DP jader a plochých SLA jader a selhaly v důsledku křehkosti. Kompozitní sendvičové struktury vyrobené z plochých FDM jader byly provedeny ve formě plochých jader SLA, a v důsledku špatné přilnavosti mezi ABS materiálem jádra a epoxidem.

Zatímco jádra FDM byly špatně provedeny v porovnání s jádry SLA, vlnité FDM jádra převyšovaly ploché FDM jádra výrazně nad rámec předpokládaných teorií. Vzhledem k tomu, že proces FDM je nejpřitažlivější z hlediska výrobních nákladů a dostupnosti, studie mechanismu selhání souvisejícího s tímto chováním a úsilí o zlepšení adheze mezi jádry a vnější vrstvou vyžaduje další studium. [37]

**Theoretical prediction of the stiffness and failure strength of stitched foam-core sandwich composites (autor: Yuanchun Ma, Haitao Han, Zixing Lu, Wenshu Lu, Tao Qiu, Junhong Guo)**

Studie se zaměřují na rovnoměrné šití sendvičových panelů s pěnovým jádrem s kevlarovými vnějšími vrstvami. Vnější vrstvy mají skladbu [45/-45/0/90/0/-45/45]. Tloušťka každé vrstvy se po šití změní z 0,155 mm na 0,175 mm. Pevná uzavřená pěnová pěna je ROHACELL 5 IWF s tloušťkou jádra 7 mm.

Pro ověření přesnosti této metody je vytvořen trojrozměrný model konečných prvků komerčním softwarem ANSYS 11.0. Model RVE je zcela zalomený na tuhý tvar čtyřúhelníku. Některé prvky v oblasti pryskyřicové kapsy a oblasti vláken jsou vylepšeny pro koncentraci napětí. Konvergenční výsledky jsou získávány z více a více hustých prvků.

Výsledky ukazují vysokou konzistenci a maximální relativní chybu s experimentálními výsledky a výsledky FEM jsou v rozmezí 8,2% a 7,7%. Účinné moduly zešité sendvičové desky se porovnávají s metodami MT (Mori-Tanaka) 23 a metodou FEM. Porovnáním s experimentálními výsledky jsou relativní chyby tohoto modelu v rozmezí 10% , což dokazuje přesnost tohoto modelu.

Počáteční pevnosti při selhání sendvičové desky s pěnovým jádrem jsou podle předkládaného modelu předpovídány při plochém stlačení, příčném stlačení, příčném smyku a tříbovým zatížením v ohybu. Je zřejmé, že maximální relativní chyba je v rozmezí 15%, což rovněž ukazuje platnost současného modelu. [38]

## 5 METODY TESTOVÁNÍ SENVIČOVÝCH STRUKTUR

Mechanické vlastnosti jsou finální vlastnosti daného materiálu, které podmiňují jeho vhodnost pro použití v praxi nebo pro určeno funkci. Poznání a zlepšování konstrukčních materiálů a jejich vlastností je motivováno jejich využitím při výrobě strojů a zařízení.

### 5.1 Zkouška ohybem

Zkouška slouží ke zjištění mechanických vlastností. Její význam u houževnatých materiálů není příliš velký, protože zkoušené tělesa se doformují a tudíž není možné stanovit výslednou pevnost, jelikož nedochází k lomu. Největší význam má zkouška u křehkých materiálů, u kterých je možno z průhybu určit deformační schopnost. Tato zkouška je popsána normou ČSN EN ISO 14125 nebo americkou normou ASTM C393. [32]

Působí-li síla  $F$  uprostřed zkušební tělesa, pak při vzdálenosti podpěr  $l$  je maximální ohybový moment dán vztahem:

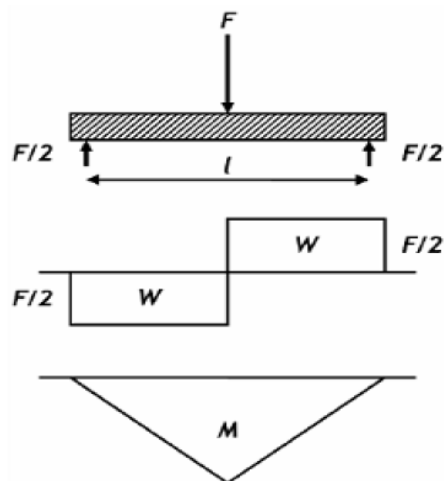
$$M_{omax} = \frac{F \cdot l}{4} \quad (1)$$

Největší napětí se stanoví ze vztahu:

$$\sigma_{omax} = \frac{M_{omax}}{W_o} \quad (2)$$

#### 5.1.1 Tříbodová zkouška ohybem

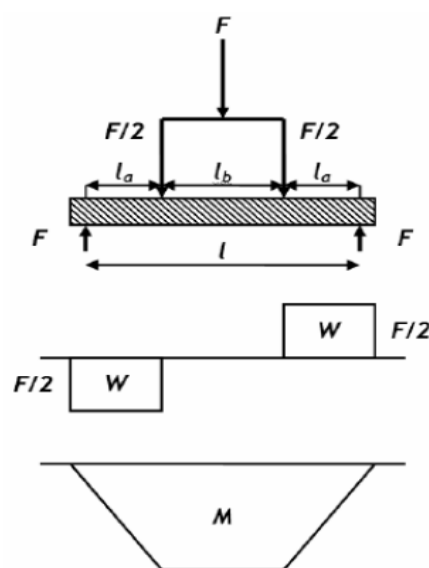
Tato zkušební metoda vychází z normy ASTM C393, která je vhodná pro sendvičové konstrukce. Norma přesně definuje, jak mají vypadat zkušební tělesa a taky charakterizuje rozměry na zkušebním stroji, jako je např. vzdálenost podpěr. Při tříbodovém ohybu je těleso podepřeno na dvou podporách a je konstantní rychlostí prohýbáno trnem. Ve zkušebním tělese tak nastává napjatost s maximálním zatížením a přesně daným místem lomu. Výsledkem této zkoušky jsou i ohybové křivky síla (napětí) - průhyb (deformace v %), ze kterých se vyhodnocují potřebné charakteristické hodnoty. [33]



Obr. 31 Průběh ohybového momentu u tříbodové zkoušky ohybem. [33]

### 5.1.2 Čtyřbodová zkouška ohybem

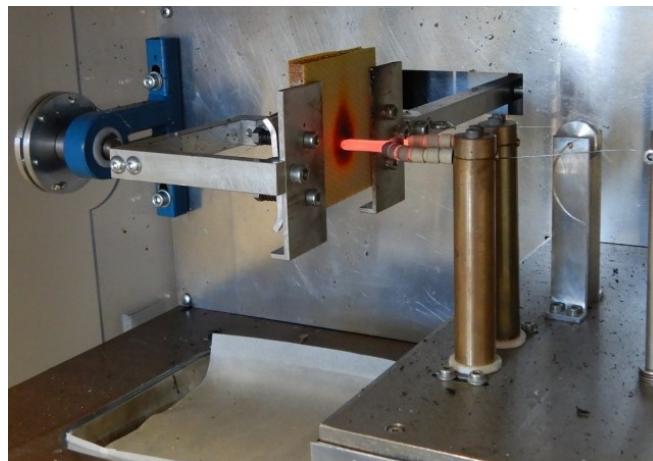
Rozdíl od tříbodového ohybu spočívá v přidání druhého trnu. Zkoušené těleso je tedy ohýbáno dvěma trny, které jsou symetricky umístěny, což způsobuje, že ohybový moment je konstantní po celé délce tělesa. Výrazně je sníženo lokální zatížení, u kterého může vzniknou místní promáčknutí. Čtyřbodová zkouška ohybem má vyšší vypovídající hodnotu pevnosti v ohybu. Těleso je porušeno ve střední třetině mezi oběma silami od zatížení. Jelikož jsou v této části nosníku posouvající síly rovny nule, dojde k porušení v oblasti namáhání čistým ohybem. [33]



Obr. 32 Průběh ohybového momentu u čtyřbodové zkoušky ohybem. [33]

## 5.2 Zkouška žhavou smyčkou

Zkouška žhavou smyčkou se provádí dle normy ČSN EN 60695-2-12. Jde o požární zkoušku, která používá bezplamenný zdroj zapálení. Žhavá smyčka je speciální smyčka z odporového drátu, která se zahřívá na danou teplotu. Hrot žhavé smyčky se na určitou dobu přivede do kontaktu se zkušebním vzorkem a provede se řada pozorování a měření. Výsledkem je charakteristická hodnota patřící do vlastností kompozitu. Rozmezí teplot pro zkoušky žhavou smyčkou je od 550 °C do 960 °C. [34]



Obr. 33 Zkouška žhavou smyčkou.

### Pozorování a měření:

Zkušební vzorek se pozoruje po dobu působení žhavé smyčky a 30 s po oddálení, také se musí pozorovat hedvábný balicí papír umístěný pod zkušebním vzorkem a musí se zaznamenat tyto údaje:

- 1) doba  $t_R$  nejdéle trvajících nepřerušovaného hoření plamene nebo žhnutí pozorovaného po oddálení hrotu žhavé smyčky od zkušebního vzorku
- 2) doba  $t_V$ , která uplyne od začátku působení hrotu žhavé smyčky do okamžiku, kdy plameny během doby působení nebo po jejím uplynutí uhasnou
- 3) maximální výška plamenů, mimo plamen v okamžik zapálení, kdy může na dobu 1 s vzniknout vysoký plamen
- 4) pokud tělísko při zkoušce vyhoví proto, že většina plamenně hořícího materiálu se odstraní při oddálení žhavé smyčky, musí se vše zaznamenat do protokolu
- 5) jakékoli zapálení specifikované podložky umístěné pod vzorkem [34]

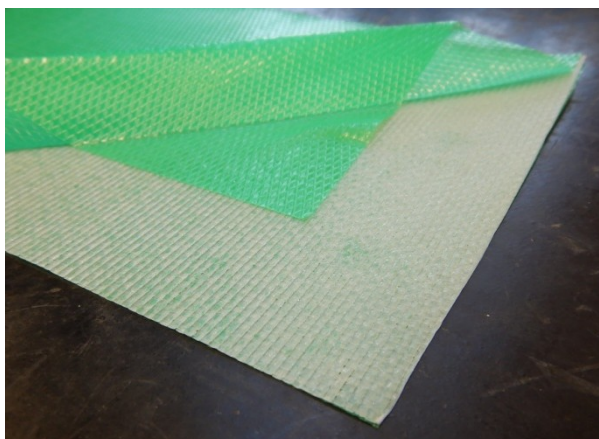
## 6 VÝROBA ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ

Výroba zkušebních vzorků probíhala v Laboratorním centru Fakulty technologické Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně. Zkušební vzorky byly vyrobeny z materiálů které jsou dostupné a v současné době se používají ve výrobním průmyslu.

### 6.1 Použité materiály

#### 6.1.1 Prepreg VV320P-DT806R-37

Jde o prepreg, který se skládá ze skelné tkaniny nasycené epoxidovou pryskyřicí. Nabízí široký rozsah vytvrzovacích teplot od 65 °C do 140 °C. Hlavní složkou je pryskyřice s nízkou viskozitou, ta je vhodná pro tkaniny a taveniny. Hlavní předpoklad použití je v námořním a sportovním průmyslu. Klíčovou vlastností termosetové epoxidové pryskyřice DT806, je kombinace reaktivity při vytvrzení, všestranné zpracování a dostupnost v textilním a jednosměrném vláknitém formátu. [Příloha PI]



Obr. 34 Prepreg VV320P-DT806-37.

#### 6.1.2 Prepreg Gurit PHG 840-300-42

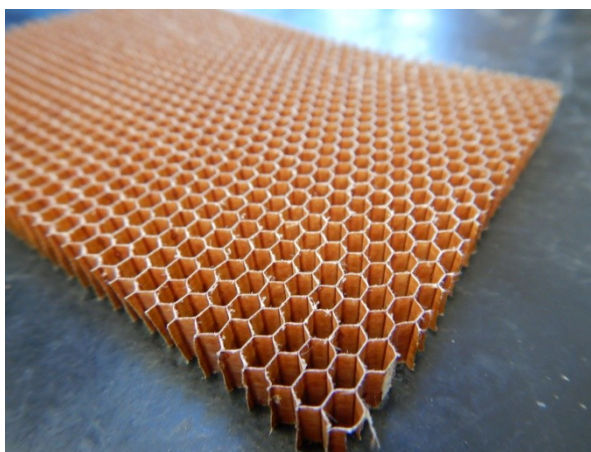
Jedná se o modifikovaný fenolický prepreg bez halogenů s dobrou kvalitou povrchu. Materiál byl pro vyvinut námořní, automobilové a železniční aplikace s vysokými specifickými mechanickými vlastnostmi a vynikajícím chováním FST (vynikající chování při požáru, kouři a toxicitě). Teplota vytvrzování je od 120 °C do 160 °C. Je vhodný pro kompozitní konstrukce, které dosahují provozních teplot od -55 °C do 80 °C. Prepreg musí být skladován při nízkých teplotách, neboť nízká teplota snižuje reakci pryskyřice. Nicméně dokonce i při -18 °C pryskyřice stále reaguje, takže ve většině případů bude materiál po několika letech nepoužitelný. [Příloha PII]



*Obr. 35 Prepreg Gurit PHG 840-300-42.*

### 6.1.3 Nomexová voština CORMASTER C2

Jádro sendvičové konstrukce tvoří voština s názvem CORMASTER C2 vyrobená z listů papíru Nomex® T722, které jsou spojeny a pokryty fenolickou pryskyřicí. Tvar buněk je hexagonální s šířkou jedné buňky 3,2 mm. Výhodou je vysoká tepelná odolnost nebo dobré mechanické vlastnosti vzhledem k poměru pevnosti a hmotnosti. Pro výrobu zkušebních těles byla použita voština o tloušťce 8 mm a s hustotou 32, 48 a 64 kg/m<sup>3</sup>. [Příloha PIII]



*Obr. 36 Nomexová voština CORMASTER C2.*

## 6.2 Použitá zařízení

### 6.2.1 Laboratorní vyhřívaný lis

Pro výrobu vzorků sendvičových struktur byl použit laboratorní vyhřívaný lis. Lis se skládá ze dvou izolačních a temperovaných desek. Před začátkem lisování byl lis vytemperován na teplotu 160 °C pro výrobu zkušebních těles z prepregu s fenolickou pryskyřicí a poté byla teplota snížena na 150 °C pro výrobu zkušebních těles z prepregu s epoxidovou



pryskyřicí. Jako separátor byl použit papír na pečení. Výsledná tloušťka vylisovaných desek byla 8,3 mm.



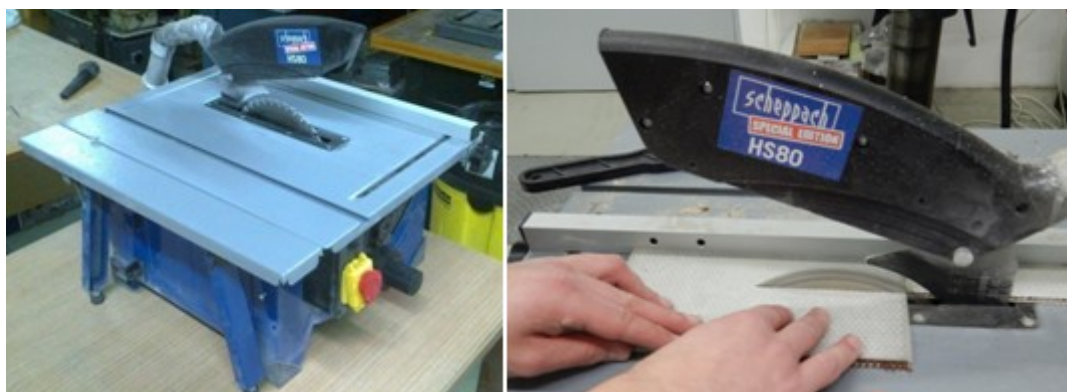
Obr. 37 Laboratorní vyhřívání lis.

Tab. 1: Technické údaje laboratorního lisu

Rozměry desek	250 × 250 mm
Příkon	2400 W
Teplota max.	200 °C
Svírací síla	5 t

### 6.2.2 Stolní pila Scheppach HS 80

Po skončení lisování sendvičových panelů následovalo jejich nařezání na přesné rozměry pro zkoušku třibodovým ohybem a zkoušku žhavou smyčkou. Zvolený rozměr zkušebních těles byl pro zkoušku třibodovým ohybem 180 × 30 mm a pro zkoušku žhavou smyčkou 75 × 75 mm.



Obr. 38 Stolní pila Scheppach HS 80.

### 6.2.3 Univerzální zkušební stroj ZWICK 1456

Zkouška třibodovým ohybem probíhala na univerzálním zkušebním stroji Zwick 1456 s použitím programu TestXpert II při teplotě 25 °C. Průměr trnu i podpěr byl 10 mm. Vzdálenost mezi podpěrami byla 130 mm a rychlost posuvu trnu 6 mm/min.



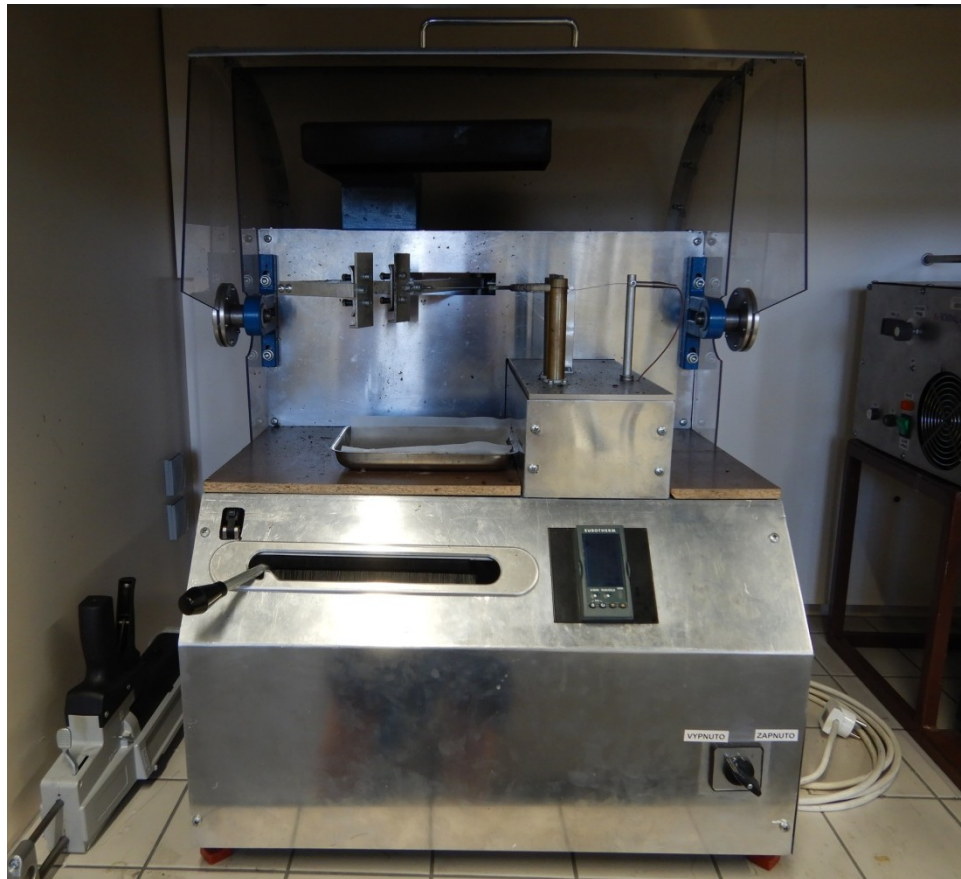
Obr. 39 Univerzální zkušební stroj ZWICK 1456.

Tab. 2: Technické údaje zkušebního stroje ZWICK 1456

Maximální posuv příčnicku	800 mm/min
Snímače síly	2,5 a 20 kN
Tepelná komora	-80/+250 °C
Možnosti testů	tah/tlak/ohyb

#### 6.2.4 Zařízení pro zkoušku žhavou smyčkou

Hlavní součástí je žhavená smyčka o normalizovaných rozměrech. Zahřívání smyčky způsobuje průchod proudu o nízkém napětí, který vychází z transformátoru. Používají se teploty do 960 °C a proudy do 130 A. Je to zařízení s programovatelným ovládním určené ke zkouškám odolnosti proti teple a hoření.



*Obr. 40 Zařízení pro zkoušku žhavou smyčkou.*

## 7 EXPERIMENTÁLNÍ TESTOVÁNÍ

### 7.1 Zkouška třibodovým ohybem

Zkouška byla realizována při teplotě 25 °C. Jednotlivé vzorky byly postupně vkládány do testovacího stroje na podpěry. Proběhlo měření a vyhodnocení naměřených výsledků pomocí programu TestXpert II.

Pro vyhodnocení měření byly použity statistické ukazatele:

- 1) Aritmetický průměr -  $\bar{x}$
- 2) Směrodatná odchylka -  $s$
- 3) Chyba měření
- 4) Medián - MEDIÁN

Z výsledků byla použita následující data:

- 1) Efektivní modul pružnosti v ohybu -  $E$  [MPa]
- 2) Mezní pevnost v ohybu -  $\sigma$  [MPa]

Z vyhodnocených dat pro vzorky z epoxidové pryskyřice vyplývá, že efektivní modul pružnosti v ohybu dosahuje nejvyšší hodnoty u vzorku EPOX C2-64 ( $2540 \pm 211$ ) MPa, naopak nejnižší u vzorku EPOX C2-32 ( $1900 \pm 303$ ) MPa. Mezní pevnost v ohybu je také nejvyšší u vzorku EPOX C2-64 ( $17,6 \pm 2,7$ ) MPa a nejnižší u vzorku EPOX C2-32 ( $9,1 \pm 0,9$ ) MPa.

*Tab. 3: Vypočtené hodnoty ohybové zkoušky pro vzorky z epoxidové pryskyřice - efektivní modul pružnosti v ohybu*

Efektivní modul pružnosti v ohybu - $E$ [MPa]				
n = 15	$\bar{x}$	s	Chyba měření	MEDIÁN
EPOX C2-32	1900	303	15,9	1755
EPOX C2-48	2200	74,6	3,3	2220
EPOX C2-64	2540	211	8,3	2510

Tab. 4: Vypočtené hodnoty ohybové zkoušky pro vzorky z epoxidové pryskyřice - mezní pevnost v ohybu

Mezní pevnost v ohybu - $\sigma$ [MPa]				
n = 15	$\bar{x}$	s	Chyba měření	MEDIÁN
EPOX C2-32	9,1	0,9	9,4	8,9
EPOX C2-48	15,1	1,9	13,1	15,8
EPOX C2-64	17,6	2,7	15,2	17,7

Z vyhodnocených dat pro vzorky z epoxidové pryskyřice vyplývá, že efektivní modul pružnosti v ohybu dosahuje nejvyšší hodnoty u vzorku FENOL C2-64 ( $2950 \pm 320$ ) MPa, naopak nejnižší u vzorku FENOL C2-32 ( $1440 \pm 84$ ) MPa. Mezní pevnost v ohybu je také nejvyšší u vzorku FENOL C2-64 ( $19,4 \pm 1,4$ ) MPa a nejnižší u vzorku FENOL C2-32 ( $6,8 \pm 0,9$ ) MPa.

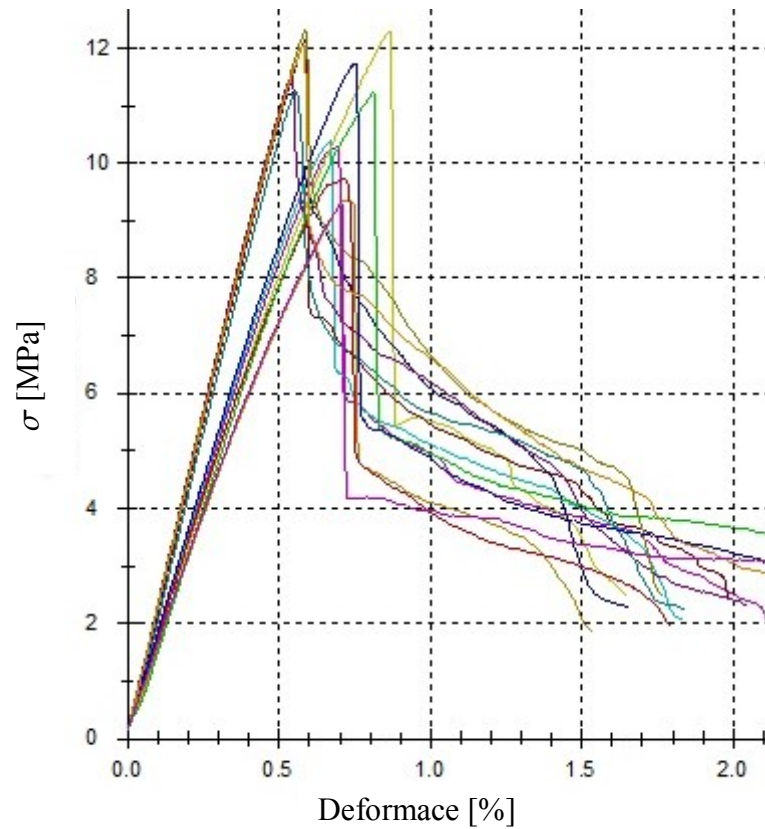
Tab. 5: Vypočtené hodnoty ohybové zkoušky pro vzorky z fenolické pryskyřice - efektivní modul pružnosti v ohybu

Efektivní modul pružnosti v ohybu - E [MPa]				
n = 15	$\bar{x}$	s	Chyba měření	MEDIÁN
FENOL C2-32	1440	84	5,9	1460
FENOL C2-48	2490	320	12,9	2360
FENOL C2-64	2950	320	10,8	3130

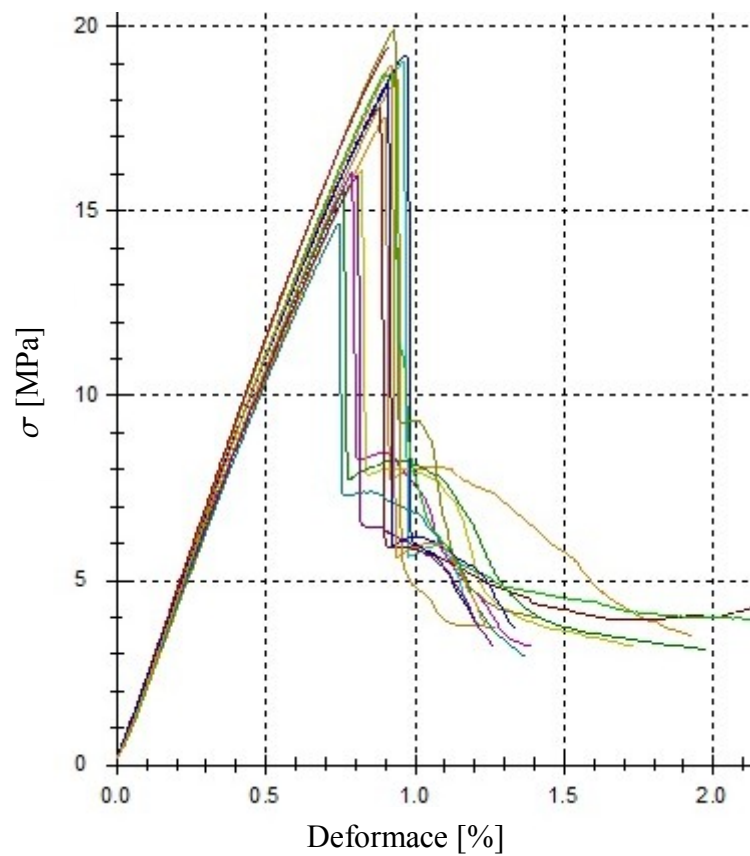
Tab. 6: Vypočtené hodnoty ohybové zkoušky pro vzorky z fenolické pryskyřice - mezní pevnost v ohybu

Mezní pevnost v ohybu - $\sigma$ [MPa]				
n = 15	$\bar{x}$	s	Chyba měření	MEDIÁN
FENOL C2-32	6,8	0,9	13,1	6,5
FENOL C2-48	14,9	1,8	12	14,8
FENOL C2-64	19,4	1,4	14,6	16,2

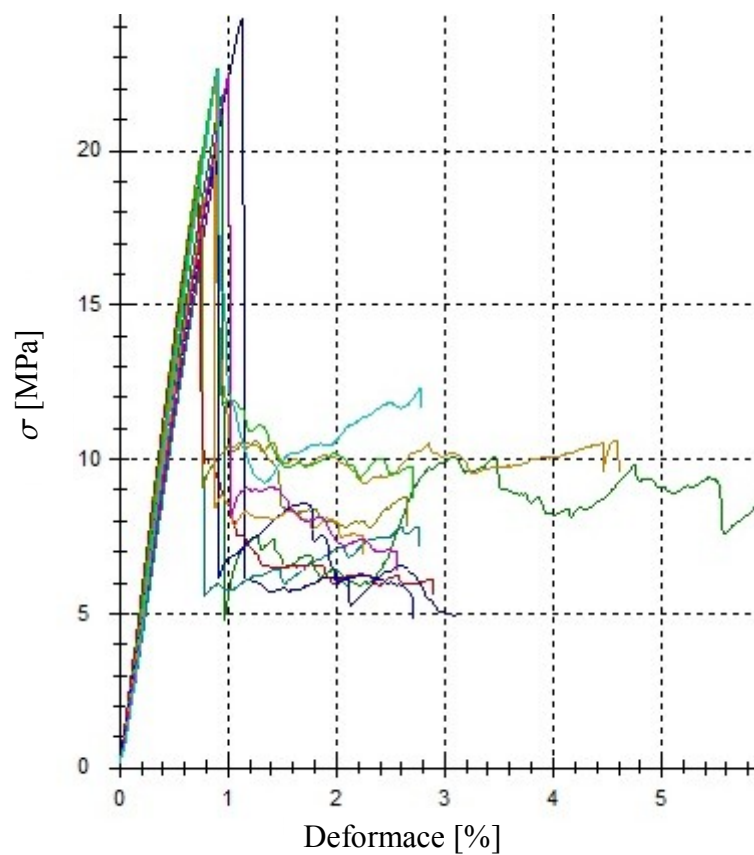
Grafy byly získány pomocí programu TestXpert II, znázorňují závislost napětí  $\sigma$  [MPa] na poměrné deformaci  $\varepsilon$  [%].



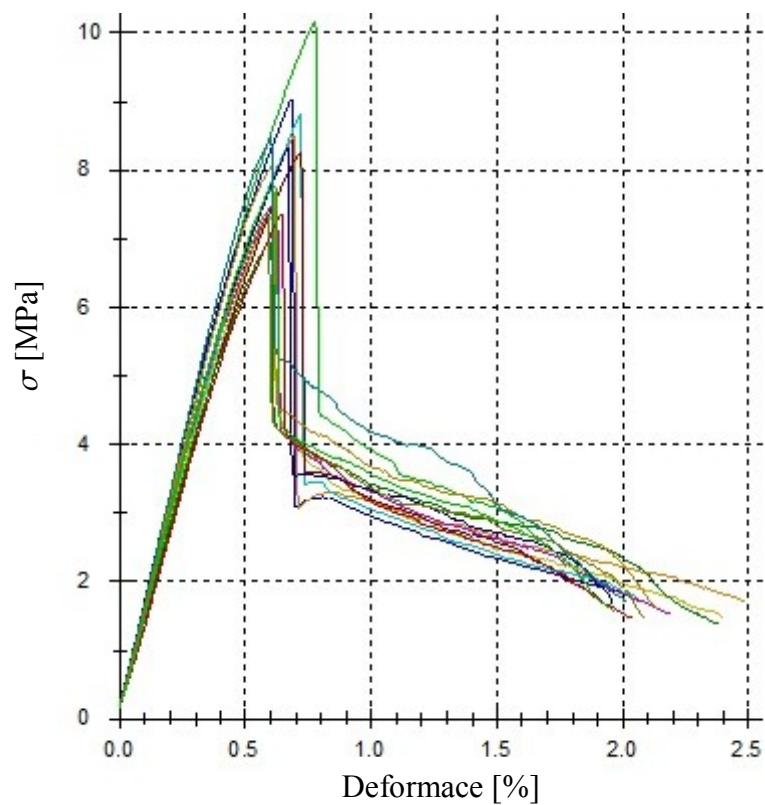
Obr. 41 Průběh závislosti napětí na poměrné deformaci pro EPOX C2-32.



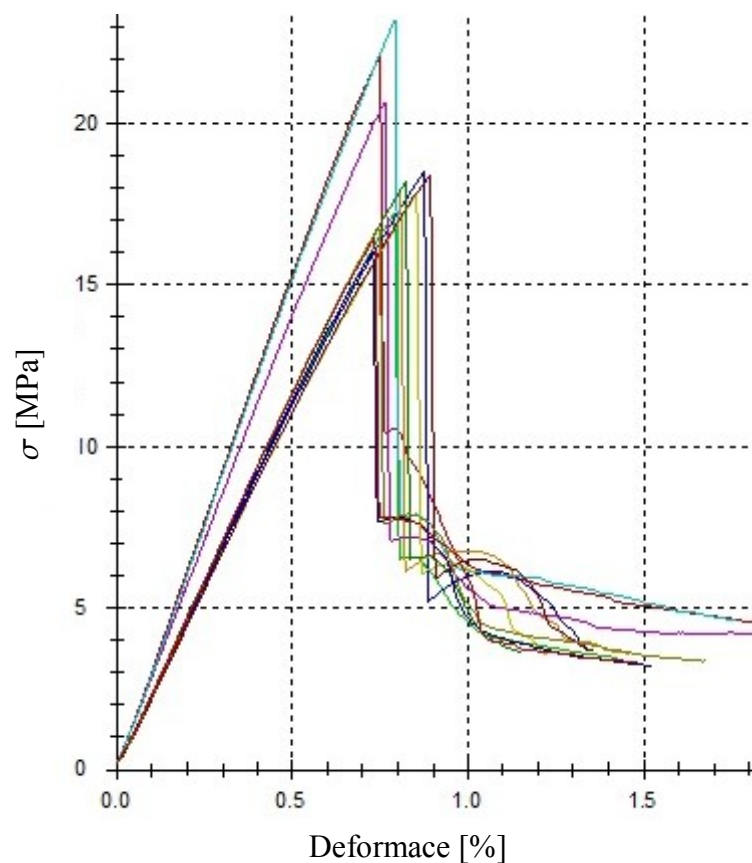
Obr. 42 Průběh závislosti napětí na poměrné deformaci pro EPOX C2-48.



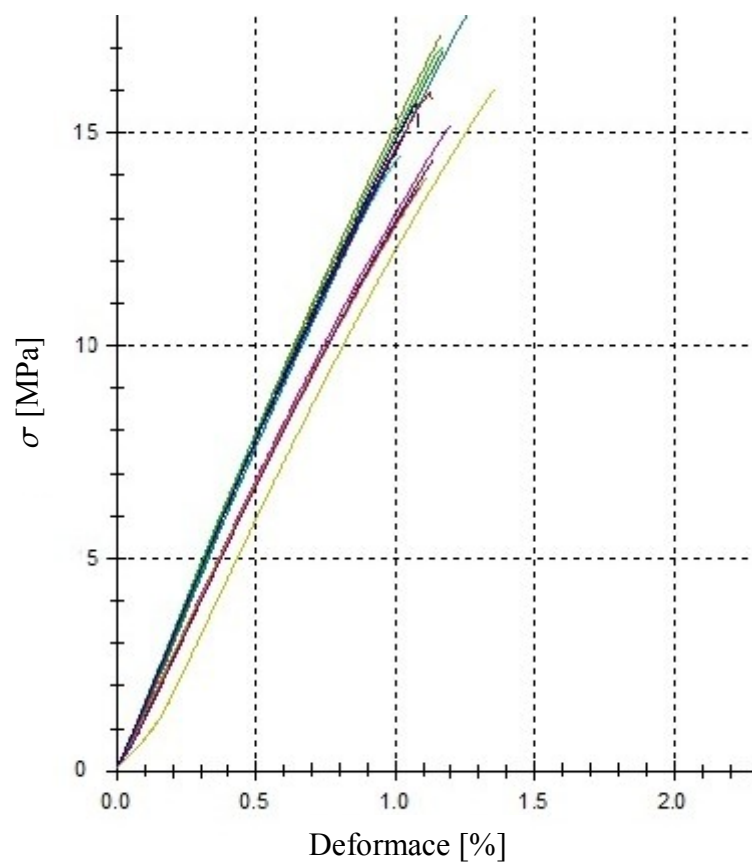
Obr. 43 Průběh závislosti napětí na poměrné deformaci pro EPOX C2-64.



Obr. 44 Průběh závislosti napětí na poměrné deformaci pro FENOL C2-32.



Obr. 45 Průběh závislosti napětí na poměrné deformaci pro FENOL C2-48.



Obr. 46 Průběh závislosti napětí na poměrné deformaci pro FENOL C2-64.



## 7.2 Zkouška žhavou smyčkou

Zkouška probíhala dle normy ČSN EN 60695-2-12. Celkem bylo ke zkoušce přichystáno 6 typů zkušebních těles s rozměry 75 × 75 mm s jednotnou tloušťkou 8,3 mm. Zjišťuje se index hořlavosti materiálů žhavou smyčkou - GWFI.

**GWFI - Glow Wire Flammability Index** je to nejvyšší zkušební teplota při které během tří po sobě následujících zkoušek vzorku o dané tloušťce je splněna jedna z podmínek:

- plameny nebo žhnutí vzorku uhasnou během 30 s po oddálení žhavé smyčky, aniž dojde zapálení hedvábného balicího papíru umístěného pod vzorkem
- vzorek se nezapálí

GWFI je stanoveno jako nejvyšší zkušební teplota, při které jsou splněny podmínky uvedené výše ve třech po sobě jdoucích zkouškách. Jestliže se vzorek během zkoušky nezapálí, tak hodnota GWFI pro tento materiál při dané tloušťce bude 960 °C. Značení po zkoušce: *GWFI 960/8,3* - zkušební těleso o tloušťce 8,3 mm a zkušební teplotě 960 °C.

Tab. 7: Vyhodnocení zkoušky žhavou smyčkou pro vzorky FENOL C2-32

Teplota [°C]	Vzorek [ks]	Časy [s]		Uhasnutí do 30 s	Zapálení		Výška plamene [mm]	GWFI
		t <sub>v</sub>	t <sub>R</sub>		Vzorek	Podložka		
650	1	-	-	ANO	NE	NE	-	ANO
700	1	-	-	ANO	NE	NE	-	ANO
800	1	-	-	ANO	NE	NE	-	ANO
900	1	-	-	ANO	NE	NE	-	ANO
960	1	-	-	ANO	NE	NE	-	<b>960/8,3</b>

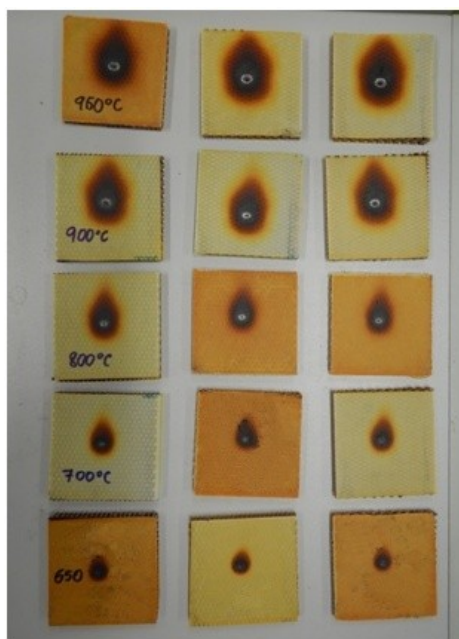
Tab. 8: Vyhodnocení zkoušky žhavou smyčkou pro vzorky FENOL C2-48

Teplota [°C]	Vzorek [ks]	Časy [s]		Uhasnutí do 30 s	Zapálení		Výška plamene [mm]	GWFI
		t <sub>v</sub>	t <sub>R</sub>		Vzorek	Podložka		
650	1	-	-	ANO	NE	NE	-	ANO
700	1	-	-	ANO	NE	NE	-	ANO
800	1	-	-	ANO	NE	NE	-	ANO
900	1	-	-	ANO	NE	NE	-	ANO
960	1	-	-	ANO	NE	NE	-	<b>960/8,3</b>

Tab. 9: Vyhodnocení zkoušky žhavou smyčkou pro vzorky FENOL C2-64

Teplota [°C]	Vzorek [ks]	Časy [s]		Uhasnutí do 30 s	Zapálení		Výška plamene [mm]	GWFI
		t <sub>v</sub>	t <sub>R</sub>		Vzorek	Podložka		
650	1	-	-	ANO	NE	NE	-	ANO
700	1	-	-	ANO	NE	NE	-	ANO
800	1	-	-	ANO	NE	NE	-	ANO
900	1	-	-	ANO	NE	NE	-	ANO
960	1	-	-	ANO	NE	NE	-	<b>960/8,3</b>

U vzorků vyrobených z fenolické pryskyřice bylo zjištěno, že ani v jednom případě nedošlo k jejich zapálení. Toto chování je způsobeno vynikající odolností fenolických prepregů vůči ohni. Vzhledem k maximální možné teplotě (960 °C) nastavitelné na zařízení není možné určit přesnou teplotu vzplanutí.



Obr. 47 Vzorky typu FENOL po zkoušce žhavou smyčkou.

Tab. 10: Vyhodnocení zkoušky žhavou smyčkou pro vzorky EPOX C2-32

Teplota [°C]	Vzorek [ks]	Časy [s]		Uhasnutí do 30 s	Zapálení		Výška plamene [mm]	GWFI
		t <sub>v</sub>	t <sub>R</sub>		Vzorek	Podložka		
650	1	-	-	ANO	NE	NE	-	ANO
700	1	-	-	ANO	NE	NE	-	ANO
800	1	-	-	ANO	NE	NE	-	ANO
850	3	10,2	3,1	ANO	ANO	NE	35	<b>850/8,3</b>
900	1	2,2	>60	NE	NE	NE	> 100	NE

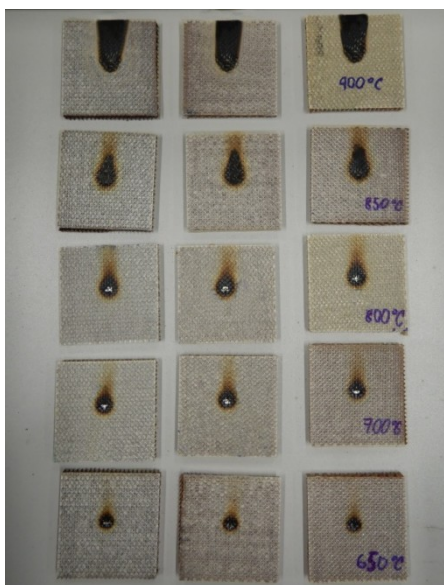
Tab. 11: Vyhodnocení zkoušky žhavou smyčkou pro vzorky EPOX C2-48

Teplota [°C]	Vzorek [ks]	Časy [s]		Uhasnutí do 30 s	Zapálení		Výška plamene [mm]	GWFI
		t <sub>v</sub>	t <sub>R</sub>		Vzorek	Podložka		
650	1	-	-	ANO	NE	NE	-	ANO
700	1	-	-	ANO	NE	NE	-	ANO
800	1	-	-	ANO	NE	NE	-	ANO
850	3	12	2,6	ANO	ANO	NE	35	<b>850/8,3</b>
900	1	2,7	>60	NE	NE	NE	> 100	NE

Tab. 12: Vyhodnocení zkoušky žhavou smyčkou pro vzorky EPOX C2-64

Teplota [°C]	Vzorek [ks]	Časy [s]		Uhasnutí do 30 s	Zapálení		Výška plamene [mm]	GWFI
		t <sub>v</sub>	t <sub>R</sub>		Vzorek	Podložka		
650	1	-	-	ANO	NE	NE	-	ANO
700	1	-	-	ANO	NE	NE	-	ANO
800	1	-	-	ANO	NE	NE	-	ANO
850	3	14,7	2,2	ANO	ANO	NE	30	<b>850/8,3</b>
900	1	3,2	>60	NE	NE	NE	> 100	NE

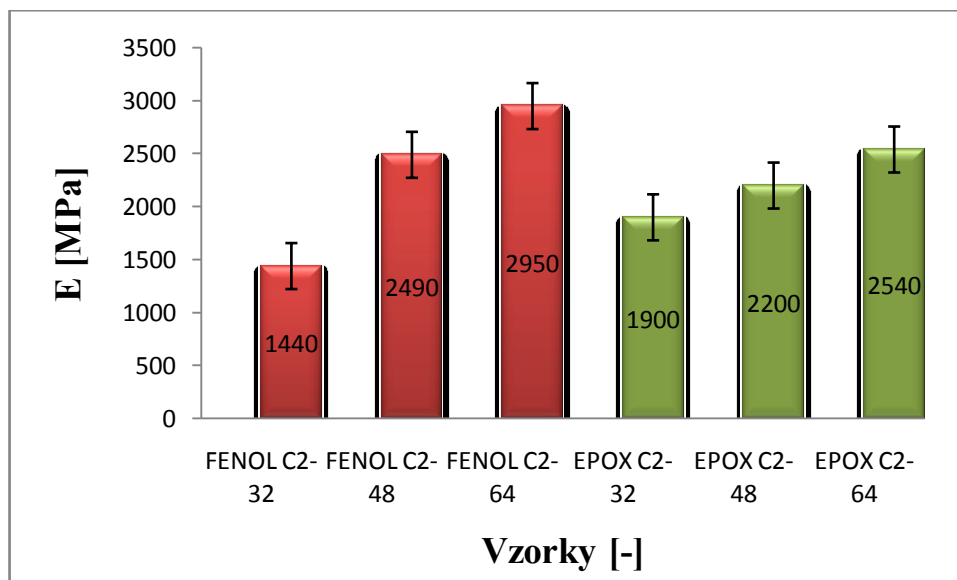
U vzorků vyrobených z prepregu s epoxidovou pryskyřicí můžeme sledovat rozdílné vlastnosti oproti vzorkům vyrobených z fenolického prepregu. Při teplotě 850 °C všechny typy vzorků vzplály, ale do 30 s došlo k jejich uhasnutí. Po zvýšení teploty na 900 °C došlo k zapálení všech vzorků trvajícím déle než 30 s.



Obr. 48 Vzorky typu EPOX po zkoušce žhavou smyčkou.

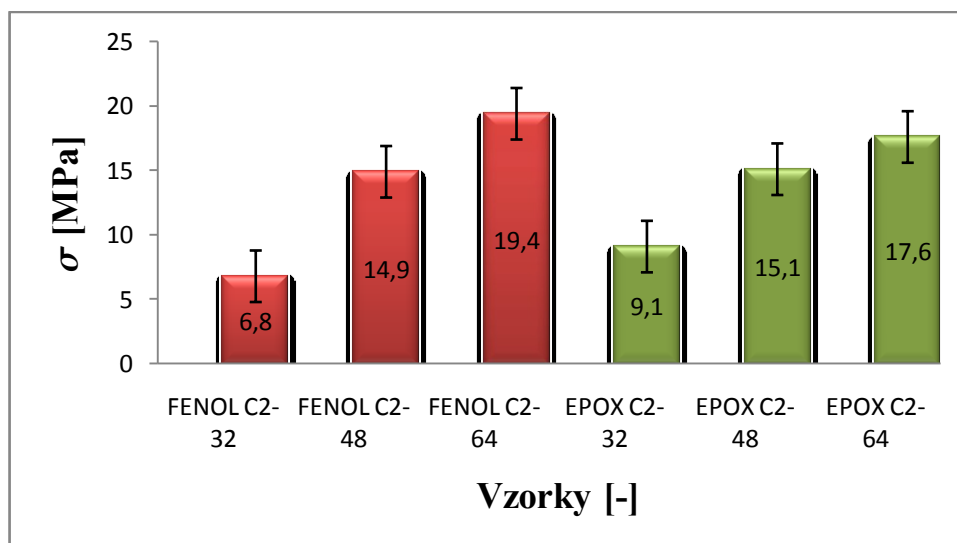
### 7.3 Vyhodnocení zkoušky tříbodovým ohybem

Zkušební vzorky byly vyhodnocovány pomocí tříbodového ohybu. Z vyhodnocených hodnot vyplývá, že nejvyšší hodnotu efektivního modulu pružnosti v ohybu má vzorek FENOL C2-64 (2950 MPa). Druhá nejvyšší hodnota byla dosažena u vzorku EPOX C2-64 (2540 MPa). Naopak nejnižší hodnota byla dosažena u vzorku FENOL C2-32.



Obr. 49 Průměrné hodnoty efektivního modulu pružnosti v ohybu.

Pořadí výsledků při zjišťování mezní pevnosti v ohybu zůstalo ve stejném pořadí. Nejvyšší mezní pevnosti v ohybu bylo dosaženo u vzorku FENOL C2-64 (19,4 MPa), druhý byl vzorek EPOX C2-64 (17,6 MPa) a nejnižší hodnota byla dosažena u vzorku FENOL C2-32 (6,8 MPa).



Obr. 50 Průměrné hodnoty mezní pevnosti v ohybu.

#### 7.4 Vyhodnocení indexu hořlavosti žhavou smyčkou (GWFI)

U zkoušky byla zjišťována nejvyšší zkušební teplota, kterou vzorek vydrží 3x po sobě. Podmínkou je, že se vzorek nezapálí, plameny a žhnutí uhasnou do 30 s po oddálení žhavé smyčky a nedojde k zapálení balícího papíru umístěného pod zkušebním vzorkem. Zkouška proběhla pro 6 typů vzorků pro které byly vyhodnoceny protokoly.

U všech sledovaných vzorků z fenolického prepregu byla provedena první zkouška s nejnižší možnou počáteční teplotou 650 °C. Vzorky splnily všechna požadovaná kritéria a proto byla teplota zvýšena na 700 °C. Vzorky opět obstály. Následovalo zvýšení teploty na 800 °C, a poté na 900 °C, kde ani u jedné z těchto teplot nenastalo zapálení vzorků. Došlo tedy k dalšímu zvýšení teploty na maximální možnou teplotu, kterou je zařízení schopno vyvinout, a to 960 °C. Při této teplotě nedošlo k zapálení vzorků. Byla splněna všechna požadovaná kritéria a zapsána hodnota indexu hořlavosti pro vzorky FENOL C2-32, FENOL C2-48 a FENOL C2-64. **GWFI: 960/8,3.**

U vzorků vyrobených z prepregu s epoxidovou pryskyřicí byla počáteční zkušební teplota opět stanovena na 650°C. Při této teplotě obstály všechny vzorky. Další zvolené teploty byly 700 °C a poté 800 °C, u kterých vzorky opět splnily všechna požadovaná kritéria. Při dalším navýšení teploty na 850 °C došlo k hoření všech vzorků s výškou plamene do 35 mm, ovšem po oddálení od žhavé smyčky došlo k jejich vyhasnutí do 30 s, což zkoušce vyhovuje. Po dalším zvýšení teploty na 900 °C došlo ke vzplanutí vzorku a jeho hoření s vysokým plamenem (přes 100 mm) po dobu delší než 30 s. Můžeme tedy konstatovat, že vzorky EPOX C2-32, EPOX C2-48 a EPOX C2-64 splnily všechna potřebná kritéria při teplotě 850 °C. Hodnota indexu hořlavosti je tedy **GWFI: 850/8,3.**

Závěrem můžeme říci, že hustota nomexového jádra hořlavost vzorků spíše neovlivnila. Jedinou pozorovanou změnou byla doba vzplanutí a taky vyhasnutí, ale pouze v rozmezí několika málo sekund. Vzorek s hustotou jádra 32 kg/m<sup>3</sup> vzplál rychleji a vyhasnul později než vzorek s hustotou jádra 64 kg/m<sup>3</sup>, u něj byla doba vzplanutí delší a doba vyhasnutí o něco kratší.

## ZÁVĚR

Diplomová práce je rozdělena na dvě části, a to na část teoretickou a na část praktickou. V teoretické části jsou obecně popsány sendvičové konstrukce od složení, možností výroby až po jejich vlastnosti. Dále jsou zde popsány materiály, které se pro výrobu používají. Poslední částí této kapitoly jsou použití sendvičových konstrukcí v praxi.

V praktické části diplomové práce jsou popsány metody testování sendvičových struktur, jednotlivé materiály pro výrobu zkušebních vzorků a následná výroba ve vyhřívaném lisu. Po lisování byly vzorky nařezány na dané rozměry. Experimentální testování obsahovalo zkoušku tříbodovým ohybem dle americké normy ASTM C393 a zkoušku hořlavosti žhavou smyčkou podle normy ČSN EN 60695-2-12. Všechny naměřené hodnoty byly zpracovány a vyhodnoceny.

U zkoušky tříbodovým ohybem bylo zjištěno, že nejvyšší hodnota mechanických vlastností byla zjištěna u vzorku FENOL C2-64, který se skládá z jádra z nomexové voštiny o hustotě  $64 \text{ kg/m}^3$  a vnějších vrstev z fenolického prepregu PHG 840-300-42. Naopak nejnižší hodnota mechanických vlastností byla zjištěna u vzorku FENOL C2-32 tvořeného též vnějšími vrstvami z fenolického prepregu PHG 840-300-42, ale s jádrem z nomexové voštiny s hustotou  $32 \text{ kg/m}^3$ . Ze získaných hodnot měření plyne, že všechny vzorky s vyšší hustotou jádra prokázaly nejvyšší hodnoty mechanických vlastností.

U zkoušky hořlavosti žhavou smyčkou byla zjišťována teplota vzplanutí. Nejlépe obstály vzorky s vnějšími vrstvami z fenolického prepregu PHG 840-300-42, které nevzplanuly ani při nejvyšší možné nastavitelné teplotě  $960 \text{ }^\circ\text{C}$ . Naopak u vzorků s vnějšími vrstvami z prepregu s epoxidovou pryskyřicí VV320P-DT860-37 se ukázalo, že při teplotě  $900 \text{ }^\circ\text{C}$  dojde k jejich zapálení a nevyhasnutí do 30 s. Všechna kritéria pro zkoušku hořlavosti žhavou smyčkou byla splněna při teplotě  $850 \text{ }^\circ\text{C}$ . Můžeme tedy konstatovat, že pro aplikace kde je potřeba dbát na snížení nehořlavosti materiálů (např. letectví, automobilový průmysl), je použití fenolického prepregu mnohem efektivnější, než použití prepregu s epoxidovou pryskyřicí.

Diplomová práce poskytla cenné poznatky o tom, jak hustota jádra ovlivňuje mechanické vlastnosti sendvičových konstrukcí, ale i o tom jak volba materiálu vnějších vrstev ovlivňuje hořlavost sendvičové konstrukce.

**SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY**

- [1] PETERS, Edited by S.T. Handbook of composites. 2nd ed. London: Chapman, 1998. ISBN 04-125-4020-7.
- [2] ZENKERT, Nordic Industrial Fund. Ed.: D. *The handbook of sandwich construction*, Cradley Heath, West Midlands: Engineering Materials Advisory Services Ltd. (EMAS), 1997, 370 p. ISBN 09-478-1796-4.
- [3] DAVIES, J. *Lightweight sandwich construction*. Malden, MA: Blackwell Science, 2001, 370 p. ISBN 06-320-4027-0.
- [4] Asme.org [online]. [cit. 2017-10-14] Dostupné z: <http://materialstechnology.asmedigitalcollection.asme.org/article.aspx?articleid=1429162>.
- [5] Vlákna, *KOMPOZITY -Ing. Zdeněk Kořínek, CSc.* [online]. [cit. 2017-10-19]. Dostupné z: <http://kompozity.webnode.cz/>.
- [6] FibreGlast.com [online]. [cit. 2017-10-19] *Prepreg Fabrics*. Dostupné z: [http://www.fibreglast.com/category/PrePreg\\_Fabrics](http://www.fibreglast.com/category/PrePreg_Fabrics).
- [7] MIRACLE, Daniel B. a Steven L. Donaldson. *ASM Handbook: Volume 21 - Composites*. Ohio: ASM International, 2001. 1200s. ISBN 0-87170-703-9.
- [8] Gurit.com [online]. [cit. 2017-10-24]. *Composite Materials - Struktural Core Materials*. Dostupné z: <http://www.gurit.com/>.
- [9] RUSNÁKOVÁ, Soňa: Přednášky z předmětu Zpracovatelské inženýrství kompozitů T5ZIK, FT UTB. 2015.
- [10] EHRENSTEIN, G. W. *Polymerní kompozitní materiály*. 1. vyd. Praha: Nakladatelství SCIENTIA, 2009, 350 s. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [11] Hexcel.com [online]. [cit. 2017-10-31]. *HexPly® Prepreg Technology*. Dostupné z: <http://hexcel.com/Resources/Technology-Manuals>.
- [12] Latecoere.cz [online]. [cit. 2017-10-31]. *Výroba kompozitů*. Dostupné z: <http://www.latecoere.cz/vyrobni-technologie/vyroba-kompozitu/>.
- [13] Honeycomb Sandwich Design Technology, *Hexcel.com*. [online]. [cit. 2017-10-31]. Dostupné z: <http://hexcel.com/Resources/Technology-Manuals>.

- [14] FOJTL, L. *Vliv materiálového složení a tvaru na vybrané fyzikální vlastnosti sendvičových konstrukcí*. Zlín, 2016. Disertační práce. UTB ve Zlíně. Školitel disertační práce Soňa Rusnáková.
- [15] mmspektrum.com [online]. [cit. 2017-11-07]. MM *Průmyslové spektrum*. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanky-249.html>.
- [16] Swedsteel-metecno.com [online]. [cit. 2017-11-07]. *Products - Sandwich panels*. Dostupné z : <http://swedsteel-metecno.com/en/products/heat-insulated-sandwich-panels/>.
- [17] BITZER, T. *Honeycomb technology*. V UK 1. vyd. Glasgow: Springer-Science+Business Media, 1997, 230 s. ISBN 978-94-010-6474-3.
- [18] Hexcel.com [online]. [cit. 2017-11-07]. *Honeycomb Attributes and Properties*. Dostupné z: <http://hexcel.com/Resources/Technology-Manuals>.
- [19] AirexBaltecBanova.com [online]. [cit. 2017-11-09]. *Products - AIREX®*. Dostupné z: <http://www.airexbaltekbanova.com/airex-t10-pet-foam.html>.
- [20] Netcomposites.com [online]. [cit. 2017-11-09]. *Core materials*. Dostupné z: <https://netcomposites.com/guide-tools/guide/core-materials/>.
- [21] 5m.cz [online]. [cit. 2017-11-09]. *Produkty - Semipregy*. Dostupné z: <https://www.5m.cz/produkty/semipregy>.
- [22] Havel-Composites.com [online]. [cit. 2017-11-27]. *CZ katalog*. Dostupné z: [http://www.havel-composites.com/ktlgfiles/cz\\_katalog.pdf](http://www.havel-composites.com/ktlgfiles/cz_katalog.pdf).
- [23] Faserverbundwerkstoffe.de [online]. [cit. 2017-11-27]. *Products*. Dostupné z: <https://shop1.r-g.de/en/art/500099R>.
- [24] Corex-honeycomb.co.uk [online]. [cit. 2017-11-27]. *Our Products - Aluminium Honeycomb*. Dostupné z: <https://corex-honeycomb.co.uk/products-and-services/aluminium-honeycomb/>.
- [25] Corecomposites.com [online]. [cit. 2017-27-11]. *Honeycomb*. Dostupné z: <http://www.corecomposites.com/products/honeycomb>.
- [26] Plascore.com [online]. [cit. 2017-27-11]. *Honeycomb cores*. Dostupné z: <https://www.plascore.com/honeycomb/honeycomb-cores/aramid-fiber/pk2-kevlar-n636-para-aramid-fiber-honeycomb/>.



- [27] Intechopen.com [online]. [cit. 2017-27-11]. *Finite elements analysis of loading area effect on sandwich panel behaviour beyond the yield limit*. Dostupné z: <http://cdn.intechopen.com/pdfs-wm/39769.pdf>.
- [28] Stressebook.com [online]. [cit. 2017-27-11]. *Solid Metal Versus Sandwich Panel*. Dostupné z: <http://www.stressebook.com/solid-metal-versus-sandwich-panels/>.
- [29] Austal.com [online]. [cit. 2017-27-11]. *Austal HSSV 72*. Dostupné z: <http://australia.austal.com/ships/austal-hssv-72-0>.
- [30] CompositesWorld.com [online]. [cit. 2017-27-11]. *Products*. Dostupné z: <https://www.compositesworld.com/products/new>.
- [31] TheEngineer.co.uk [online]. [cit. 2017-27-11]. *Issues*. Dostupné z: <https://www.theengineer.co.uk/issues/sept-2015-online/hitachi-opens-new-uk-train-factory/>.
- [32] ASTM C393, Standard Test Method for Core Shear Properties of Sandwich Constructions by Beam Flexure, *American standard*, 2012.
- [33] Mechanické vlastnosti [online]. [cit. 2018-04-24]. Dostupné z: [https://www.opi.zcu.cz/mechanicke\\_vlastnosti.pdf](https://www.opi.zcu.cz/mechanicke_vlastnosti.pdf).
- [34] ČSN EN 60695-2-12. *Zkoušky Žhovou/horkou smyčkou : Zkouška hořlavosti materiálů žhovou smyčkou*. [s.1] : [s.n], Listopad 2001. 9s
- [35] Hindawi.com [online]. [cit. 2018-05-01]. *Shock and vibration*. Dostupné z: <https://www.hindawi.com/journals/sv/2017/7842413/>.
- [36] Researchgate.net [online]. [cit. 2018-05-14] Dostupné z: [https://www.researchgate.net/profile/Salih\\_Akour/publication/45534595\\_Effect\\_of\\_Core\\_Material\\_Stiffness\\_on\\_Sandwich\\_Panel\\_Behavior\\_Beyond\\_the\\_Yield\\_Limit/links/0046353bc503d5ee28000000.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Salih_Akour/publication/45534595_Effect_of_Core_Material_Stiffness_on_Sandwich_Panel_Behavior_Beyond_the_Yield_Limit/links/0046353bc503d5ee28000000.pdf).
- [37] ProQuest.com [online]. [cit. 2018-05-14] Dostupné z: <https://search-proquest-com.proxy.k.utb.cz/docview/855078440/fulltext/8227C523D1C44F19PQ/9?accountid=15518>.
- [38] ProQuest.com [online]. [cit. 2018-05-14] Dostupné z: <https://search-proquest-com.proxy.k.utb.cz/docview/866832964/fulltext/8227C523D1C44F19PQ/64?accountid=15518>

**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

°C	celsiův stupeň
kg/m <sup>3</sup>	hustota
PP	polypropylen
PVC	polyvinylchlorid
PUR	polyuretan
PS	polystyren
PET	polyetylentereftalát
PMI	polymetakrilmilid
PC	polykarbonát
ABS	akrylonitrilbutadienstyren
PE	polyetylen
A	ampér
E	modul pružnosti
F	síla
mm	milimetr
$\sigma$	napětí
MPa	megapascal
ASTM	americká norma
ČSN	česká státní norma
s	sekunda

## SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1 Složení sendvičového panelu. [3]</i> .....	12
<i>Obr. 2 Sendvičová struktura s pěnovým jádrem. [4]</i> .....	12
<i>Obr. 3 Druhy vazeb. [3]</i> .....	13
<i>Obr. 4 Ukázka uhlíkové tkaniny a prepregu s uhlíkovou tkaninou. [6]</i> .....	15
<i>Obr. 5 Příkladů geometrických tvarů voštin: A) hexagonální, B) hexagonální vztužená, C) Flex-Core, D) OX-Core. [17],[18]</i> .....	15
<i>Obr. 6 Výplň voštinového jádra. [4]</i> .....	16
<i>Obr. 7 Dýha balzového dřeva. [20]</i> .....	16
<i>Obr. 8 Hliníková pěna (vlevo) a polymerní pěna (vpravo). [7]</i> .....	17
<i>Obr. 9 Technologie výroby ručního kladení. [9]</i> .....	18
<i>Obr. 10 Technologie výroby vakuovým lisováním. [11]</i> .....	19
<i>Obr. 11 Ukázka autoklávu. [12]</i> .....	19
<i>Obr. 12 Technologie RTM. [9]</i> .....	20
<i>Obr. 13 Lisování pomocí lisovacích desek. [13]</i> .....	20
<i>Obr. 14 Metoda vakuové infuze. [14]</i> .....	21
<i>Obr. 15 Namáhání sendvičové konstrukce při ohybu. [8]</i> .....	22
<i>Obr. 16 Způsob výroby roztáhnutého voštinového jádra. [18]</i> .....	23
<i>Obr. 17 Výroba voštinového jádra technologií vrapování fólie. [18]</i> .....	24
<i>Obr. 18 Typy buněčných struktur, A) 3D uzavřená buněčná struktura - pěna, B) 3D otevřená buněčná struktura - pěna, C) 2D buněčná struktura - voština. [14]</i> .....	24
<i>Obr. 19 PET pěna. [19]</i> .....	25
<i>Obr. 20 PVC pěna. [20]</i> .....	25
<i>Obr. 21 PS pěna. [19]</i> .....	26
<i>Obr. 22 Forma z PUR pěny. [19]</i> .....	26
<i>Obr. 23 Aramidová (nomexová) voština. [23]</i> .....	27
<i>Obr. 24 Hliníková voština. [24]</i> .....	27
<i>Obr. 25 Polykarbonátová voština (vlevo) a polypropylenová voština (vpravo). [26]</i> .....	28
<i>Obr. 26 Využití sendviče v křídle letadla. [28]</i> .....	29
<i>Obr. 27 Univerzální loď "Austal HSSV 72" vytvořena zejména pomocí</i> .....	30
<i>Obr. 28 Střešní panely plněné PUR pěnou. [30]</i> .....	30
<i>Obr. 29 Vojenské vozidlo "Panther Command Vehicle" se speciálním podvozkem z hliníkové voštiny odolné proti výbušninám. [24]</i> .....	31

<i>Obr. 30</i> Vysokorychlostní vlak "Hitachi Class 800". [31] .....	31
<i>Obr. 31</i> Průběh ohybového momentu u tříbodové zkoušky ohybem. [33].....	37
<i>Obr. 32</i> Průběh ohybového momentu u čtyřbodové zkoušky ohybem. [33] .....	37
<i>Obr. 33</i> Zkouška žhavou smyčkou. ....	38
<i>Obr. 34</i> Prepreg VV320P-DT806-37. ....	39
<i>Obr. 35</i> Prepreg Gurit PHG 840-300-42. ....	40
<i>Obr. 36</i> Nomexová voština CORMASTER C2. ....	40
<i>Obr. 37</i> Laboratorní vyhřívaný lis. ....	41
<i>Obr. 38</i> Stolní pila Scheppach HS 80.....	41
<i>Obr. 39</i> Univerzální zkušební stroj ZWICK 1456. ....	42
<i>Obr. 40</i> Zařízení pro zkoušku žhavou smyčkou. ....	43
<i>Obr. 41</i> Průběh závislosti napětí na poměrné deformaci pro EPOX C2-32. ....	46
<i>Obr. 42</i> Průběh závislosti napětí na poměrné deformaci pro EPOX C2-48. ....	46
<i>Obr. 43</i> Průběh závislosti napětí na poměrné deformaci pro EPOX C2-64. ....	47
<i>Obr. 44</i> Průběh závislosti napětí na poměrné deformaci pro FENOL C2-32.....	47
<i>Obr. 45</i> Průběh závislosti napětí na poměrné deformaci pro FENOL C2-48.....	48
<i>Obr. 46</i> Průběh závislosti napětí na poměrné deformaci pro FENOL C2-64.....	48
<i>Obr. 47</i> Vzorky typu FENOL po zkoušce žhavou smyčkou.....	50
<i>Obr. 48</i> Vzorky typu EPOX po zkoušce žhavou smyčkou. ....	51
<i>Obr. 49</i> Průměrné hodnoty efektivního modulu pružnosti v ohybu. ....	52
<i>Obr. 50</i> Průměrné hodnoty mezní pevnosti v ohybu. ....	52

**SEZNAM TABULEK**

<i>Tab. 1: Technické údaje laboratorního lisu.....</i>	41
<i>Tab. 2: Technické údaje zkušebního stroje ZWICK 1456 .....</i>	42
<i>Tab. 3: Vypočtené hodnoty ohybové zkoušky pro vzorky z epoxidové pryskyřice - efektivní modul pružnosti v ohybu.....</i>	44
<i>Tab. 4: Vypočtené hodnoty ohybové zkoušky pro vzorky z epoxidové pryskyřice - mezí pevnost v ohybu .....</i>	45
<i>Tab. 5: Vypočtené hodnoty ohybové zkoušky pro vzorky z fenolické pryskyřice - efektivní modul pružnosti v ohybu.....</i>	45
<i>Tab. 6: Vypočtené hodnoty ohybové zkoušky pro vzorky z fenolické pryskyřice - mezí pevnost v ohybu .....</i>	45
<i>Tab. 7: Vyhodnocení zkoušky žhovou smyčkou pro vzorky FENOL C2-32.....</i>	49
<i>Tab. 8: Vyhodnocení zkoušky žhovou smyčkou pro vzorky FENOL C2-48.....</i>	49
<i>Tab. 9: Vyhodnocení zkoušky žhovou smyčkou pro vzorky FENOL C2-64.....</i>	50
<i>Tab. 10: Vyhodnocení zkoušky žhovou smyčkou pro vzorky EPOX C2-32 .....</i>	50
<i>Tab. 11: Vyhodnocení zkoušky žhovou smyčkou pro vzorky EPOX C2-48.....</i>	51
<i>Tab. 12: Vyhodnocení zkoušky žhovou smyčkou pro vzorky EPOX C2-64.....</i>	51

## SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha PI      Technický list epoxidové pryskyřice DT806
- Příloha PII     Technický list fenolického prepregu PH 840
- Příloha PIII    Technický list voštiny CORMASTER C2

## **PŘÍLOHA P I:**

Matrix TDS – Technical Data Sheet  
Issue 1: September 2014

### **DT806 Resins**

**Versatile Low**

**Viscosity Epoxy Matrices**



## Introduction

The **DT806** group of resins are in the low to medium viscosity range. **DT806** prepregs are suitable for processing by oven vacuum bag curing, autoclave bag curing or press moulding.

**DT806** prepregs offer a versatile curing range from 65°C to 140°C. They can be offered with AX003 epoxy film adhesive, which has similar curing characteristics.

The main resin is **DT806R**, which is a low viscosity system suitable for solvented (fabric) and hot melt (UD) prepregs.

In addition, there is **DT806W** which offers higher tack, mainly for solvent impregnated fabric prepregs.

It is anticipated **DT806** prepregs will find uses in industrial, marine and sport goods applications.

## Key Features

The **DT806** group of thermosetting epoxy resins offer a good combination of cure reactivity, versatile processing and availability in fabric and unidirectional fibre formats.

Main features are:

- ▶ Maximum DMA Tg of 135°C
- ▶ Processing by oven vacuum bag, autoclave curing and press moulding
- ▶ Flexible cure characteristics between 65°C and 140°C
- ▶ 21 days outlife at 21°C
- ▶ Low tack DT806R, Medium tack DT806W



## DT806 Group of Resins

The following are the resins offered within this group:

Resin	Description	Application
<b>DT806R</b>	Low viscosity, unpigmented resin	Fabric (solvent) and UD (hot-melt) prepregs
<b>DT806W</b>	Higher tack version of DT806R	Usually for fabric (solvent) prepregs.

## DT806 Resin Matrix Properties

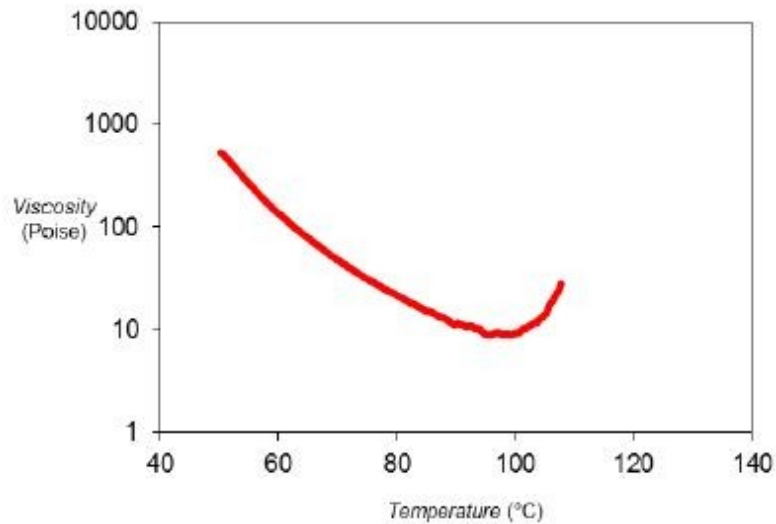
Chemical nature	Epoxy Thermosetting Resins
Curing Temperature range	65 to 140°C
Density of cured neat resin	1.21 g/cm <sup>3</sup> (DT806R)
Dynamic viscosity	Low, < 300 Poise @ 60°C, frequency 10 rad/sec, for DT806R and DT806W.
Gel Times (ASTM D 3532), For all DT806 resins.	50 to 60 minutes @ 80°C 15 to 19 minutes @ 100°C 4 to 6 minutes @ 120°C 2 to 3 minutes @ 130°C

The following charts show the rheological behaviour of **DT806R** and **DT806W**

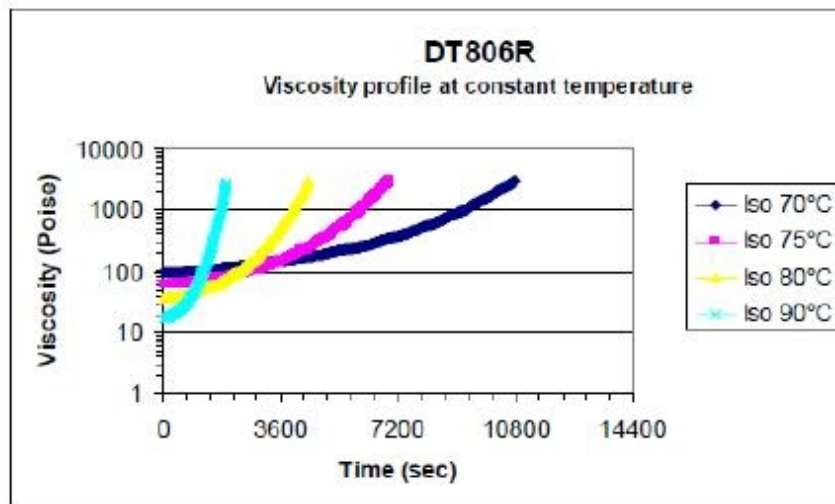
Firstly, a dynamic viscosity profile for these two resins.

Followed by Figure 1 giving isothermal viscosity profiles for **DT806R**.

*Viscosity profile*  
(constant heating rate 2°C/min)



**DT806R & DT806W**



**Figure 1: Isothermal Viscosity profiles for DT806R at four temperatures.**

### Thermal Performance of DT806R Laminates

All resins in the DT806 group have very similar thermal performance and have the same recommended cure cycles. The following table indicates the typical glass transition temperature (T<sub>g</sub>) developed by **DT806R** laminates.

Cure Cycle	T <sub>g</sub> (°C)
16 Hrs @ 65°C	70 to 80
5 Hrs @ 80°C	90 to 100
1.5 Hrs @ 100°C	110 to 120
1 Hr @ 120°C	120 to 130

Note: The Tangent Modulus Intercept T<sub>g</sub> values have been measured by DMA, according ASTM D7028.

### Mechanical Properties of Carbon Fabric Reinforced Laminates

**Table 1** and **Table 2** below shows some indicative averaged mechanical characteristics of **DT806R** carbon fibre laminates. These are with a 200 gsm (g/m<sup>2</sup>) high strength carbon twill fabric and a 150 gsm (g/m<sup>2</sup>) high strength carbon fibre unidirectional prepreg.

**Table 1**  
GG200T(Tenax HTA-3k)-DT806R-42 Fabric Laminate

Mechanical Tests	Test Method	RT
Tensile Strength (0°) (MPa)	ASTM D 3039	817
Tensile Modulus (0°) (GPa)	ASTM D 3039	56.6
Tensile Strength (90°) (MPa)	ASTM D 3039	835
Tensile Modulus (90°) (GPa)	ASTM D 3039	55.9
Compression Strength (0°) (MPa)	ASTM D 6641	710
Compression Modulus (0°) (GPa)	ASTM D 6641	54.2
Compression Strength (90°) (MPa)	ASTM D 6641	701
Compression Modulus (90°) (GPa)	ASTM D 6641	53.6
In-Plane Shear Strength (MPa)	EN 6031	128.2
In-Plane Shear Modulus (GPa)	EN 6031	3.50
ILSS (MPa)	EN 2563	79.2

**Table 2**

**Tenax STS 24k-150-DT806R-36 UD Laminate**

<b>Mechanical Tests</b>	<b>Test Method</b>	<b>RT</b>
Tensile Strength (0°) (MPa)	ASTM D 3039	2330
Tensile Modulus (0°) (GPa)	ASTM D 3039	124.0
Tensile Strength (90°) (MPa)	ASTM D 3039	45.0
Tensile Modulus (90°) (GPa)	ASTM D 3039	8.23
Compression Strength (0°) (MPa)	ASTM D 6641	1130
Compression Modulus (0°) (GPa)	ASTM D 6641	109.0
Compression Strength (90°) (MPa)	ASTM D 6641	154
Compression Modulus (90°) (GPa)	ASTM D 6641	8.7
In-Plane Shear Strength (MPa)	EN 6031	125.4
In-Plane Shear Modulus (GPa)	EN 6031	3.90
ILSS (MPa)	EN 2563	90.4

## Recommended Cure Cycles for DT806 products

The versatility of **DT806** products allows processing by oven vacuum bag, autoclave and press moulding. The recommended cure cycles cover curing up to 120°C for the conventional bagging routes. With shorter cure cycles of 120°C and beyond allocated to press moulding.

### Oven Vacuum Bag and Autoclave Curing Cycles

The following are recommended cycles up to 120°C:

- Cycle 1:** 16 Hours @ 65°C
- Cycle 2:** 10 Hours @ 70°C
- Cycle 3:** 5 Hours @ 80°C.
- Cycle 4:** 3 Hours @ 90°C.
- Cycle 5:** 1.5 Hours @ 100°C.
- Cycle 6:** 1.0 Hours @ 110°C.
- Cycle 7:** 1.0 Hour @ 120°C.

All these cure cycles use an initial heating ramp-rate of 1 to 3°C/min from room temperature to the cure temperature. A vacuum should be applied to the bagged component during cure. For autoclave bag curing, the applied cure pressure needs to be between 3.0 and 6.0 bar.

If using oven vacuum bag curing, an intermediate dwell of 15 to 30 minutes at 65°C can be helpful in producing a low voidage component.

### Faster Curing Cycles for Press Moulding

The high reactivity of **DT806** products allows for short cure cycles if press moulding is chosen as the processing option. It is assumed a pre-prepared **DT806** prepreg preform will be placed on a hot press tool set at the cure temperature. The following are a starting point for suggested cure cycles.

**Cycle P1:** 15 to 25 minutes @ 125°C

**Cycle P2:** 12 to 20 minutes @ 130°C

**Cycle P3:** 10 to 15 minutes @ 135°C.

**Cycle P4:** 6 to 10 minutes @ 140°C.

**Note:** *These press moulding cure times are approximate, and may need to be adjusted taking account of specific conditions for each prepreg, part and press tool.*

The following graph provides data on the gel times for **DT806R** at these higher temperatures:

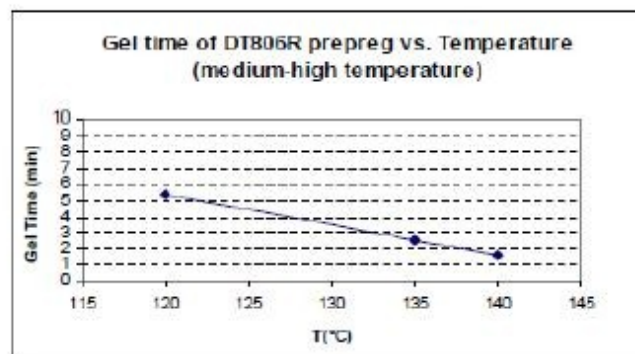


Figure 2: Gel Times for DT806R.

## Post-Cure Options for Low and Reduced Temperature Cures

If maximum T<sub>g</sub> is required then postcuring can be applied, with an initial cure of 100°C or less. This covers **Cycles 1 to 4** inclusive.

The free-standing postcure cycle is:

- Heat the part at 2°C/ minute ramp rate to the initial cure temperature (either 65°C, 70°C, 80°C, 90°C or 100°C).
- Slow the ramp rate.
- Heat the part at 0.3°C/min (20°C/Hour) to 120°C (\*Important).
- Dwell at 120°C for 1 Hour.
- Cool the part at 2°C/min.

Note: \*The reduced ramp-rate is essential for even development of T<sub>g</sub> in the part and avoiding part distortion.

## Processing Guidelines

**Important notice:** Prepregs rolls must be stored in a freezer at -18°C when not being used. Thaw the prepreg to room temperature before removing the roll from the protective bag of polyethylene. This may typically take six (6) hours. This will prevent the uncured prepreg product from absorbing moisture from the air, as this can affect the quality of the final part. After using the roll of prepreg it is recommended to seal the roll in the protective bag before replacing it in the freezer.

## Prepreg Lay Up and Laminating

1. Prepreg: Pay particular attention to conform the prepreg plies to the geometry of the released mould when laminating, especially in corners of small radius of curvature.
2. A non-perforated release film must be used. Lay carefully over the laminate and mould, then seal at the mould edges with tape. This will prevent any leakage of resin from the part and coming into direct contact with the vacuum bag during the cure process.
3. Breather (non-woven polyester). Make sure the breather covers the entire part and reaches all the vacuum valves. A heavyweight breather is recommended.

4. Vacuum bag. Use a generous quantity of high temperature bagging film to cover the part. Make sure the bag can fill all corners of the part with excess film, and there is no bridging of the film which could cause a bag burst in the autoclave.

5. Make sure the vacuum in the bag is to a high level, typically 980 mbar. Check the vacuum tightness of the bag before curing, by removing the vacuum pump for at least 5 minutes. The loss of vacuum pressure should not be greater than 50 mbar.

For further information, please contact Delta-Tech's Technical Service Department.

### **Exothermic Reaction**

**DT806 are reactive resin formulations which can undergo excessive exothermic heating during the initial curing process if the correct curing procedures are not followed. Care must be taken to use the heating rates and dwell temperatures in the recommended cure cycles. The risk of exotherm increases with laminate thickness and increasing cure temperature.**

**If oven vacuum bag or autoclave curing laminates are greater than 5 mm in thickness, please contact our technical department for confirmation of the correct cure cycle.**

**With press moulding, metal tooling provides a good means of dispersing the heat generated by the resin reacting. The higher temperatures do however increase the risk, so curing beyond 140°C is not advised unless care is taken.**

### **Available Products/Prepregs**

**DT806 resins can be impregnated with a wide range of fibre reinforcements, such as woven and unidirectional tapes of high strength and high modulus carbon fibre, woven E-glass, S-glass and multi-axials, with a range of fibre weights per square metre.**

### **Prepreg Storage**

Out Life: 21 days @ 21°C

Shelf Life: 12 months @ -18°C

### **Handling Precaution**

**When handling uncured resins and fibrous materials precaution should be considered. It is recommended to use clean protective gloves in order to protect the operators and avoid contamination of the components.**

## PH 840

### ESTABLISHED RAIL INTERIOR PHENOLIC PREPREG

- ↪ Excellent Fire, Smoke & Toxicity (FST) behaviour
- ↪ Excellent mechanical behaviour
- ↪ Good surface finish
- ↪ Autoclave-free processes possible
- ↪ Short curing time 15 min at 160°C / 320°F
- ↪ Long shelf and shop life

#### INTRODUCTION

PH 840 is a halogen-free modified phenolic system, designed for laminate with bright colour and good surface quality.

This prepreg material has been developed for industrial and rail applications with high specific mechanical properties and excellent FST (low heat-release and smoke-density) behaviour.

PH 840 can be cured between 120°C and 160°C (248°F and 320°F). Monolithic and sandwich structures can be easily manufactured with this prepreg. The curing can be performed by press, vacuum and autoclave moulding with a pressure of at least 0.7 bar / 10 psi. Suitable for composite structures experiencing in-service temperatures of -55°C up to +80°C.

PH 840 prepreg is suitable for:

- ↪ Rail industries
- ↪ Industrial industries
- ↪ Marine and automotive applications



## PRODUCT INFORMATION

PH 840 phenolic prepreg is available in a range of product formats. Please consult your local sales contact for further information. Full contact details can be found at [www.gurit.com](http://www.gurit.com).

PROPERTY	PH840-300-42	PH840-M850-37	PH840-600-40	TEST STANDARD
Resin	Phenolic	Phenolic	Phenolic	-
Prepreg Weight	525 ± 30 g/m <sup>2</sup>	1350 ± 50 g/m <sup>2</sup>	1000 ± 50 g/m <sup>2</sup>	EN2329
Volatile	< 6.0 %	< 6.0 %	< 6.0 %	EN 2330 (180°C/10min)
Resin Flow	> 10 % (3 piles, 130°C, 8 min, 4 bar)	> 10 % (3 piles, 130°C, 8 min, 4 bar)	> 10 % (3 piles, 130°C, 8 min, 4 bar)	EN 2332
Tackness	T0, T1, T2	T0, T1, T2	T0, T1, T2	-
Fibre Material	E-Glass	E-Glass	E-Glass	-
Fabric Weight	295 g/m <sup>2</sup> ± 5 %	850 g/m <sup>2</sup> ± 5 %	600 g/m <sup>2</sup> ± 5 %	EN 2331
Weave Style	8H Satin	Non-Grip-Fabric	HD Special	-
Service Temperature (Cured State)	-50°C to +80°C (-67°F to 176°F)	-50°C to +80°C (-67°F to 176°F)	-50°C to +80°C (-67°F to 176°F)	-
Resin Content	42 ± 3 %	37 ± 3 %	40 ± 3 %	EN 2331
Typical Roll Length	50 m / 55 yd	40 m / 44 yd	40 m / 44 yd	-
Typical Roll Width	1 & 1.27 m / 39 & 90 in	1.27 m / 40 in	1.27 m / 40 in	-

## PREPREG PROPERTIES

### TRANSPORT & STORAGE

When stored sealed & out of direct sunlight.

All prepreg materials should be stored in a freezer when not in use to maximise their useable life, since the low temperature reduces the reaction of resin and catalyst to virtually zero. However, even at -18°C (0°F), the temperature of most freezers, some reaction will still occur. In most cases after some years, the material will become unworkable.

STORAGE TEMP		UNIT	VALUE
-18°C	0°F	months	24
+21°C	+70°F	days	30

### HEALTH AND SAFETY

Please refer to product SDS for up to date information specific to this product.

### QUALIFICATIONS / FIRE PERFORMANCE

PRODUCT	FIRE PERFORMANCE / QUALIFICATIONS
PH840-300-42	→ BS 476-6 and 7 Class 1 → BS 6853 R 025
PH840-M850-37	→ NF-P 16-101/A2 (M1, F1) → UNE 23-721 (NF1)
PH840-600-40	→ DIN 6510 SA, SR2, ST2 → DIN EN 45545 HL3

## CURING CONDITIONS

PROPERTY	STANDARD CYCLE				TEST STANDARD
Recommended curing process	Press / Autoclave / Vacuum Bag				-
Spec. Pressure	0.7 bar / 10 psi				-
Heat-up	2 - 5°C/min / 3.6 - 9.0°F/min				-
Temperature	120°C / 248°F	130°C / 266°F	140°C / 284°F	160°C / 320°F	-
Cure Time	90 min	60 min	30 min	15 min	-
Cool-down	2 - 5°C/min / 3.6 - 9.0°F/min				-
Remove material at	< 80°C / 176°F				-

## LAMINATE PROPERTIES

All data presented in this datasheet is based on the mechanical testing of a single batch of material.

### MECHANICAL PROPERTIES AT ROOM TEMPERATURE (21°C / 70°F)

PROPERTY	SYMBOL	PHG840-300-42		PHG840-M850-37		PHG840-600-40		TEST STANDARD
0° Flexural Strength	$X_F$	450 MPa	65 ksi	400 MPa	70 ksi	400 MPa	58 ksi	ISO 178
0° Flexural Modulus	$E_{F0}$	22 GPa	3.19 mil	20 GPa	2.90 mil	20 GPa	2.90 mil	ISO 178
±45° Flexural Strength	$X_F$	450 MPa	65 ksi	180 MPa	26 ksi	400 MPa	58 ksi	ISO 178
±45° Flexural Modulus	$E_{F45}$	22 GPa	3.19 mil	12 GPa	1.74 ksi	20 GPa	2.90 mil	ISO 178
0° Interlaminar Tensile Shear Strength	$X_{A100}$	18 MPa	2.61 ksi	18 MPa	2.61 ksi	20 MPa	2.90 mil	AITM 1.0019
±45° Interlaminar Tensile Shear Strength	$X_{A135}$	18 MPa	2.61 ksi	14 MPa	2.03 ksi	20 MPa	2.90 mil	AITM 1.0019
Glass Transition Temp. (30 mins at 140°C)	$T_g$	> 120°C	> 257°F	> 120°C	> 257°F	> 120°C	> 257°F	ISO 6721 (DMA)
Glass Transition Temp. (15 mins at 160°C)	$T_g$	> 160°C	> 320°F	> 160°C	> 320°F	> 160°C	> 320°F	ISO 6721 (DMA)

### MECHANICAL PROPERTIES AT 80°C (176°F)

PROPERTY	SYMBOL	PHG840-300-42		PHG840-M850-37		PHG840-600-40		TEST STANDARD
0° Flexural Strength	$X_F$	300 MPa	44 ksi	tbd	tbd	tbd	tbd	ISO 178
0° Flexural Modulus	$E_{F0}$	19 GPa	2.76 mil	tbd	tbd	tbd	tbd	ISO 178
0° Interlaminar Tensile Shear Strength	$X_{A100}$	18 MPa	2.32 ksi	tbd	tbd	tbd	tbd	AITM 1.0019

### BURN BEHAVIOUR

PROPERTY	PHG840-300-42	PHG840-M850-37	PHG840-600-40	TEST STANDARD
Flammability vertical, 60s flaming – Burn length	60 mm	60 mm	60 mm	AITM 2.0002A
Flammability vertical, 60s flaming – After flame time	5 s	5 s	5 s	AITM 2.0002A
Flammability vertical, 60s flaming – After flame time of drips	0 s	0 s	0 s	AITM 2.0002A
Max. specific optical smoke density within 4 min (flaming mode)	5 Ds	5 Ds	5 Ds	AITM 2.0007A
Heat Release	25 kWh/m <sup>2</sup>	25 kWh/m <sup>2</sup>	25 kWh/m <sup>2</sup>	AITM 2.0006
Heat Release Rate	25 kW/min/m <sup>2</sup>	25 kW/min/m <sup>2</sup>	25 kW/min/m <sup>2</sup>	AITM 2.0006

## NOTICE

All advice, instruction or recommendation is given in good faith but the Company only warrants that advice in writing is given with reasonable skill and care. No further duty or responsibility is accepted by the Company. All advice is given subject to the terms and conditions of sale (the Conditions) which are available on request from the Company or may be viewed at the Company's Website: [www.gurit.com/terms-and-conditions.aspx](http://www.gurit.com/terms-and-conditions.aspx).

The Company strongly recommends that Customers make test panels and conduct appropriate testing of any goods or materials supplied by the Company to ensure that they are suitable for the Customer's planned application. Such testing should include testing under conditions as close as possible to those to which the final component may be subjected. The Company specifically excludes any warranty of fitness for purpose of the goods other than as set out in writing by the Company. The Company reserves the right to change specifications and prices without notice and Customers should satisfy themselves that information relied on by the Customer is that which is currently published by the Company on its website. Any queries may be addressed to the Technical Services Department.

Gurit are continuously reviewing and updating literature. Please ensure that you have the current version, by contacting Gurit Marketing Communications or your sales contact and quoting the revision number in the bottom right-hand corner of this page.

E [contact@gurit.com](mailto:contact@gurit.com)

W [www.gurit.com](http://www.gurit.com)

## PŘÍLOHA 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 10 working days
- When the honeycomb has to be manufactured: delivery time never exceeds 20 working days

#### MATERIAL

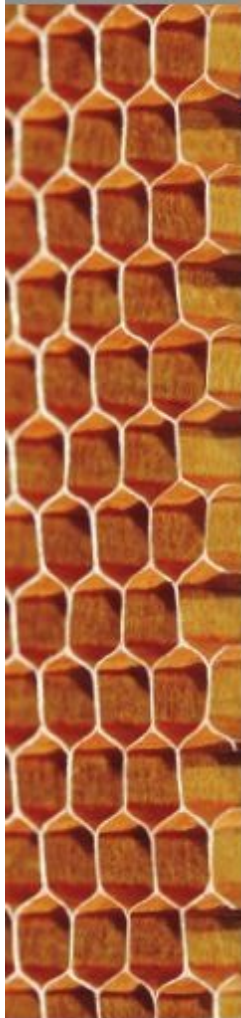
- non metallic structures made from NOMEX® 1722 paper sheets
- bonded together and coated with a phenolic resin

#### 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 (N/R <sup>2</sup> )		Shear strength (N/R <sup>2</sup> )		Shear modulus (N/R <sup>2</sup> )		
	base	stabilized	L	W	L	W	
<b>HEXAGONAL CONFIGURATION</b>							
 C2 - 3,2	- 48	1,8	2,0	1,2	0,7	36,0	24,0
	- 64	3,0	3,4	1,6	0,85	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	1,8	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	1,3	1,57	0,82	0,4	28,8	18,5
<b>OVEREXPANDED CONFIGURATION</b>							
 C2 - 4,8	- 29 OX	0,5	0,6	0,25	0,3	8,0	12,0
	- 48 OX	1,7	2,0	0,5	0,7	15,0	25,0
C2 - 6,4	- 48 OX	1,7	2,0	0,5	0,55	12,5	23,0
	- 56 OX	2,0	2,1	0,6	0,7	16,0	29,0

No porosity density: theoretical tolerance is +/- 13% from the nominal density. These mechanical properties are only representative. If required, specifications must be confirmed by SCHÜTZ in writing.

www.schutz.com



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 <sup>3</sup>



SCHÜTZ GmbH & Co. KGaA  
 Schützstr. 12  
 D-52425 Eilers  
 Phone: +49 (0) 2626/77-22 1  
 Fax: +49 (0) 2626/77-45 1  
 or order@schutz.net  
 www.schutz.net