

# **Volba materiálu a jeho ověření pro dopravní aplikace**

Michal Hnaníček

---

Diplomová práce  
2016



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2015/2016

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Michal Hnaníček**  
Osobní číslo: **T14528**  
Studijní program: **N3909 Procesní inženýrství**  
Studijní obor: **Výrobní inženýrství**  
Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Volba materiálu a jeho ověření pro dopravní aplikace**

Zásady pro vypracování:

1. Literární rešerše
2. Problematika kompozitních materiálů, rozdělení, základní složky, synergický účinek.
3. Aktuální trendy použití materiálu v dopravním průmyslu.
4. Požadavky na kompozitní materiály pro dopravní aplikace, vlastnosti, technologické aspekty výroby, vady kompozitních materiálů a jejich eliminace.
5. Experimentální část
6. Návrh materiálového složení kompozitních systému pro dopravní aplikaci.
7. Výroba zkušebních těles pomocí zvolené technologie.
8. Experimentální testování zkušebních těles dle zvolených norem.
9. Vyhodnocení experimentálních výsledků, stanovení technologického postupu výroby, včetně technologických podmínek, diskuze.
10. Závěr.

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

**Dle doporučení vedoucího DP**

Vedoucí diplomové práce:

**doc. Ing. Soňa Rusnáková, Ph.D.**

Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce:

**8. ledna 2016**

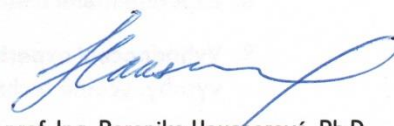
Termín odevzdání diplomové práce:

**13. května 2016**

Ve Zlíně dne 12. dubna 2016



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



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

Příjmení a jméno: HUAMICEK MICHAL

Obor: VI

## 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 13.5.2016



<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 nevydělečně 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:

<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 vzdělávacího 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). Odpirá-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 přihlédne k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

## **ABSTRAKT**

Diplomová práce se zabývá literární studii daného tématu a hodnocení únavového chování sendvičových struktur. Skládá se ze dvou samostatných částí. Teoretická část je zaměřena na celkový přehled kompozitních materiálů s důrazem na sendvičové konstrukce v dopravním průmyslu. Praktická část obsahuje technologii výroby a složení zkušebních vzorků, popis mechanických zkoušek, dále samotné provedení mechanický zkoušek. Závěrem je vyhodnocení naměřených dat. Výsledky byly zpracovány do tabulek a grafů.

Klíčová slova: kompozit, prepreg, sendvičová struktura, výztuž, tkanina, únava

## **ABSTRACT**

The thesis deals with the literary study of the topic and the evaluation of fatigue behavior of sandwich structures. It consists of two separate parts. The theoretical part is focused on an overview of composite materials with emphasis on sandwich construction in the transport industry. The practical part includes manufacturing technology and the composition of the test specimens, description of the mechanical tests, the execution of mechanical tests. The results have been processed into charts and graphs. Finally, the evaluation of the measured data.

Keywords: composite, prepreg, sandwich structure, reinforcement, fabric, fatigue

Chtěl bych poděkovat paní doc. Ing. Soně Rusnákové, Ph.D. za pomoc při vzniku této Diplomové práce. Panu Ing. Vladimíru Rusnákovi a firmě FORM s. r. o. za spolupráci, materiální a technickou pomoc při výrobě vzorků, za zajištění zkoušení vzorků u externích firem a finanční záštitu nad těmito zkouškami. V neposlední řadě bych chtěl poděkovat rodičům a rodině za dlouholetou podporu.

# OBSAH

<b>ÚVOD</b> .....	<b>10</b>
<b>I TEORETICKÁ ČÁST</b> .....	<b>11</b>
<b>1 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY</b> .....	<b>12</b>
1.1    ROZDĚLENÍ KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ .....	12
1.2    VÝZTUŽ.....	13
1.3    DRUHY VLÁKEN .....	13
1.3.1    Skleněná vlákna .....	13
1.3.2    Aramidová vlákna .....	13
1.3.3    Uhlíková vlákna .....	13
1.4    MATRICE – POJIVO .....	15
1.4.1    Polymerní matrice .....	15
1.4.2    Kovové matrice .....	16
1.4.3    Skleněné, sklokeramické a konstrukční keramické matrice .....	16
1.4.4    Uhlíkové matrice .....	16
1.5    SENDVIČOVÉ KONSTRUKCE .....	17
1.5.1    Složení vnější vrstvy sendvičové konstrukce.....	17
1.5.2    Kovové materiály .....	18
1.5.3    Druhy sendvičových jader.....	19
1.5.3.1    Balzové jádro .....	19
1.5.3.2    Voštiny .....	19
1.5.3.3    Pěny .....	20
1.5.4    Vady sendvičových konstrukcí .....	23
<b>2 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY V DOPRAVNÍM PRŮMYSLU</b> .....	<b>24</b>
2.1    KŘÍDLO VĚTRONĚ.....	25
2.2    KOMPOZITNÍ LOPATKA VENTILÁTORU PRO POHONNOU JEDNOTKU .....	26
2.3    CELOKOMPOZITNÍ LETOUN VL-3 .....	26
2.4    TOALETA VE VLAKU .....	27
2.5    KABINA VLAKU .....	27
2.6    KOREJSKÝ VLAK TTX.....	28
2.7    NÁVRH OKENNÍHO RÁMU FIRMY TRB .....	29
2.8    SENDVIČOVÁ KONSTRUKCE INREKTOR.....	29
<b>3 SMĚRY VÝVOJE MULTIFUNKČNÍCH KOMPOZITŮ</b> .....	<b>30</b>
3.1    ELEKTRICKÁ A TEPELNÁ VODIVOST.....	30
3.2    STRUCTURAL HEALTH MONITORING (SHM).....	31
3.3    SELF-HEALING .....	31
3.4    INDIKACE POŠKOZENÍ .....	32
<b>II PRAKTICKÁ ČÁST</b> .....	<b>33</b>
<b>4 CÍL DIPLOMOVÉ PRÁCE</b> .....	<b>34</b>
<b>5 ZKUŠEBNÍ VZORKY</b> .....	<b>35</b>
5.1.1    Vložky a závitové inserty .....	39



5.2	POSTUP VÝROBY VZORKŮ PRO TAHOVOU ZKOUŠKU .....	40
5.3	MECHANICKÉ ZKOUŠKY .....	46
5.3.1	Zkouška dle normy ČSN EN ISO 178 .....	46
5.3.2	Stanovení tahových vlastností podle ČSN EN ISO 527-4 .....	47
5.3.3	Zkouška odrazivosti UIC CODE 844-4 R .....	50
5.3.4	Kónický kalorimetr ISO 5660-1 .....	51
5.4	VYHODNOCOVÁNÍ VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ .....	56
5.5	TŘÍBODOVÁ ZKOUŠKA OHYBEM .....	57
5.5.1	Trhací stroj Zwick 1456 .....	57
5.6	VÝSLEDKY ZKOUŠKY TŘÍBODOVÉHO OHYBU .....	58
5.6.1	Vzorky A .....	58
5.6.2	Vzorky B .....	59
5.6.3	Vzorky C .....	61
5.6.4	Vyhodnocení tříbodové ohybové zkoušky .....	64
5.7	MĚŘENÍ SÍLY POTŘEBNÉ K VYTRŽENÍ ZÁVITOVÉHO INSERTU .....	68
5.7.1	Vzorky M8-4S .....	68
5.7.2	Vzorky M8-2S .....	69
5.7.3	Vzorky M8-2B .....	69
5.7.4	Vzorky M6-4S .....	70
5.7.5	Vzorky M6-4B .....	71
5.7.6	Vzorky M6-2S .....	71
5.7.7	Vyhodnocení síly potřebné k vytržení insertu .....	72
5.8	VÝSLEDKY ZKOUŠKY ODRAZIVOSTI .....	73
5.8.1	Průběh zkoušky .....	74
5.8.2	Vyhodnocení zkoušky odrazivosti .....	76
5.9	VÝSLEDKY KÓNICKÉHO KALORIMETRU .....	76
<b>6</b>	<b>DISKUZE VÝSLEDKŮ .....</b>	<b>85</b>
	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>86</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....</b>	<b>88</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK .....</b>	<b>91</b>
	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>93</b>
	<b>SEZNAM TABULEK .....</b>	<b>96</b>
	<b>SEZNAM PŘÍLOH .....</b>	<b>97</b>

## ÚVOD

Kompozitní materiály jsou velmi často využívány současnou moderní výrobní technologií, zejména díky možnosti navrhovat velmi lehké konstrukce s vysokými hodnotami mechanických vlastností. Pevnost některých kompozitních materiálů se blíží k hodnotám pevnosti oceli při výrazně nižší hmotnosti.

Princip kompozitních materiálů umožňuje, díky anizotropii, navržení konstruovaného dílu, respektive skladby jeho materiálu, tak aby odpovídal předpokládanému zatížení. Při použití kompozitních materiálů lze docílit vysoké tvarové složitosti dílů, vysoké kvality a přesnosti jejich povrchu.

Mezi další výhody patří odolnost proti korozi, nízká teplotní roztažnost, příznivé únavové vlastnosti. Z hlediska nákladů je výhodný menší počet dílů a minimum odpadu.

Nevýhodou je jejich vysoká cena, v některých případech malá tuhost, problémy při zavádění osamělých sil a nutnost přísného dodržování technologických a bezpečnostních postupů.

Ve své diplomové práci se zabývám sendvičovými kompozitními materiály, které se využívají v dopravním průmyslu.

V teoretické části se objevují základní informace kompozitních materiálů a jejich využití v dopravním průmyslu.

Praktická část diplomové práce se věnuje experimentálnímu vyhodnocení základní charakteristiky sendvičových kompozitních materiálů pomocí mechanických zkoušek.

## **I. TEORETICKÁ ČÁST**

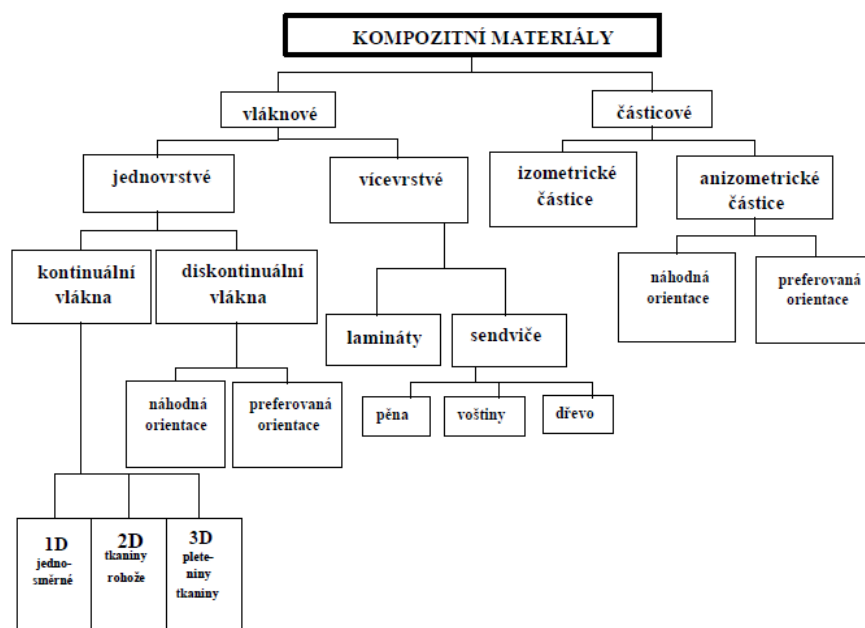
# 1 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY

Pod pojmem kompozit chápeme materiál složený minimálně ze dvou chemicky a fyzikálně odlišných fází, z nichž první fáze tzv. matrice slouží k uložení druhé tzv. výztuže, většinou zpevňující fáze. Výztuž bývá většinou tvrdší, tužší a pevnější nespojitá složka, která má ve srovnání s matricí o jeden až dva řády vyšší pevnost a tuhost. Pokud je výztuž v podobě vláken, deformují se méně než matrice a tak nesou veškeré napětí působící na kompozitní dílec. Matrice bývá spojitá a obvykle poddajnější složka a tím je prakticky bez napětí. Abychom vícefázový materiál mohli zařadit mezi kompozity, musí splňovat následující podmínky: [1,9]

- Podíl výztuže musí být větší než 5%.
- Vlastnosti výztuže a matrice se liší, výztuž je významně pevnější v tahu a obvykle tužší než matrice.
- Kompozit musí být připraven smícháním složek. [1,9]

## 1.1 Rozdělení kompozitních materiálů

Kompozitní materiály lze rozdělit podle použitého materiálu matrice, geometrie výztuže, technologie výroby atd. Nejčastější rozdělení kompozitních materiálů vychází z rozdělení výztuží, které bylo uvedeno v předešlé části. Dle geometrie výztuže se kompozity dají členit podle Obr. 1. [8]



Obr. 1. Schéma rozdělení kompozitních materiálů. [8]

## 1.2 Výztuž

Pevnost vláken roste se zmenšujícím průřezem, protože přirozené defekty struktury jsou u vláken malých průměrů také malé a navíc příznivě orientované svým delším rozměrem ve směru osy vlákna. Pevnost vlákna závisí také na jeho délce. Části vzniklé porušením vlákna při tahovém namáhání mají větší pevnost než vlákno původní, protože k prvnímu lomu došlo z největšího defektu vlákna. Většina vyráběných vláken má kruhový průřez o průměru od 5 do 20  $\mu\text{m}$ . Menší průměry se nepoužívají z technologických důvodů - produkty s velmi tenkými vlákny se obtížně prosycují matricemi. [2,7]

## 1.3 Druhy vláken

### 1.3.1 Skleněná vlákna

Nejběžnější skleněná vlákna (CF – Carbon Fiber) se označují jako E – vlákna. Tyto vlákna mají pravidelný kruhový průřez o průměru 3,5 až 24  $\mu\text{m}$ . Sklo je odolné proti ohni a mnoha chemikáliím, má poměrně vysokou pevnost v tahu a nízký modul pružnosti. Vlhkost však pevnost vláken snižuje a odolnost proti trvalému namáhání a pevnost v oděru je rovněž nízká. Kompozity s vlákny s menším průměrem mají vyšší hodnoty pevnosti v tahu, naopak kompozity s vlákny s větším průměrem mají vyšší hodnoty pevnosti v tlaku. Skleněná vlákna se často používají jako výztužný materiál do kompozitních materiálů, protože mají vysokou pevnost a jsou ekonomicky výhodná. [2,10]

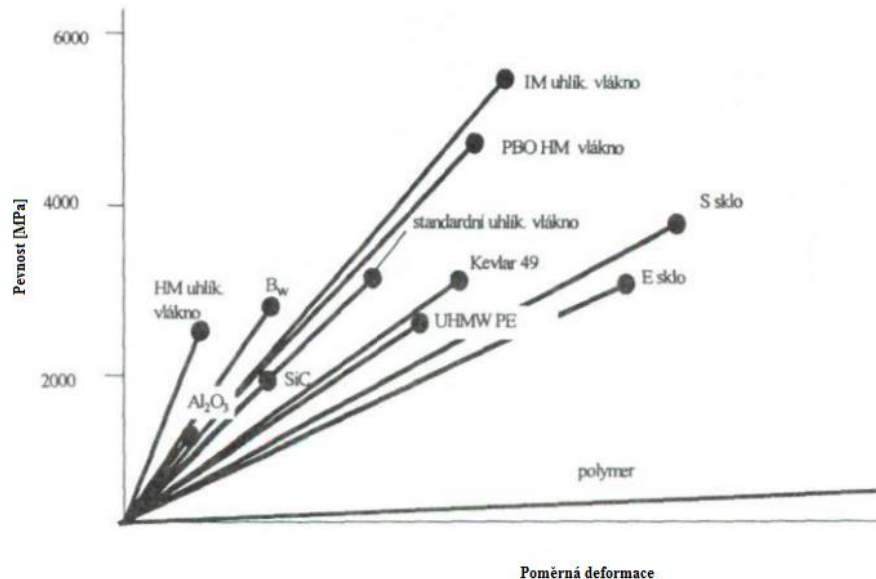
### 1.3.2 Aramidová vlákna

Aramidová vlákna (AF – Aramid Fiber) jsou vlákna na bázi lineárních organických polymerů, jejichž kovalentní vazby jsou orientovány podle osy vlákna. Jsou to nejlehčí výztužující vlákna s nízkou hustotou  $\rho = 1,440 \text{ kg/m}^3$ , výhodou těchto vláken je vysoká pevnost, tuhost, velká odolnost proti abrazi a schopnost plasticky se deformovat při působení síly kolmo na osu vlákna. Nejčastěji se využívají jako výztuž kompozitů na součásti dopravních prostředků a stavebního materiálu, kordy do pneumatik a v leteckém průmyslu. Nejznámějším aramidovým vláknem je Kevlar. [1]

### 1.3.3 Uhlíková vlákna

Uhlíkové vlákno je název pro dlouhý, tenký pramen materiálu o průměru 5 - 8  $\mu\text{m}$  převážně z atomů uhlíku. Atomy uhlíku jsou spojeny dohromady v mikroskopické krystaly,

kteřé jsou více méně orientovány paralelně k dlouhé ose vlákna. Mezi výhody uhlíkových vláken patří nízká hustota  $\rho = 1600 - 2000 \text{ kg/m}^3$ , dobrá elektrická a tepelná vodivost, vysoká pevnost i hodnoty  $E$  – modulu až do teploty  $500^\circ\text{C}$ . Nejčastěji se používají při výrobě částí letadel, sportovního vybavení, listů větrných generátorů. [1]



Obr. 2. Znárodnění pevností a tuhostí vláken [30]

- HM uhlík - vysoce tuhé uhlíkové vlákno ( $E=400-800 \text{ GPa}$ )
- Bw - bórové vlákno CVD ,průměr 100-250um ( $E=400 \text{ GPa}$ )
- $\text{Al}_2\text{O}_3$  a SiC - keramická vlákna vyrobená z polymerních prekusorů ( $E=380 \text{ GPa}$  a  $E=300\text{GPa}$ )
- IM uhlík - „středněmodulové“ vlákno s vysokou pevností ( $E=290 \text{ GPa}$ )
- PBO HM - polymerní vlákno poly-para-fenylenbenzobisoxazolu s vysokou pevností ( $E=280 \text{ GPa}$ ) standardní uhlíkové vlákno ( $E=230 \text{ GPa}$ )
- Kevlar®49 - polymerní aramidové vlákno od firmy Du Pont ( $E=130 \text{ GPa}$ )
- UHMW PE - polymerní vlákno z PE s vysokou molární hmotností (Spectra®1000 má  $E=170(\text{GPa})$ )
- S-sklo - skleněné vlákno s větším podílem  $\text{SiO}_2$  a  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ( $E=85 \text{ GPa}$ )
- E-sklo - skleněné vlákno ( $E=73 \text{ GPa}$ )

## 1.4 Matrice – pojivo

Je to materiál, kterým je prosycen systém vláken a partikulárních komponent tak, že po zpracování vznikne tvarově stálý výrobek. Úkolem matrice je zaručení geometrického tvaru, zavedení a přenos sil, ochrana vláken před vlivy okolí, zajištění geometrické polohy vláken a tvarové stálosti výrobku. Zásadním hlediskem pro kvalitu kompozitu je zajištění adheze na fázovém rozhraní matrice – vlákno. Pro dosažení lepší fyzikální a příp. i chemické vazby mezi vláknem a matricí se nanese na vlákno apretace vhodná pro určitý druh matrice. Matrice musí mít vhodnou viskozitu a povrchové napětí, aby vlákno smočila úplně a bez bublin. [1]

Matrice mohou být:

- Polymerní
- Kovové
- Skleněné, sklokeramické, keramické
- Uhlíkové [1]

### 1.4.1 Polymerní matrice

Kromě velké měrné pevnosti a měrného modulu pružnosti jsou kompozity s polymerní matricí používány také proto svou dobrou korozivzdornost a chemickou odolnost, dobré dielektrické vlastnosti a elektrickou nevodivost (pouze kompozity se skleněnými, křemenými nebo polymerními vlákny) a dobrou propustnost pro rentgenové záření (kompozity s uhlíkovými vlákny). Polymerní matrice se dělí na dvě základní skupiny, reaktoplasty a termoplasty. Reaktoplasty mají při teplotě 20 °C pevnost v tahu 20 až 80 MPa a modul pružnosti – E v rozmezí 2 až 5,2 GPa. Při výběru vhodné polymerní matrice rozhodují požadované mechanické vlastnosti kompozitu a jeho tepelná či chemická odolnost, eventuálně další vlastnosti (dobré kluzné vlastnosti, zdravotní nezávadnost, odolnost při rozpouštění a agresivnímu prostředí, ...). Termoplast je většinou houževnatější než reaktoplast, mez kluzu (případně pevnost) při teplotě 20 °C je ale také menší než 100 MPa a modul pružnosti se pohybuje od 2 do 4 GPa. Maximální pracovní teplota závisí na nadmolekulární struktuře termoplastu – u amorfních plastů je v průměru o 50 °C menší než teplota skelného přechodu ( $T_g$ ), u semikrystalických termoplastů je o 50 až 100 °C menší než teplota tání krystalů ( $T_m$ ). [1,2,9]

### 1.4.2 Kovové matrice

Použití kovové matrice pro kompozity má proti nejčastěji používané polymerní matici některé výhody, např. elektrickou vodivost, teplotní vodivost, nehořlavost, smykovou pevnost, tvárnost, odolnost obrusu, možnost povlakování, spojování, tvarování, vyšší tepelnou odolnost, odolnost vlhkému prostředí, erozi i povrchovému poškození. Proti tomu specifické vlastnosti (pevnost, tuhost) za normálních teplot jsou nižší než u polymerních kompozitních materiálů a také výrobní nároky jsou podstatně vyšší. V současné době se soustřeďuje zájem zejména na tři skupiny kovových matic, určených pro různé teplotní rozsahy použití: hliníkové slitiny pro teploty 300 až 400 °C, titanové slitiny pro teplotní rozsah 500 až 600 °C a superslitiny na bázi niklu, železa a kobaltu pro 1000 až 1150 °C. [1,2,9]

### 1.4.3 Skleněné, sklokeramické a konstrukční keramické matrice

Matrice keramických kompozitu může být ze skla, sklokeramiky a konstrukční keramiky. Jsou křehké, silně vrubově citlivé a mají malé poměrné prodloužení při přetržení (většinou menší než vlákna). Tuhá a křehká matrice ( $E = 400$  GPa) špatně přenáší zatížení do vláken. Kovová vlákna (W, Ta, Nb, Mo) zvětšují lomovou energii kompozitů s keramickou maticí. Maximální objemový podíl vláken je 50 %, při větším obsahu vláken je matrice pórovitá. U těchto matic se využívá jejich tepelné a chemické odolnosti. [1,2,9]

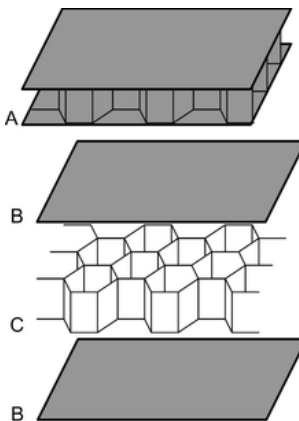
### 1.4.4 Uhlíkové matrice

Uhlíkové matrice se používají v kompozitech uhlík - uhlík. Byly vyvinuty pro součásti, které jsou vystaveny extrémně vysokým teplotám, např. trysky raket, disky a třecí elementy letadlových brzd, tepelná izolace u raketoplánu. Jsou složeny z uhlíkové matrice, která může být vyztužena tkaninou z uhlíkových vláken, 3-D tkaninou, v závislosti na aplikaci. Křehká a málo pevná uhlíková matrice je tvořena drobnými krystaly pyrolytického grafitu, který vznikne pyrolýzou fenolformaldehydové pryskyřice nebo mezofázové smoly. Mechanismus lomového chování je stejný jako u kompozitu s keramickou maticí. Modul pružnosti  $E$  grafitové matrice je 15 až 25 GPa. [2,9]



## 1.5 Sendvičové konstrukce

Sendvičové materiály tvoří speciální třídu kompozitních materiálů, které řadíme k vrstveným konstrukcím. Vznikají minimálně ze tří materiálových vrstev, odlišného charakteru vzájemně pevně spojenými. Dvě z nich jsou vnější vrstvy, které obklopují jádro z obou stran. Velmi důležitá je vazba povrchová vrstva – jádro. Jádro se vyznačuje nízkou hmotností, hrubší a je z pravidla méně pevná hmota. Vnější části jsou tenké avšak tuhé. [10,12]



Obr. 3. A - Sendvičový panel, B - vnější vrstvy, C – jádro [10]

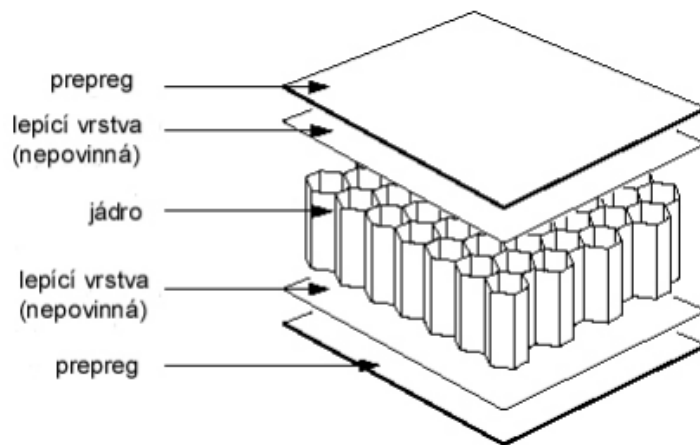
### 1.5.1 Složení vnější vrstvy sendvičové konstrukce

Vnější vrstvy sendvičových konstrukcí se používají pevné a relativně tenké materiály, které musí současně splňovat požadavky na výrobu s ohledem na profilování a ohýbání. Mohou být použity krycí vrstvy např. z hliníku, oceli, laminátu, dřeva. Vnější vrstvy musí mít schopnost odolávat proti vlhkosti, nehořlavost, korozivzdornost, absorbovat energii od nárazu. Mezi výhody patří nízká hmotnost, tuhost, pevnost, nízká cena. [1]

### Prepregy

Ploché útvary, jejichž hlavní složkou je výztuž předimpregnovaná pryskyřicí, které jsou částečně vytvrzené, se nazývají prepregy. [10]

Samolepící prepreg nevyžaduje dodatečnou lepicí vrstvu a umožňuje výrobu lehké konstrukce při snížených nákladech výroby. K výhodám prepregu patří velmi nízká hmotnost, vysoká tuhost, trvanlivost, volnost při návrhu, snížení nákladů výroby. Prepregy je nutné pro jejich malou životnost skladovat v chladicích zařízeních a vytvrzují se při teplotách cca. 120 °C. Aplikace prepregu se řadí do kategorie suché technologie (čistě). [1]



Obr. 4. Prepregová sendvičová konstrukce. [1]

### Lamináty

Jsou složeny z jednotlivých rozlišitelných vrstev. Nejčastěji se používají tkaniny se skelnými, uhlíkovými a aramidovými vlákny. Nejčastěji používaná skleněná vlákna se vyrábí z E-skloviny. Tyto vlákna mají dobré mechanické vlastnosti a dobrou odolnost vůči vnějším vlivům, při zachování relativně nízké ceny. Sklovina, která má o 40 až 70 % vyšší pevnost, se označuje písmenem R. Uhlíková vlákna, vyrobená z polyakrylonitrylu (PAN) se středním modulem pružnosti a dobrou pevností v tahu se značí písmeny HS (HighStrength). Zkratkou HM (HighModulus), se značí vysoko modulová grafitizovaná vlákna z PAN. Velmi pevná vlákna z PAN se středním modulem pružnosti se označují písmena IM (IntermediateModulus) a vlákna s pevností větší než 6500 MPa mají zkratku SHT (Super High-tensile). Aramidová vlákna se vyrábějí v různých druzích, které se liší hodnotami modulu pružnosti. Typy s nízkým E-modulem a vyšším protažením se označují zkratkou LM (LowModulus). [1,7]

#### 1.5.2 Kovové materiály

Nejpoužívanějším kovovým materiálem pro krycí vnější vrstvu je ocel, dále slitiny titanu a slitiny hliníku. Hliníkové plechy se používají pro sendvičové panely, u kterých jsou kladeány speciální požadavky na hygienu nebo odolnost proti korozi, například v potravinářském průmyslu. Výhodou kovových materiálů je vysoká tuhost a pevnost, nízké náklady a vysoká odolnost proti rázům. Naopak nevýhodou je vysoká hustota oproti nekovovým materiálům. [13]



Obr. 5. Hliníková plošina (jádro – hliníková voština) pro vozíčkáře v autobusu [13]

### 1.5.3 Druhy sendvičových jader

Význam sendvičové struktury spočívá v tom, že mezi vnějšími vrstvami přenášejících zatížení na tah a tlak, uprostřed je jádro, které přenáší smykové zatížení. Vždy záleží na tom, jaké chceme výsledné vlastnosti sendvičové konstrukce a dle toho volíme materiál, typ konstrukce jádra, velikost (tloušťku). [10,12]

#### 1.5.3.1 Balzové jádro

Balza je rychle rostoucí strom, dorůstá výšky až 30m. Je velmi pórovitá a tvořena protáhlými velkými uzavřenými buňkami, takže například sendvičové panely lze vyrábět technikou infuze pryskyřice. Po vysušení buňky obsahují vlákna celulózy. Balza má vyšší hustotu ( $40 - 340 \text{ kg/m}^3$ ) než jiné konstrukční jádra. Oproti polymerním pěněm teplem nemekne a vyznačuje se i menší tepelnou vodivostí. Využívá se v listech větrných turbín a v dopravním průmyslu. [10,12]

#### 1.5.3.2 Voštiny

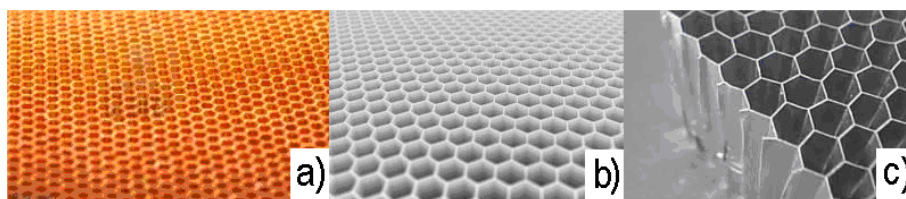
Voština je odvozena z podobnosti se šestihrannou strukturou pláství včelího medu, používá se jako jádro v mnoha geometrických konfiguracích. Volba tvaru závisí na způsobu namáhání sendviče a způsobu zpracování. Voštiny se formují z plošného materiálu několika různými technologiemi. Jako výchozí materiál se používají skleněná, aramidová, uhlíková fólie, nebo textilie a hliníkový plech.[15,16]

Stěny voštin mohou být děrované. Buňky lze vyplnit pěnou. Poté dochází k lepšímu spojení s potahem, nárůstu mechanických vlastností a lepší akustické a tepelné izolaci. Z porovnání pevností pěnových a voštinových jader vyplývá, že voštinové jádra mají lepší mecha-

nické vlastnosti než pěnová jádra při srovnatelné hustotě. Mechanické vlastnosti závisí na tloušťce stěny buňky a materiálu. Papírová voština má nízkou pevnost a tuhost, hliníková naopak vysokou pevnost, tuhost a vysoce žáruvzdorné. [12,14,17]

### **Materiály voštin:**

- **Nomex voština** – určitá forma papíru, která je tvořena kevlarovými vlákny slepené fenolovou pryskyřicí. Nomex voština má vysokou pevnost a velmi dobrou odolnost proti ohni, hustotu 32-96 kg/m<sup>3</sup> a tlakovou pevnost 1-7 MPa, buňky mají průměr od 3,2 do 5 mm. Nevýhodou je její vysoká cena oproti jiným jádrovým materiálům.
- **Termoplastická voština** – vyrobena z termoplastů, lehčí, snadná recyklovatelnost. Hlavní nevýhoda je obtížné dosažení vazby mezi voštinou a pláštěm.  
Nejpoužívanější materiály:
  - ABS se využívá pro svoji tuhost, houževnatost, povrchovou tvrdost a pevnosti v rázu
  - PC pro svoji UV stabilitu, dobrou tepelnou odolnost a samozhášivost
  - PP pro dobrou chemickou odolnost
  - PE pro nízkou cenu jádrového materiálu
- **Hliníková voština** – nabízí jeden z nejlepších poměrů pevnosti a hmotnosti pro konstrukční materiály. Přes jejich dobré mechanické vlastnosti a relativně nízkou cenu je nutno používat u některých aplikací s opatrností (u lodí, problém s korozí). Velkou nevýhodou je, že nemá mechanickou paměť, tj. při rázu, voština trvale zdeformovaná, plášť se vrátí do svého původního stavu.[15,18]



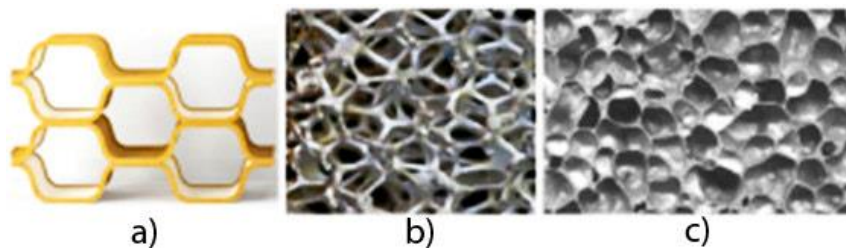
Obr. 6. a) aramidová voština, b) voština z PP, c) hliníková voština [15]

### **1.5.3.3 Pěny**

Polymerní pěny jsou dvoufázové systémy se spojitou termoplastovou, nebo reaktoplastovou maticí, v níž je ve značném objemovém podílu od 50 do více než 90% dispergovaná plynová fáze. Protože polymerní pěny jsou fázově heterogenní, lze je považovat za kompozitní systém. [10]



Obr. 7. Pěny [10]



Obr. 8. a) Honeycomb, b) pěna s otevřenými buňkami, c) pěna s uzavřenými buňkami [10]

### Materiály Pěn

Jednou z nejčastějších forem nosného materiálu jsou pěny. Vyrábějí se z mnoha druhů polymerů, z polyvinylchloridu (PVC), polystyrenu (PS), polyuretanu (PU), polyetherimidu (PEI) a styreneacrylonitrilu (SAN). Hustota pěn se pohybuje od  $30 \text{ kg/m}^3$  do  $300 \text{ kg/m}^3$ , nejčastěji se používají pěny o hustotě  $40\text{-}200 \text{ kg/m}^3$ . Se stoupající hustotou rostou i mechanické vlastnosti, např. pevnost jádra ve smyku. [6,8]

#### ➤ PVC

Nejpoužívanější jsou PVC pěny s uzavřenými buňkami. Struktura polymerních řetězců je lineární nebo zesítěná. Lineární struktura se snadno tváří teplem a je tuhá, ale celkové mechanické vlastnosti jsou horší než u zesíťované PVC pěny. Nabízí dobrou odolnost proti absorpci vody a vůči mnoha chemikáliím. Jsou výhodné pro vyváženou kombinaci statických a dynamických vlastností.

#### ➤ PUR

Pěna se dá velmi dobře opracovat na požadovaný tvar. Velmi často jsou využívána pro tepelnou izolaci, hlukovou izolaci. Má nízkou cenu, ale je taky velmi křehká.

➤ PS

Polystyrenová pěna je nejlevnější, ale má nízké mechanické vlastnosti. Přestože se polystyrenové pěny hojně využívají ve výrobě windsurfingového prken, kde se využívá nízké hmotnosti, avšak se nevyžívají ve vysoce pevnostních konstrukčních aplikacích.

➤ SAN

Pěny kopolymeru SAN se chovají podobným způsobem jako pěny PVC – příčně síťované, ale mají mnohem větší protažení a houževnatost. PVC požívají změkčovadla při výrobě, kdežto kopolymer SAN má vlastnosti, které vycházejí z polymeru samotného, proto se vlastnosti z věkem tak výrazně nemění.

➤ PEI

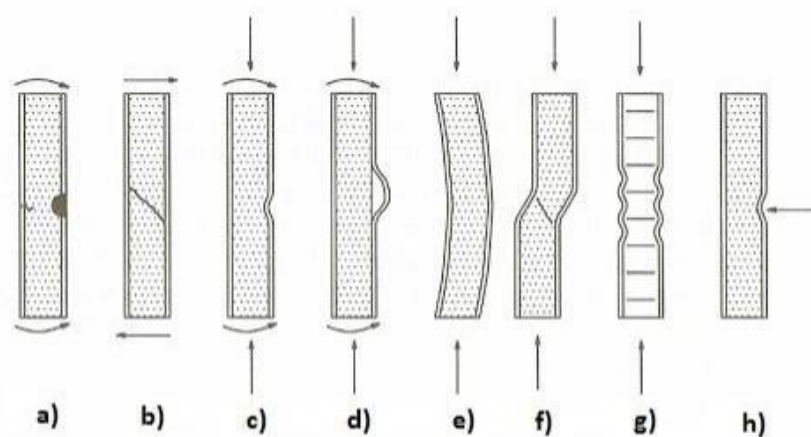
Vlastnosti tohoto materiálu vynikají především odolností proti požáru a odolností proti provozní teplotě. Použití na tepelné a protipožární konstrukční aplikace v rozmezí teplot ( - 194°C do +180°C). [8,15,16]

Tab. 1. Vybrané vlastnosti pěn.

	PVC	PUR	PS	SAN	PEI
<b>Hustota [kg/m<sup>3</sup>]</b>	80	10-300	32-35	60-200	80
<b>Pevnost v tahu [MPa]</b>	2	0,07-0,22	1-10	0,8-4,2	1,7
<b>Pevnost ve smyku [MPa]</b>	1,2	0,7-4,2	0,1	0,68-2,95	1
<b>Absorpce vody [%]</b>	6	2-5	0-5	0,1-2,5	4
<b>Tepelná vodivost [W/m<sup>2</sup>K]</b>	0,033	0,022-0,028	0,017	0,032-0,046	0,037

### 1.5.4 Vady sendvičových konstrukcí

Výsledná únosnost sendviče v ohybu není dána pouze materiálovou charakteristikou, jako je tomu u homogenních výrobků, ale je výslednicí složitého mechanického chování sendvičové struktury. Únosnost sendvičové konstrukce je omezena různými poruchami a závisí jak na geometrických, tak i na materiálových a technologických parametrech. Vnější krycí vrstvy sendvičové struktury jsou náchylné k určitým formám ztráty stability, protože je lze přirovnat k tenkostěnným prvkům uloženým na pružném podkladě jádra. Porušení mohou být doprovázena odtržením – separací nosných vrstev od jádra a jejich následným porušením. Osamělá příčná zatížení mohou způsobit lokální poškození v důsledku stlačení, případně porušení jádra a tím dochází v těchto místech ke snížení únosnosti sendvičové konstrukce. [5]



- a) Lom nebo plastické chování potahu
- b) Smykové porušení jádra
- c) Zborcení jádra a zvlnění potahu
- d) Porušení adhesivní vrstvy a zvlnění potahu
- e) Ztráta vzpěrné stability
- f) Zvlnění smykem
- g) Zvrásnění
- h) Lokální stlačení

Obr. 9. Příklady poruch sendvičových konstrukcí. [4]

## 2 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY V DOPRAVNÍM PRŮMYSLU

Polymery a kompozity se v současnosti ve velké míře využívají při konstrukci automobilů. Velké možnosti v automobilovém průmyslu mají polymerní kompozity, které jsou v porovnání s tradičními kovovými materiály lehčí a disponují lepšími mechanickými vlastnostmi. V roce 1970 se při výrobě automobilu střední třídy spotřebovalo 40 kg plastů, v roce 1983 až 90 kg a v roce 1995 přibližně 130 kg. Podíl plastů na celkové hmotnosti automobilu představuje 10 až 15 %. Z materiálů se především používají termoplasty vyztužené skelnými vlákny, přičemž ve speciálních případech se používají i vlákna uhlíkové.

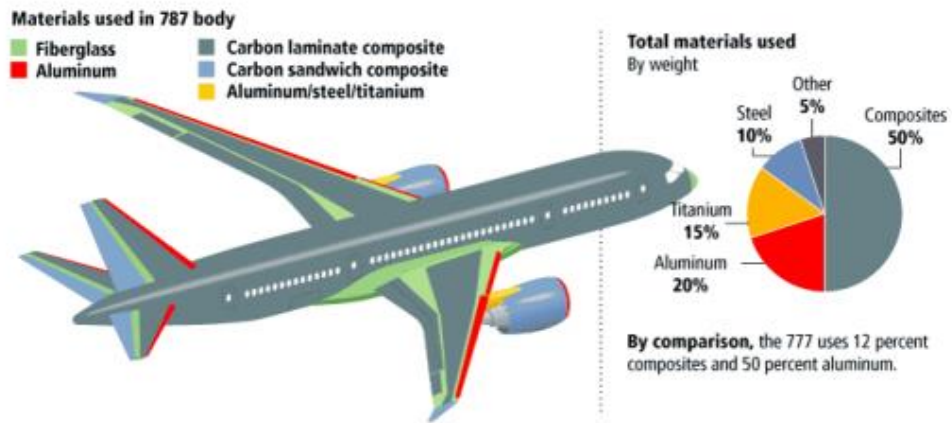
V dnešní době se velké procento inovací v oblasti kompozitních materiálů používá v leteckém a kosmickém průmyslu. Je to opět z důvodu snižování hmotnosti, z čeho vyplývá snižování spotřeby paliva. Zatímco v sedmdesátých letech byl podíl uhlíkových kompozitů použitých v Airbusu pouze 5%, na začátku devadesátých let hodnoty 10% a na přelomu tisíciletí 15%. V roce 2005 v Boeingu činí 60%.

Materiál a konstrukce dopravního prostředku má mít minimální váhu při zachování dostatečné pevnosti a tuhosti a zároveň maximální výkon, což jsou protichůdné požadavky. Oproti klasickým kovovým konstrukcím umožňují odlišnou filosofii konstrukce a úspory ve výrobě- menší množství vyráběných dílů, snížení pracnosti, menší odpad materiálu a jednodušší výroba složitých tvarových dílů.

Kladení vrstev kompozitů umožňuje plynule měnit tloušťku skořepiny, bohužel u klasických konstrukcí lze toto provést pouze drahým chemickým frézováním. Díky těmto technologickým výhodám, které bývají výraznějším argumentem pro použití kompozitů, než jejich charakteristiky.

Nevýhodou kompozitů, že výsledné vlastnosti kompozitu jsou velmi citlivé na technologickou kázeň během výrobního procesu a pečlivější kontrola než u kovových materiálů. Vlastnosti kompozitů se mění s teplotou a také je ovlivňuje vnější prostředí a je třeba složitější systém zkoušek pro pevnostní průkaz, což se řadí mezi další nevýhody. [1,2,20]

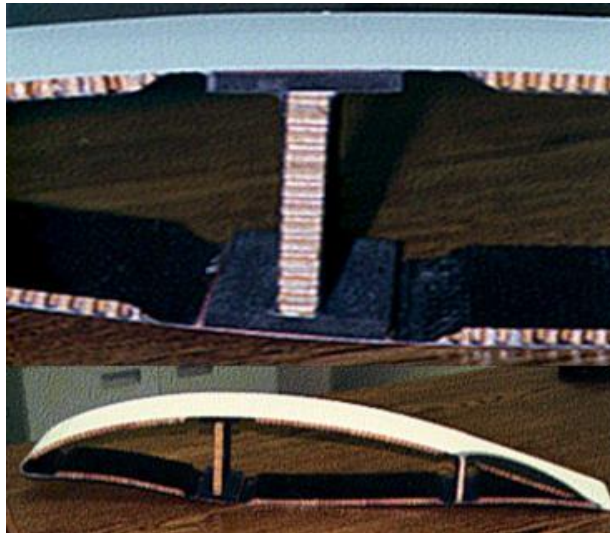




Obr. 10. Složení Boeingu 787[27]

## 2.1 Křídlo větroně

Křídlo větroně TST-14M má sendvičovou konstrukci. V křídle žádná žebra nejsou. Pevnostní systém tvoří jeden hlavní nosník s uhlíkovými pásnicemi, nosník pro zavěšení křídélek a kořenové žebro. Torzní skříň tvoří celý profil křídla sendvičové konstrukce. Spojení křídel je řešeno propojením křídel silovým kování a dvěma vodorovnými čepy. Spojení křídlo – trup a zachycení je realizováno pomocí čepu a pouzder zalaminovaných v kořenovém žebře a trupu.



Obr. 11. Křídlo větroně TST-14M. [20]

## 2.2 Kompozitní lopatka ventilátoru pro pohonnou jednotku

Rotorová lopatka je jedním z nejzatíženějších dílů ventilátorové pohonné jednotky. Kompozitních materiálů je zde použito pro dosažení nižší hmotnosti lopatky a tomu odpovídající nižší zatížení nejen samotné lopatky, ale i ostatní konstrukce. Lopatka je konstrukčně řešena jako kompozitní skořepina s jádrem z pěny o velmi nízké hustotě, které se nachází v celém objemu lopatky tvořené aerodynamickým listem a patkou se závěsem. Skořepina lopatky je složena z několika vrstev kompozitu s orientacemi vláken výztužné tkaniny pro přenos zatížení v krutu a pásnic z jednosměrné výztuže, která přenáší odstředivé zatížení z listu lopatky do závěsu. Výsledná dosažení hmotnost lopatky je 120 g při zatížení 27kN.



Obr. 12. Rotorová lopatka pro pohonnou jednotku. [22]

## 2.3 Celokompozitní letoun VL-3

Jedná se o ultralehký dolnoplošník, kde trup letounu je sendvičové konstrukce, s kombinací uhlíkové a hybridní tkaniny kevlar/uhlík a 4 mm silné pěnové hmoty Herex. Křídla jsou konstrukčně dvoudutinové, což významně zvyšuje pevnost v krutu a má poměrně malá křídélka obdobné konstrukce a velkou odštěpnou vztlakovou klapku. Potahy křídla tvoří uhlíko-skelné sendviče, s nosíkem s pásnicemi z uhlíkového rowingu.



Obr. 13. Celokompozitní letoun VL-3. [22]

## 2.4 Toaleta ve vlaku

STX Finsko je předním světovým výrobcem prefabrikovaných modulárních kabin. Vyvinuli lehký WC modul pro vlaky, které nabízí nové a nákladově efektivní řešení pro zákazníky. Lehké železniční toalety, WC modul Koncept STX je založen na použití lehkých a tuhých sendvičových panelů a modulárních technických panelů. Produkt je lehký a tuhý, sendvičový panel je složen z povrchu listů hliníkových a vlnité struktury jádra, které jsou spojeny spolu s lepidlem. Vlnité desky mohou být vyráběny na vlastní roll-formovací lince a konstrukce také umožňuje výrobu zakřivených deskových konstrukcí.



Obr. 14. Toaleta od firmy STX. [24]

## 2.5 Kabina vlaku

Byla vyvinuta v DE-LIGHT Transport, obsahoval řadu novinek ve srovnání s více tradičními vzory. Jednalo se o modulární konstrukci, absorbující energii části nosu, lehké koncepcí hlavního crash pohlcování energie zařízení a využití integrovaného sendvičového kompozitu pro hlavní konstrukce kabiny. Významné úspory v hmotnosti (až 50% v souladu s předběžnými odhady) a počtu použitých částí (až 40%). Modulární konstrukce kabiny také výrazně snižuje náklady na vybavení a montážní náklady, což vede k celkovým úsporám nákladů. [25]



Obr. 15. Kabina De-Light Transport. [25]

## 2.6 Korejský vlak TTX

TTX vnější část vozidla je vyrobena z lehké sendvičové konstrukce s vnitřním nosným ocelovým rámem. Rám je vyroben z běžné nerezové oceli, který zajišťuje nízké těžiště a tím zvýší stabilitu v průběhu jízdy. Předběžný návrh karoserie byl bez nosného vnitřní rámu, ocelová konstrukce rámu zajišťuje zvýšenou tuhost proti celkovému ohýbání. Sendvičová konstrukce se skládá z uhlíkové tkaniny / epoxidu na vnějších stranách a hliníkové voštiny. Celá karoserie je vyrobena jako monolit. Toho bylo dosaženo pomocí velkého rozsahu metody autoclave. Byla vyrobena velká forma, kde se nejdříve kladla vnější vrstva, která poté byla vytvrzena pomocí zmíněné metody autoclave. Poté se vnitřní rám a voština osadily na horní části vnějšího pláště. Konečná celá struktura se vytvrzuje v autoclave. Sendvičová konstrukce snižuje opláštění vozidla o 39% ve srovnání s opláštěním z nerezové oceli. Celková redukce hmotnosti, včetně rámu, bylo 28%. [28]



Obr. 16. Korejský vlak TTX. [28]

## 2.7 Návrh okenního rámu firmy TRB

Hliníkové voštiny můžou nahradit překližky a kovové výrobky v návrzích oken a příček mezi jednotlivými částmi vlaku. Fenolické pre-pregy a fenolové SMC může nahradit tradiční materiály. Mezi jejich hlavní výhody patří snížení hmotnosti, menší citlivost na změnu klimatických podmínek, zvětšení prostoru pro pasažéry z důvodu snížení tloušťky a snížení času na dokončovací operace, z důvodu lepších povrchových úprav. Poslední fenolické pre-pregy a termoplasty mohou být použity namísto kovových konstrukcí a GRP, jako lehká alternativa v pohotovostním zadních dveřích. [29]



Obr. 17. Návrh okenního rámu.[29]

## 2.8 Sendvičová konstrukce Inrektor

Sendvičová konstrukce Inrekor používá hliníkový nebo ocelový plech a lehký materiál, expandovaný polypropylen. V autech se používá běžně už od 80. let jako tlumící materiál, najdeme ho třeba ve výplních sedadel nebo nárazníků.



Obr. 18. Inrektor [26]

Oproti obyčejnému milimetrovému plechu je Inrekor, tvořený dvěma půlmilimetrovými plechy a polypropylénovou "duší", prý šestkrát pevnější. Když k němu připojíte další konstrukční prvky ze stejného materiálu a postavíte z něj třeba středový tunel auta, podle měření vynálezce je tuhost až desetkrát vyšší. Nový kompozit také zlehčí auto až o třicet procent při zachování stejné pevnosti. [26]

### 3 SMĚRY VÝVOJE MULTIFUNKČNÍCH KOMPOZITŮ

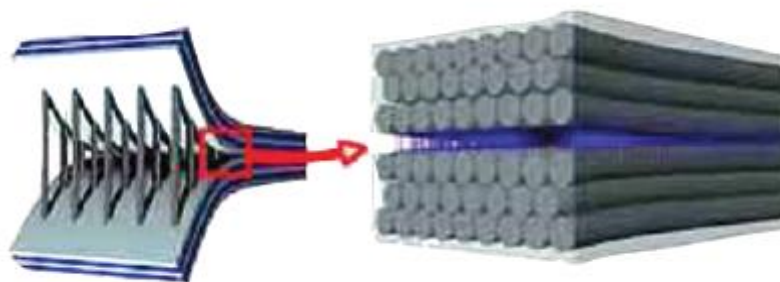
Na vývoji multifunkčních kompozitů se v současnosti podílí všichni výrobci. Úzce při tom spolupracují s akademickou sférou. Současně se pracuje na všech uvedených funkcích:

- Elektrická vodivost - stínění, statická elektřina, blesky
- Tepelná vodivost
- Ukazatel poškození
- Integrace snímačů
- Integrovaní funkčních povrchů (nátěry, odledování, ...) [20]

#### 3.1 Elektrická a tepelná vodivost

Nejslibnějším prostředkem pro zvýšení elektrické a tepelné vodivosti polymerních kompozitů se jeví uhlíkové nanotrubičky. Polymerní kompozity vyztužené uhlíkovými vlákny jsou dobré vodiče elektřiny i tepla, ale pouze ve směru vláken. U uhlíkových laminátů je tepelná vodivost napříč vláken přes tloušťku laminátu cca 10x nižší než ve směru vláken.

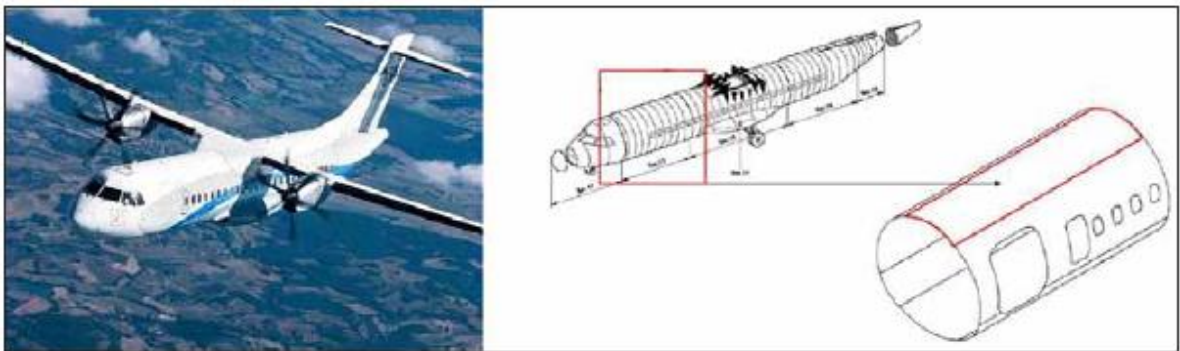
Mezivrstva s orientovanými uhlíkovými nanotrubičkami vytvořená mezi vrstvami vyztuženými uhlíkovými vlákny má zvyšovat jednak příčnou elektrickou a tepelnou vodivost uhlíkového laminátu a zároveň i interlaminární pevnost a rázovou houževnatost pro zvýšení odolnosti laminátu impaktu a následnému šíření delaminací. [20]



Obr. 19. Nanotrubičky [20]

### 3.2 Structural Health Monitoring (SHM)

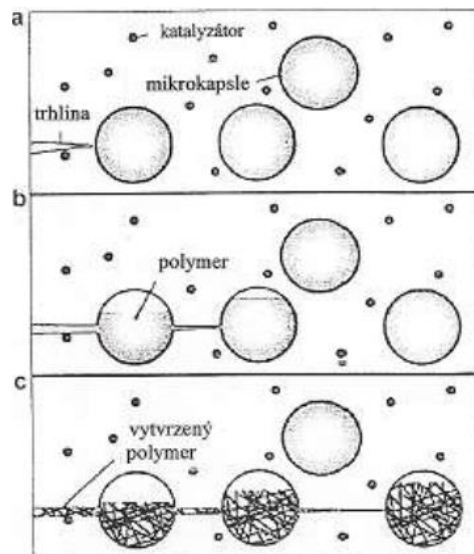
Monitorování nosné konstrukce může při správné aplikaci výrazně snížit provozní náklady letadla. Jednou z nejpropracovanějších metod je zakomponování optických vláken do skladby kompozitního dílu. Firma Alenia, zavedla tuto technologii do sériové výroby. První letová zkouška dílu vybaveného SHM proběhla roku 2010. Díl byl součástí letounu Alenia C-27J Spartan a současně s optickým systémem byl vybaven i standartními tenzometry. Tato zkouška je součástí vývojového plánu zavedení SHM do konstrukce letounu ATR72-600. [20]



*Obr. 20. Monitoring nosné konstrukce ke snížení provozních nákladů. [20]*

### 3.3 Self-Healing

Představa samo opravitelného materiálu se zkoumá především u plastu, kdy jsou do struktury plastu rozmístěny malé kapsle s opravnou látkou. V případě vzniku trhliny v základním materiálu dojde i k porušení kapsle a opravná látka vzniklými kapilárami vyplní vzniklé trhlinky. K polymerizaci opravné látky dojde po jejím kontaktu s katalyzátorem zakomponovaným v základním materiálu. Postup lze použít i pro opravu vláknových kompozitů. Nevýhoda této metody je únik monomeru z mikrokapslí a snížení schopnosti sebeopravy. [20,21]



Obr. 21. Self-healing [20]

### 3.4 Indikace poškození

Kompozitní konstrukce mají společnou nevýhodu v obtížně detekovatelných poškozeních. Pro zjištění poškození je nutné použít některou z NDT metod, které jsou drahé a časově náročné. Pokud by podařilo najít nějakou rychlou a levnou NDT metodu, tak by došlo k výraznému snížení provozních nákladů letadel. [20,21]



## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**

## 4 CÍL DIPLOMOVÉ PRÁCE

Hlavním cílem praktické části je návrh sendvičového materiálu pro použití v železničním průmyslu. Navrhnuté materiály se dnes málo používají jako obkladové části interiéru ve vlaku. Proto jsme se zaměřily na pozorování mechanických a protipožárních vlastností vyrobených desek, zda odpovídají všem požadavkům norem.

Výroba vzorků byla provedena ve firmě Form s.r.o., která je dlouhodobě na trhu s výrobou laminátových výrobků jednoduchých nebo sendvičových struktur. Firma je zaměřena na železniční, tramvajový a automobilový průmysl.

1. Návrh materiálového složení sendvičového materiálu pro železniční průmysl
2. Výroba zkušebních těles technologií ručního kladení prepregů a následné vytvrzování v peci
3. Experimentální testování zkušebních těles dle zvolených norem.
  - Tříbodová zkouška ohybem
  - Tahová zkouška- zjištění síly potřebné k vytržení závitového insertu
  - Zkouška soudržnosti
  - Kónický kalorimetr
4. Vyhodnocení experimentálních výsledku
6. Závěr

## 5 ZKUŠEBNÍ VZORKY

Vzorky byly vyrobeny ve firmě FORM s.r.o., ve formě rovných desek technologií ručního kladení a následného vytvrzování v peci. Použitá technologie, je spíše vhodná pro kusovou výrobu.

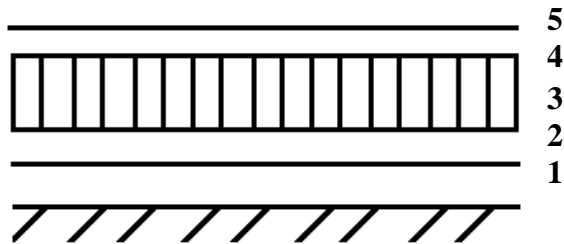
Z důvodu neprozrazení duševního vlastnictví dané firmy, byly pozměněny názvy použitých materiálů, aby nedošlo ke zneužití jejich mnohaletých zkušeností.

Použité materiály na výrobu sendvičových panelů:

- **Prepreg 1** – Vlákny vyztužený reaktoplastický předimpregnovaný materiál s vynikající FST a mechanickými vlastnostmi. Je to bez halogenů modifikovaný fenolický systém s 42% fenolické pryskyřice. Tkanina z E-skla Příze, 300g/m<sup>2</sup>, 8H saténová vazba.
- **Prepreg 2** – Vlákny vyztužený reaktoplastický předimpregnovaný materiál s vynikající FST a mechanickými vlastnostmi. Je to bez halogenů modifikovaný fenolický systém s 47% fenolické pryskyřice PH840. Tkanina z E-skla Příze, 300g/m<sup>2</sup>, 8H saténová vazba. Je vysoce přilnavý k hliníku.
- **Pěna** – Uzavřené póry termoplastu a recyklovatelná polymerní pěna s vynikajícími kouřovými, toxickými a požárními vlastnostmi. Je to ideální materiál jádra pro sendviče aplikované tam, kde se žádá vysokých požárních odolností.
- **Papírová voština** – Je hlavní konstrukční částí sendvičů v průmyslových odvětvích s vysokou rozměrovou stabilitou za tepla a vlhkosti. Použitá voština má na metr čtvereční hustotu 32 buněk, velikost buněk 4,8 mm, pevnost v tlaku 0,9 MPa, pevnost ve smyku 0,55 MPa, modul ve smyku 18MPa.
- **Hliníková voština** – jádro z hliníkové voštiny. Použitá voština má hustotu 77kg/m<sup>3</sup>, velikost buněk 4,8 mm, pevnost v tlaku 3,94 N/mm<sup>2</sup>, pevnost ve smyku 2,29N/mm<sup>2</sup>.

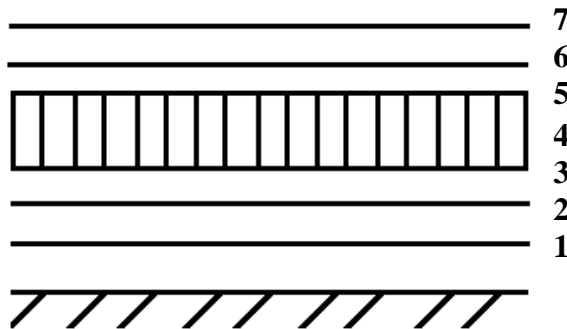
Vzorky byly následující:

1. Vzorek složený z papírové voštiny a 2 vrstev prepregu 1 z každé strany- označován jako 2A



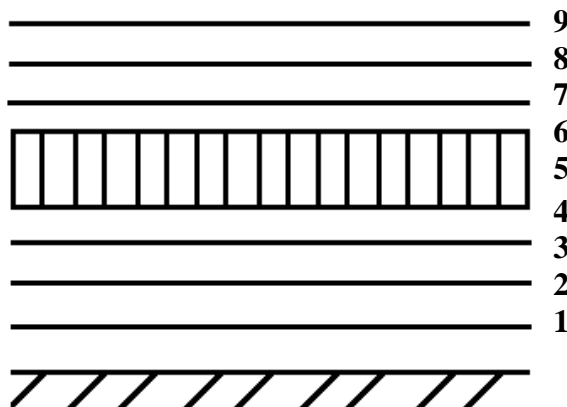
Obr. 22. Složení vzorku 2A - 1,2,4,5 prepreg 1; 3 Papírová voština

2. Vzorek složený z papírové voštiny a 3 vrstev prepregu 1 z každé strany- označován jako 3A



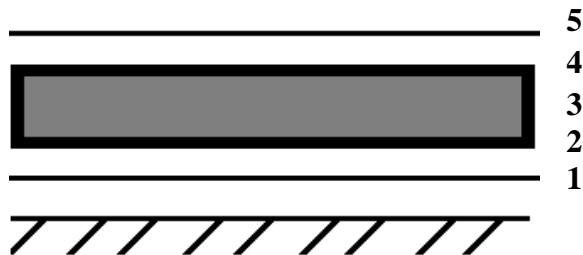
Obr. 23. Složení vzorku 3A - 1,2,3,5,6,7 prepreg 1; 4 papírová voština

3. Vzorek složený z papírové voštiny a 4 vrstev prepregu 1 z každé strany- označován jako 4A



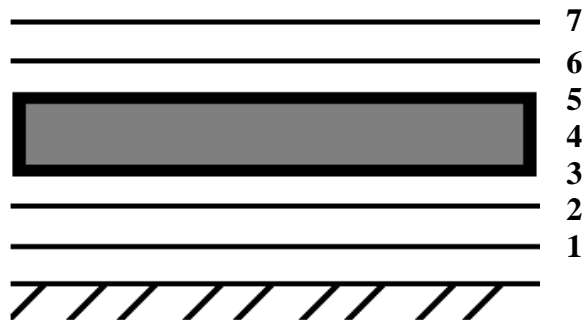
Obr. 24. Složení vzorku 4A - 1,2,3,4,6,7,8,9 prepreg 1; 5 papírová voština

4. Vzorek složený z pěnové výplně a 2 vrstev prepregu 1 z každé strany- označován jako 2B



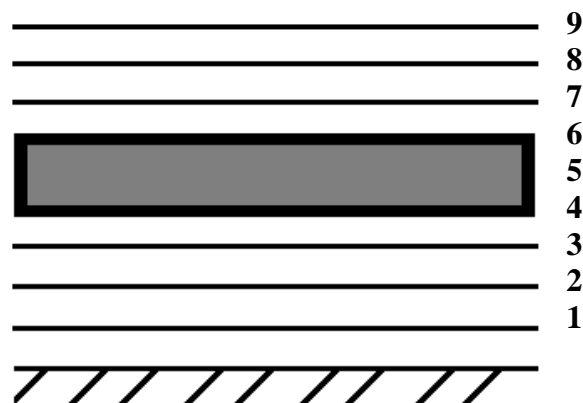
Obr. 25. Složení vzorku 2B - 1,2,4,5 prepreg 1; 3 pěna

5. Vzorek složený z pěnové výplně a 3 vrstev prepregu 1 z každé strany- označován jako 3B



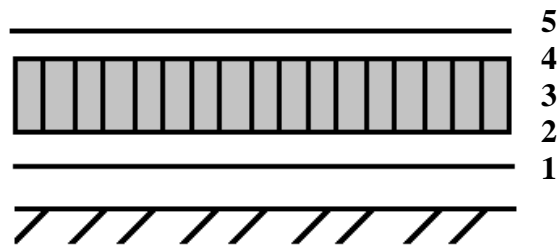
Obr. 26. Složení vzorku 3B - 1,2,3,5,6,7 prepreg 1; 4 pěna

6. Vzorek složený z pěnové výplně a 4 vrstev prepregu 1 z každé strany- označován jako 4B



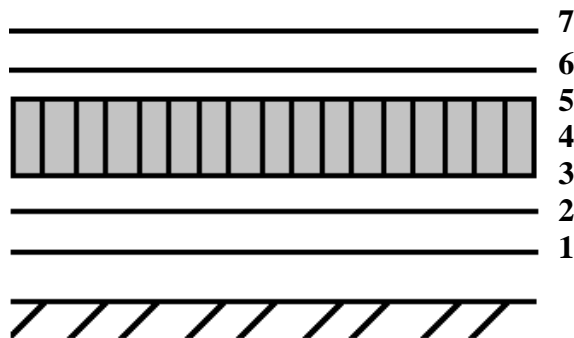
Obr. 27. Složení vzorku 4B - 1,2,3,4,6,7,8,9 prepreg 1; 5 pěna

7. Vzorek složený z hliníkové voštiny a 2 vrstev prepregu 1 a prepregu 2 z každé strany - označován jako 2C



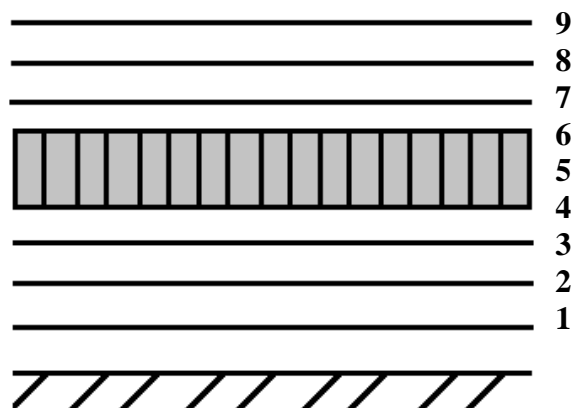
Obr. 28. Složení vzorku 2C - 1,5 prepreg 1; 3 Hliníková voština; 2,4 prepreg 2

8. Vzorek složený z hliníkové voštiny a 3 vrstev prepregu 1 a prepregu 2 z každé strany- označován jako 3C



Obr. 29. Složení vzorku 3C - 1,2,6,7 prepreg 1; 4 Hliníková voština; 3,5 prepreg 2

9. Vzorek složený z hliníkové voštiny a 4 vrstev prepregu 1 a prepreg 2 z každé strany- označován jako 4C



Obr. 30. Složení vzorku 4C - 1,2,3,7,8,9 prepreg 1; 5 Hliníková voština; 4,6 prepreg 2

### 5.1.1 Vložky a závitové inserty

#### Vložky

Kompaktní laminátové desky HPL (HPL = High Pressure Laminates = vysokotlaké lamináty) jsou kvalitní velkoformátové desky. Pro jejich výrobu se používá vrstvený papír impregnovaný pryskyřicí, za vysokého tlaku a teploty slisován v homogenní pevnou desku.

Pevnost tohoto materiálu v ohybu při porušení kolmo na vrstvy (při 20 °C) je 135 MPa, modul pružnosti v ohybu  $7 \times 10^3$  MPa, pevnost v tahu 120 MPa, pevnost v tlaku kolmo na vrstvy 300 MPa, pevnost ve smyku rovnoběžně s vrstvami 10 MPa, hustota je 1400 kg/m<sup>3</sup> a tepelná odolnost až 130 °C. Veškeré výše uvedené parametry jsou garantovány výrobcem.

Vyrobily se vložky o rozměrech 40 x 40 x 20 mm byly aplikovány do první poloviny vzorků bez tmele a druhá polovina vložek aplikována s tmelem. Vzorky byly dvou i čtyřvrstvé.

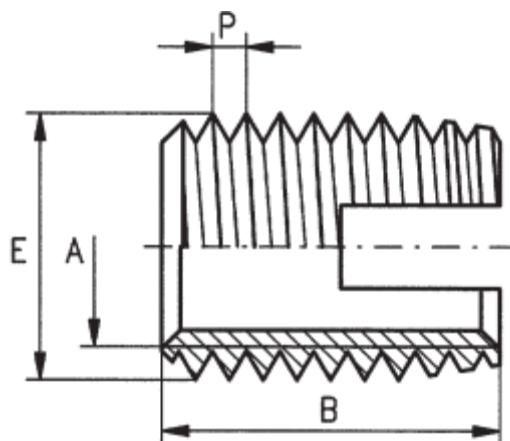


*Obr. 31. HPL deska*

#### **Závitové vložky Ensar®-SD 303**

Závitová vložka Ensar s řeznou štěrbinou ve speciální tenkostěnné a zkrácené verzi. Zvláště je vhodná pro umělé hmoty s tenkou stěnou a pro lehké konstrukce. Tyto verze jsou především samořezné, takže není potřeba předem řezat závit. Stoupání vnějšího a vnitřního závitu jsou shodná.

Byly vybrány typy M6 a M8 závitových vložek z katalogu produktů u firmy Kerbkonus.de. [35]



Obr. 32. Závitový insert Ensat®-SD 303. [35]

Tab. 2. Vybrané inserty [35]

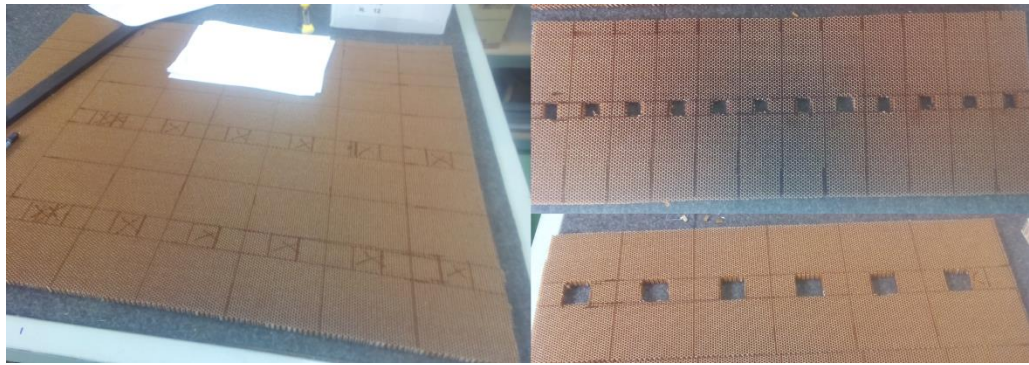
Vnitřní závit	Vnější závit	Stoupání vnějšího závitů	Délka	Minimální hloubka díry
[A]	[E]	[P]	[B]	[T]
M6	8	1	10	13
M8	10	1,25	12	15

## 5.2 Postup výroby vzorků pro tahovou zkoušku

V této části je popsána výroba vzorků pro vyhodnocení síly potřebné k vytržení insertu, vzorky se lišily výrobou, že se musely zakomponovat vložky do vzorků. Jinak se všechny vzorky vyráběly stejnou metodou, za stejných podmínek.

1. Na papírové voštině o tloušťce 9 a 20 mm, se nejdříve rozměřily jednotlivé typy vzorků o rozměrech 110 x 210 mm a 55 x 210 mm, ve kterých se pak uprostřed každého vzorku vyřezávaly otvory pro vložky o rozměrech 40 x 40 mm a 20 x 20 mm, následně byly nařezány na požadované rozměry, aby se vešly na desku. K naměření a řezání byl využit svinovací metr, pravítko a zalamovací nůž.





*Obr. 33. Rozměření vzorků a vyříznutí otvorů pro vložky.*

2. Z balíků byly naměřeny a následně nastříhány prepregy o rozměrech nařezaných voštin + se nechalo na přesah.
3. Z připravených prepregů byly strženy ochranné folie a v přesně stanovených vrstvách byly kladeny na desku. Polovina byla se čtyřmi vrstvami prepregu a druhá polovina s dvěma vrstvami prepregu. Poté se aplikovaly voštiny na prepregy o daných rozměrech.



*Obr. 34. 4 vrstvy prepregu a následné aplikování voštin na prepregy*

4. Vložky, které se měly vložit do vyřezaných otvorů, musely být lihem zbaveny od mastnot a nečistot, aby došlo k správnému přilnutí k prepregu. Na čištění byly použity papírové ubrousky.

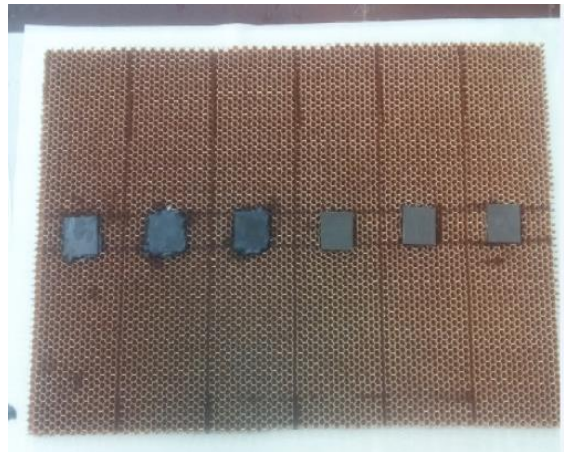


Obr. 35. Očistěné vložky lihem

5. Vložení vložek 40 x 40 x 20 mm do vyřezaných otvorů, u voštiny o tloušťce 20 mm a vložení vložek 20 x 20 x 10 mm do otvorů, u voštiny o tloušťce 9 mm. Polovina vložek se aplikovala bez tmelu a druhá polovina byla poťena tmelem po obvodových plochách, které jsou ve styku s voštinou, aby se vytvořil pevnější spoj.

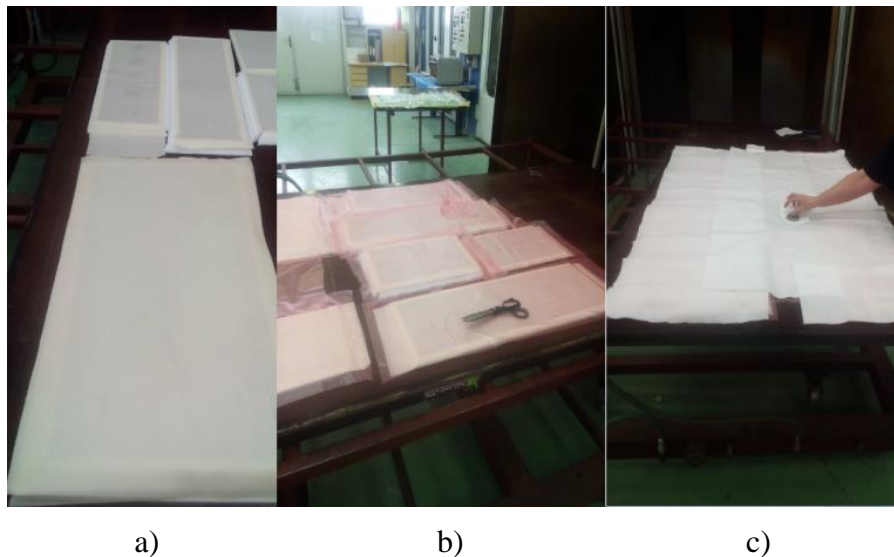


Obr. 36. Použitý tmel a aplikované vložky 40 x 40 mm, s tmelem a bez tmelu



Obr. 37. Aplikované vložky 20 x 20 mm, s tmelem a bez tmelu

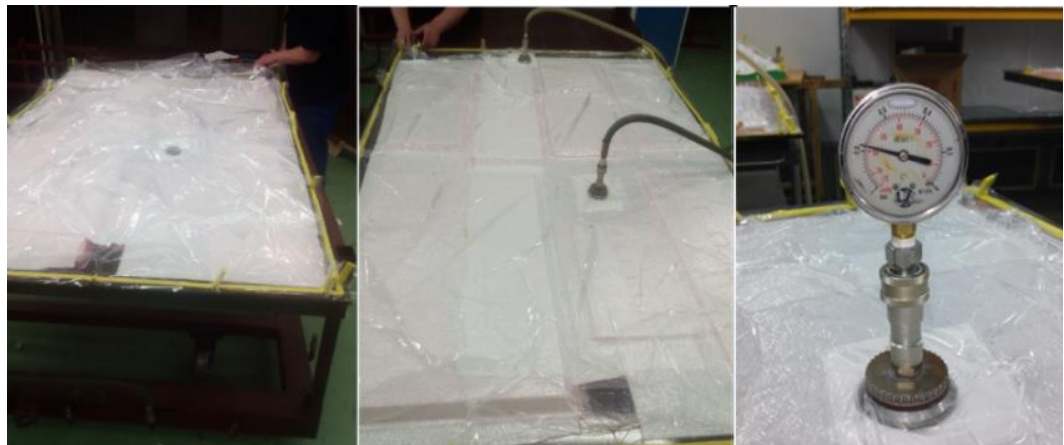
- Po vložení vložek, se aplikovaly vrchní vrstvy prepregu opět o určitém počtu vrstev, záleželo na spodní vrstvě, kolik obsahovala vrstev. Aby nedošlo k připečení odsávací rohože k prepregu, tak se využívá separační folie vyrobená z netkané textilie, která se položí na prepreg a až potom se může rozložit odsávací rohož, která slouží k bezpečnému odsátí přebytečného vzduchu a absorpci přebytečné pryskyřice.



Obr. 38. a) vrchní vrstvy prepregu, b) separační folie, c) netkaná textilie

- Na odsávací rohož byly aplikovány držáky odsávacích ventilů. V dalším kroku se použila vakuovací folie, která tvoří poslední vrstvu a slouží k vytvoření vakua. Folie je po celém svém obvodu utěsněna pomocí těsnící pásky. Poté již přichází vytvoření

podtlaku a kontrola těsnosti. Měřicí přístroj se připevní na odsávací ventil. Hodnota podtlaku by se měla pohybovat kolem 0,8MPa.



a)

b)

c)

*Obr. 39. a) vakuová folie, b) vytvoření vakua, c) měřicí přístroj*

8. Posléze se už jen zajelo do pece a byl zvolen správný vytvrzovací program. U všech vzorků se vybral program, který trval 2 hodiny při 130°C .



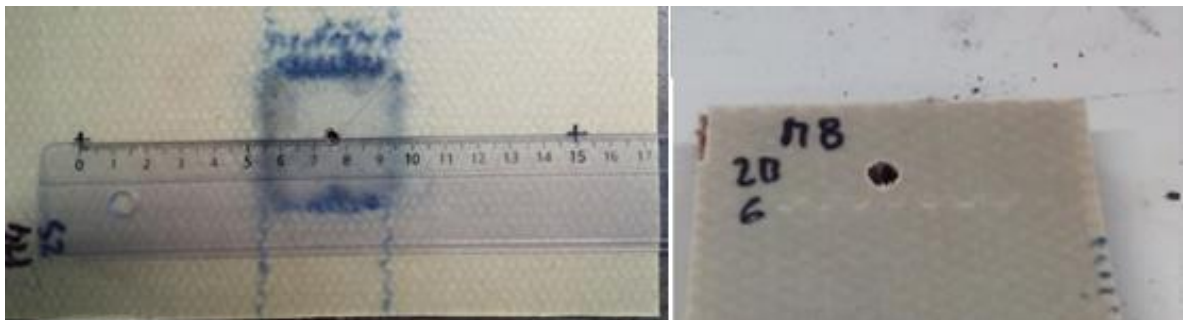
*Obr. 40. Pohled do otevřené pece*

9. Následovalo nařezání desek na určité rozměry. S papírovou voštinou o tloušťce 20 mm se vzorky nařezaly na rozměr 100 x 200 mm a s papírovou voštinou o tloušťce 9 mm se vzorky nařezaly na rozměr 50 x 200 mm.



*Obr. 41. Pila a nařezané vzorky*

10. Po nařezání se musely vložky ze zkušebních vzorků navrtat pro našroubování závitových insertů. Opět se rozdělily vzorky na dvě poloviny. Do první poloviny byly vyvrtány otvory pro závitové vložky s vnitřním závitem M8 a do druhé poloviny byly vyvrtány otvory pro vložky s vnitřním závitem M6. Po navrtání došlo k našroubování připravených závitových insertů pomocí přípravku na dané typy závitu.
11. V posledním kroku se v ose závitového insertu a vzdálenosti 75 mm na každou stranu od osy insertu vyvrtaly otvory o průměru 8 mm, které sloužily k lepšímu upnutí na trhacím stroji.



*Obr. 42. Rozměření os otvorů a vyvrtaný otvor 8 mm*

### 5.3 Mechanické zkoušky

Mechanické vlastnosti umožňují kvantitativně hodnotit chování materiálů za působení vnějších sil a dalších vlivů. Některé hodnoty mají fyzikální význam - lze je tedy přepočítávat pro jiný tvar a rozměr, jiné vystihují chování za určitých podmínek (nelze převádět) pro posouzení vlastností a zpracování materiálů (vrubová houževnatost). Celkové zkoušení je nezbytné pro kontrolu jakosti výrobků, jako důležitý poznatek výzkumných prací i k hodnocení úrovně technologie výroby. [31]

Mechanické zkoušky se dělí podle:

- charakteru zatěžování (statické, dynamické)
- zjišťovaných vlastností (pevnost, tvrdost, únavy ap.)
- druhu namáhání (tah, tlak, ohyb, krut ap.)
- teploty a prostředí [31]

#### 5.3.1 Zkouška dle normy ČSN EN ISO 178

Norma je určena pro vlákny vyztužené kompozity plastové kompozity. Metoda určuje stanovení ohybových vlastností pro trojbodový i čtyřbodový ohyb. Definovány jsou zkušební tělesa, i různé zkušební rychlosti. Metoda není vhodná pro posuzování konstrukčních parametrů, ale pro posuzování materiálů a kontrolu jakosti. [31]

#### Podstata zkoušky:

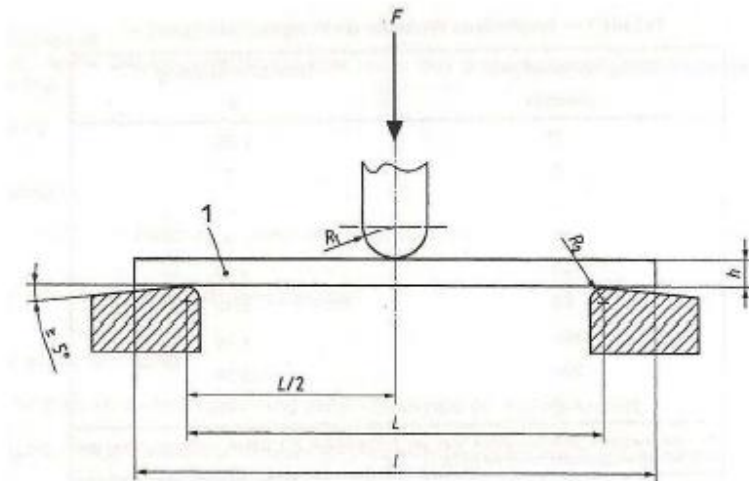
Zkušební těleso ve tvaru hranolu je umístěno v přípravku a je ohýbáno konstantní rychlostí, do doby, než dojde k porušení tělesa nebo dokud deformace nedosáhne předem stanovené hodnoty. Během zkoušky se měří síla působící na těleso a průhyb. Metoda je vhodná pro stanovení ohybových vlastností, pevnosti v ohybu, ohybového modulu a jiných parametrů vyplývajících ze vztahu ohybové napětí/deformace za předepsaných podmínek. [31]

Pro účel normy se používají následující definice:

- Zkušební rychlost [ $\text{mm}/\text{min}^{-1}$ ]
- Ohybové napětí [MPa]
- Ohybové napětí při porušení [MPa]
- Pevnost v ohybu [MPa]
- Průhyb [mm]
- Průhyb při porušení [mm]

- Ohybová deformace [-]
- Modul pružnosti E [MPa] a další.

Zkušební těleso nesmí být zkroucené, ani na povrchu poškrábané, mít přetoky, propadliny ani trhliny. Vzdálenost podpěr se nastaví dle  $L/h$ , kde  $L$  je vzdálenost podpěr,  $h$  je tloušťka tělesa. [31]



Obr. 43. Třibodový ohyb [31]

### 5.3.2 Stanovení tahových vlastností podle ČSN EN ISO 527-4

Tato část normy ISO 527 uvádí podmínky pro stanovení tahových vlastností izotropních a ortotropních vlákní vyztužených kompozitních materiálů, na základě všeobecných pravidel stanovených v první části (ISO 527-1). [32]

#### Podstata zkoušky

- metoda je vhodná pro:

- a) vlákní vyztužené termosetické a termoplastické kompozit zahrnující nejednosměrné kompozity jako síťové vyztuže, tkaniny, krátká nebo mletá vlákna
- b) kombinace výše uvedených kompozitů s jednosměrnými a vícesměrnými kompozity zhotovenými podle jednosměrných vrstev
- c) hotové výrobky zhotoveny z těchto materiálů vyztuž se může skládat ze skelných vláken, uhlíkových vláken, aramidových vláken a jiných obdobných vláken [32]

#### Zkušební zařízení

- viz ISO 527-1

- mikrometr s přesností 0,01 mm s přizpůsobenými měřícími doteky

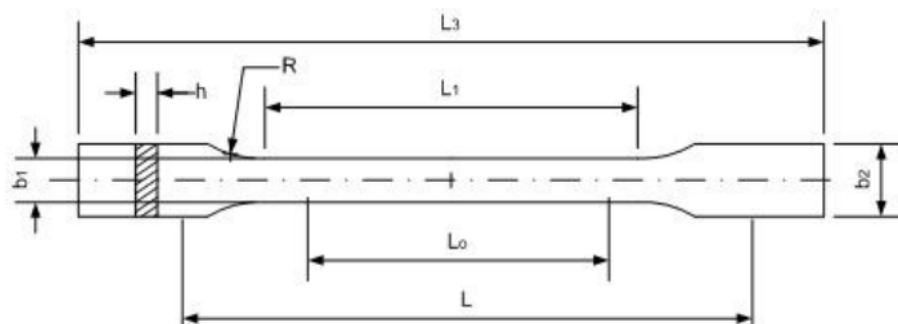
### Zkušební těleso

- doporučený počet vzorků viz ISO 527-1

- jsou uvedeny tři druhy zkušebních těles:

a) typ 1B - použitelný pro termosetické kompozity

- nepoužitelný pro vícesměrné pravidelně vyztužené kompozity



Obr. 44. Zkušební těleso typ 1B [32]

rozměry v [mm]

kde	$L_3$	je celková délka	$\geq 150$
	$L_1$	délka zúžené části	$60 \pm 0,5$
	R	poloměr	$\geq 60$
	$b_2$	šířka na koncích	$20 \pm 0,2$
	$b_1$	šířka zúžené části	$10 \pm 0,2$
	h	tloušťka	od 2 do 10
	$L_0$	měřená délka (doporučená pro extenzometry)	$50 \pm 0,5$
	L	počáteční vzdálenost mezi sevřením	$115 \pm 1$

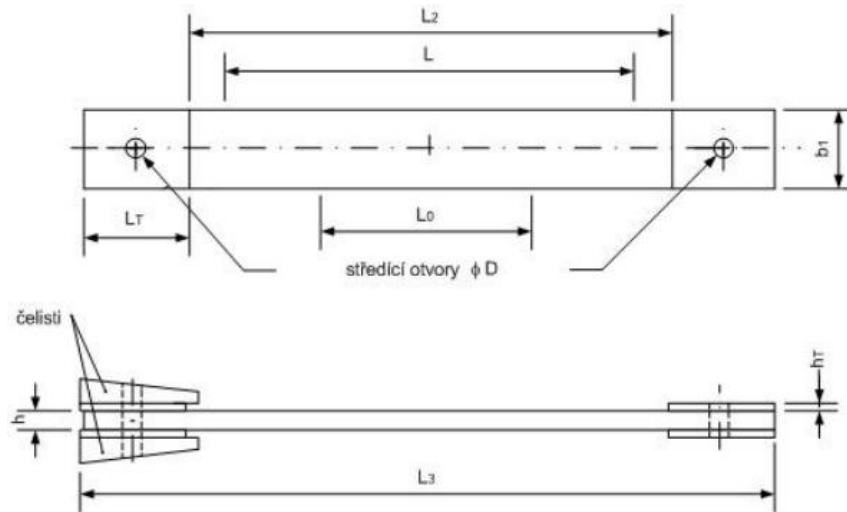
b) typ 2 (obdélníkový bez koncových příložek)

typ 3 (obdélníkový s nalepenými koncovými příložkami)

- pro vlákniny vyztužené termosety a termoplasty



- zkušební tělesa bez přilepených příložek jsou považována jako typ 2
- přednostní šířka zkušebního tělesa je  $h = 25 \text{ mm}$ , ale mohou být použity i tělesa o  $h = 50 \text{ mm}$  a větší, pokud je pevnost v tahu nízká kvůli konkrétní výztuži
- nejdříve provedeme zkoušku se zkušebním tělesem typu 2, není-li zkouška proveditelná nebo jsme nespokojeni s výsledky zkoušky, volíme typ 3 [32]



Obr. 45. Zkušební těleso typ 3 [32]

		rozměry v [mm]	
		Typ 2	Typ 3
Kde	$L_3$ je celková délka	$\geq 250$	$\geq 250$
	$L_2$ vzdálenost mezi koncovými příložkami	$150 \pm 1$	
	$b_1$ šířka (u obou typů)	$25 \pm 0,5$ nebo $50 \pm 0,5$	
	$h$ tloušťka (u obou typů)	od 2 do 10	
	$L_0$ měřená délka (doporučená pro extenzometry)	$50 \pm 0,5$	$50 \pm 0,5$
	$L$ počáteční vzdálenost mezi sevřením	$150 \pm 1$	136
	$L_T$ délka koncových příložek	$\geq 50$	
	$h_T$ tloušťka koncových příložek	od 1 do 3	
	$\phi_D$ průměr středících otvorů	$3 \pm 0,25$	$3 \pm 0,25$

**Postup zkoušky**

- viz ISO 527-1

- rychlost zatěžování:

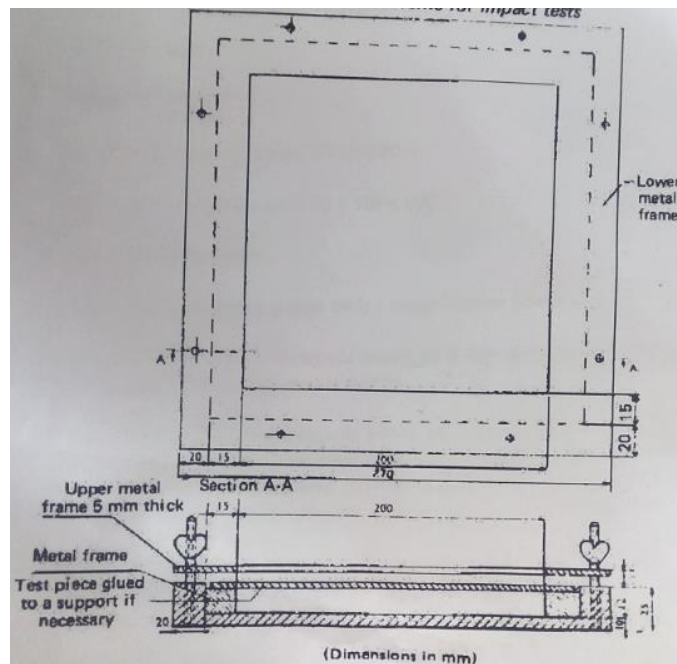
- pro zkušební tělesa typu 1B
  - 10 mm/min - pro běžnou kontrolu
  - 2 mm/min - pro kvalifikační zkoušku - když měříme maximální prodloužení
  - když zjišťujeme modul pružnosti v tahu
- pro zkušební tělesa typu 2 a 3
  - 5 mm/min - pro běžnou kontrolu
  - 2 mm/min - pro kvalifikační zkoušku - když měříme maximální prodloužení
  - když zjišťujeme modul pružnosti v tahu [32]

### 5.3.3 Zkouška odrazivosti UIC CODE 844-4 R

Každý vzorek musí být upevněn v kovovém rámu, který musí být umístěn na naprosto rovné vodorovné pevné podlaze. Rám musí být pečlivě vycentrován kolmo ke kuličce. Plocha zkušební vzorku musí být pokryta s listem kopírovacího papíru, počerněná strana papíru je ve styku s horní plochou vzorku. Výška pádu ocelové kuličky jsou závislé na jmenovité tloušťce zkoušeného materiálu. Kulička se pak nechá spadnout na zkušební vzorek. Po pádu a odrazu se kulička musí chytit, aby se zamezilo jejího pádu na zkušební vzorek podruhé. Kopírovací papír se odstraní a měří se průměr získaného otisku kuličky ve vzorku. Výsledky musí být v souladu s ustanoveními, průměr kulového otisku musí být menší než 10 mm, dle normy UIC CODE 844-4 R. [33]

Zkouška se provádí pomocí zařízením, včetně:

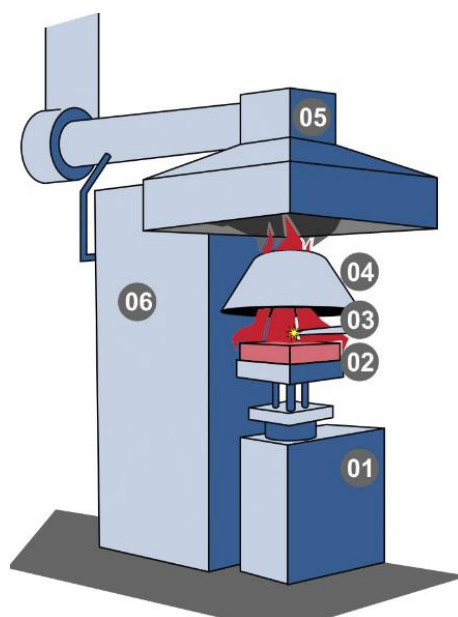
- Perfektně kulatou ocelovou kuličku o průměru  $42,8 \pm 0,2$  mm a o váze  $324g \pm 5g$ .
- Kovový rámeček splňující rozměry 270x270x5mm, viz Obr. 46.
- Elektromagnet pro udržení kuličky ve zvednuté poloze a umožňuje, aby byla uvolněna a padala volným pádem bez počáteční rychlosti.
- Čtvercová dřevotřísková deska o rozměru jedné strany  $230mm \pm 5$  mm, tloušťce  $19mm \pm 0,3$  mm, o hustotě  $650 \pm 30kg/m^3$
- List kopírovacího papíru [33]



Obr. 46. Ocelový rám dle normy UIC 844-4R [33]

### 5.3.4 Kónický kalorimetr ISO 5660-1

Metoda kónické kalorimetrie je celosvětově nejpoužívanější malorozměrová zkouška pro stanovení parametru HRR. Kromě tohoto parametru je metodou kónické kalorimetrie možno stanovit i další charakteristiky, např. úbytek hmotnosti, hustotu kouře, produkci spalin (CO, CO<sub>2</sub>) apod. [33]



Obr. 47. Schéma přístroje pro metodu kónického kalorimetru [30]

Zkušební přístroj se skládá z několika základních součástí:

- vah pro měření úbytku hmotnosti (01),
- upevňovacího rámu na vzorek (02),
- piezoelektrického zdroje jiskry (03),
- kónické topné spirály (04),
- odvodního potrubí s analyzátory jednotlivých veličin - proudová rychlostní sonda, laserový fotometr, měření koncentrace O<sub>2</sub>, CO a CO<sub>2</sub> (05),
- měřicí ústředny (06).

Reprezentativní vzorek zkoušeného materiálu čtvercového tvaru o rozměrech 100 x 100 mm s maximální možnou tloušťkou 50 mm je umístěn v upevňovacím rámu (02), viz Obr. 47., který se po celou dobu zkoušky nachází na vahách snímajících úbytek hmotnosti vzorku v čase (01). Orientace vzorku je zpravidla horizontální, vertikální může být v případě, pokud je zařízení pro tuto pozici zkušebního vzorku uzpůsobeno. Tepelné namáhání vzorku je zajištěno pomocí kónického zářiče (topné spirály, 04), který na vzorek působí sálavým teplem o hustotě tepelného toku 0–100 [kWm<sup>-2</sup>]. Zkušební norma stanovuje dvě zkušební hustoty tepelného toku, a to 35 a 50 [kWm<sup>-2</sup>]. Které odpovídají přibližně teplotám 670 a 770 °C. Jako zápalný zdroj funguje piezoelektrický zapalovač (03), který je umístěn 5 mm nad držákem vzorku a spíná v pravidelných jednosekundových intervalech. Plynné zplodiny hoření jsou odváděny do odtahového potrubí (05), kde jsou umístěny analyzátory zkoumaných veličin. Jedná se především o nezbytný analyzátor koncentrace kyslíku, dále mohou být osazeny další analyzátory, např. pro stanovení koncentrace oxidu uhličitého, oxidu uhelnatého aj. [34]

### **Požární odolnost**

Při požáru, kompozit je chráněn tvorbou pěny, které se izoluje od kyslíku. Být zcela bez halogenů, toxicita a neprůhlednost kouře se dramaticky sníží. Požární odolnost v železničním průmyslu určuje norma ČSN EN 45545 – 2 požární ochrana drážních vozidel. Norma specifikuje reakci na oheň náročných materiálů a výrobků používaných na železničních vozidlech. Je založena na stávajících požárně bezpečnostních předpisech pro kolejová vozidla v mezinárodní železniční unii a různých evropských zemích. Každý stát má vlastní

zkušební metody, které jsou přizpůsobené místním podmínkám a zvyklostem. Jednotlivé zkušební metody nelze společně porovnávat, zpomalily by proces přizpůsobování. [33]

Pro každý výrobek je určená specifická sada požadavků dle normy – R:

- Interiér (panely, prostory pro zavazadla, okenní rámy, plochy můstků)
- Exteriér (sedadla, polstrování, kryty, vzduchové části)
- Nábytek (sedadla, polstrování, kryty, matrace, lůžkoviny)
- Elektronické vybavení (kabely, kryty, izolační materiál, rezistory)
- Mechanické vybavení (flexibilní ocelové/gumové části)

Testované materiály jsou zařazeny dle této normy (EN 45545) do kategorie R1, která je v platnosti pro celou evropskou unii od roku 2013 a sjednocuje nejdůležitější požadavky na nehořlavost, toxicitu a emise spalin i tepla. [33]

Pro tuto kategorii materiálu jsou povinné tyto základní testovací zkoušky:

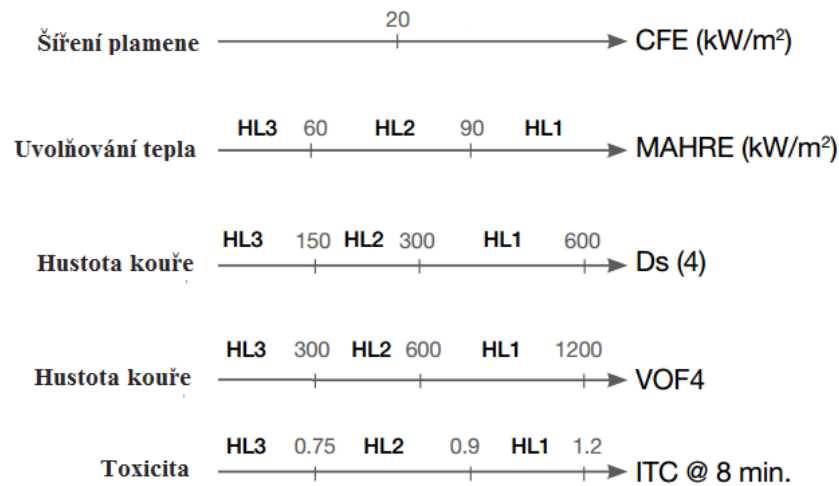
#### Určení Hazard Level (HL)

Požární odolnost úrovně (HL1,2,3) se naměří pomocí těchto 5 testů:

- CFE (kW/ m<sup>2</sup>): Kritická Flux při zániku nebo laterální šíření plamene
- MAHRE (kW/ m<sup>2</sup>): Maximální rychlost uvolňování tepla
- D<sub>s</sub> (4): Specifická optická hustota kouře
- VOF4: Kumulativní hodnota specifických optických hustot v prvních 4 minutách testu
- CIT<sub>G</sub> 8min: Konvenční Index toxicity (CO<sub>2</sub>, CO, HF, HCl, HBr, HCN, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>)

Tab. 3. Tabulka testů [33]

Testovací metoda	Parametr	Jednotka	Definiční požadavek	HL1	HL2	HL3
ISO 5658-2	CFE	KW/m <sup>2</sup>	Min.	20	20	20
ISO 5660-1	Marhe	KW/m <sup>2</sup>	Max.	-	90	60
01. EN ISO 5659-2: 50 Kw/m <sup>2</sup>	D <sub>s</sub> (4)	Bezrozměrné	Max.	600	300	150
02. EN ISO 5659-2: 50 Kw/m <sup>2</sup>	VOF4	min.	Max.	1200	600	300
03. EN ISO 5659-2: 50 Kw/m <sup>2</sup>	CIT <sub>G</sub>	Bezrozměrné	Max.	1,2	0,9	0,75



Obr. 48. Všeobecné požadavky pro určení Hazard Level (HL) [33]

### ČSN P CEN/TS 45545-1 Všeobecné požadavky

**Provozní kategorie** – podklad pro určení Hazard Level (HL) [33]

- 1 – Otevřené tratě vč. tunelů, vyvýšených úseků, ne delší než délka vlaku nebo tramvaje
- 2 – Trans - evropská síť – vzdálenost od bezpečnostního místa max. 5 km, dosažení bezpečného místa max. 4 min. (např. provoz na úsecích s tunely max. 5 km délky).
- 3 – vzdálenost k dosažení bezpečného místa max. 20 km, dosažení do max. 15 min., trať leží částečně v tunelu nebo na zvýšené struktuře a sekce není delší než 20 km (např. provoz na úsecích s tunely na významné délce transevropské sítě).
- 4 – vozidla navržená pro provoz v podzemních úsecích – bez možnosti boční evakuace.

Tab. 4. Konstrukční kategorie [33]

Design kat. Provozní kat.	Standardní vlak	Automaticky vedený vlak <i>bez posádky</i>	Dvoupatrové vozidlo	Spací vozy
Kat. 1	HL1	HL1	HL1	HL2
Kat. 2	HL2	HL2	HL2	HL2
Kat. 3	HL2	HL2	HL2	HL3
Kat. 4	HL3	HL3	HL3	HL3

## 5.4 Vyhodnocování výsledků měření

Pro vyhodnocení statického měření jsme použili následující vztahy:

**Aritmetický průměr:** je definován jako podíl sumy výsledku k jeho počtu n.

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n} \quad [1]$$

$\bar{x}$ ...aritmetický průměr

n... počet měření

x...i-tá hodnota měřené veličiny

**Směrodatná odchylka:** je definována jako absolutní hodnota druhé mocniny.

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad [2]$$

s...směrodatná odchylka

$\bar{x}$ ...aritmetický průměr

n... počet měření

x...i-tá hodnota měřené veličiny

**Variační koeficient:** je definován jako podíl směrodatné odchylky k aritmetickému průměru v procentech.

$$v = \frac{s}{\bar{x}} * 100\% \quad [3]$$

s...směrodatná odchylka

$\bar{x}$ ...aritmetický průměr



## 5.5 Tříbodová zkouška ohybem

Zkouška probíhala na přístroji Zwick 1456 dle normy ČSN EN ISO 178. Zkušební vzorky byly testovány za pokojové teploty 23°C. Rozměry vzorku byly stanoveny 100x20 mm.

### 5.5.1 Trhací stroj Zwick 1456

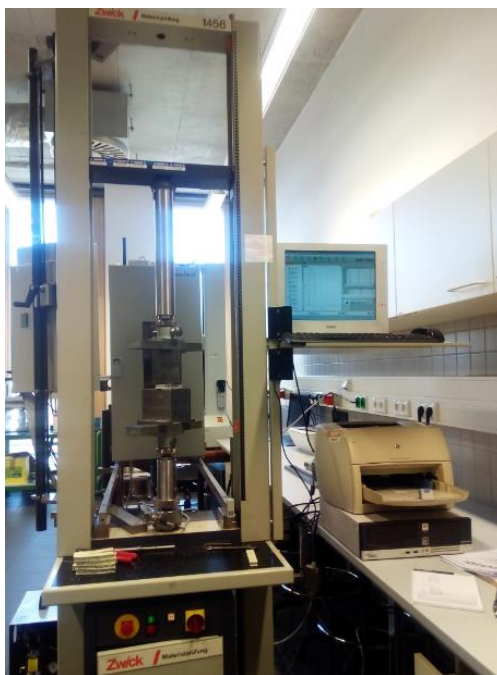
Tříbodová zkouška ohybem byla prováděna na trhacím přístroji Zwick 1456. Naměřené hodnoty byly vyhodnoceny softwarem TestXpert v7.11., který je součástí vybavení stroje. Při provádění ohybové zkoušky byly podpěry od sebe vzdáleny 80 mm. Přístroj Zwick 1456 je vybaven i teplotní komorou. Samotné výsledky si přístroj vyhodnocuje automaticky, výsledky jsou zpracovány do grafů a tabulek.

#### *Hodnoty nastavené pro měření:*

- Rychlost před zatížení 2 mm.min<sup>-1</sup>
- Rychlost zatížení 10 mm.min<sup>-1</sup>

#### **Technické informace o Zwick 1456:**

- Maximální posuv příčnicku 800 mm.min<sup>-1</sup>
- Rozsah teplotní komory od -80+250°C
- Druh prováděných zkoušek tlak, tah, ohyb



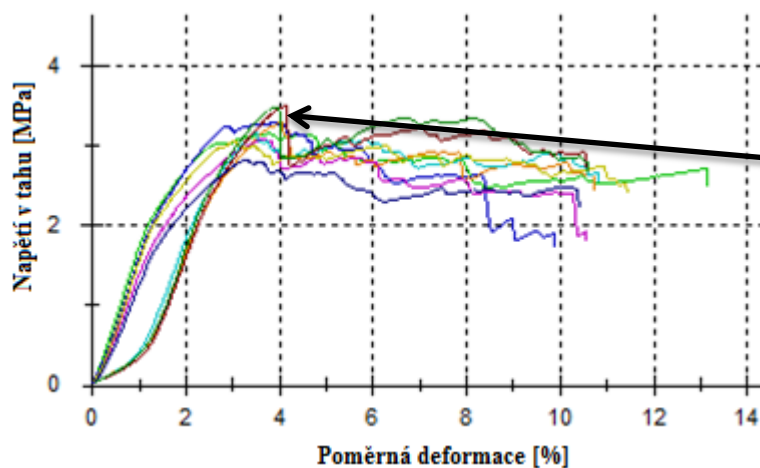
Obr. 49. Trhací stroj Zwick 1456

## 5.6 Výsledky zkoušky tříbodového ohybu

### 5.6.1 Vzorky A

Tab. 5. Výsledky pro zkušební vzorek 2A

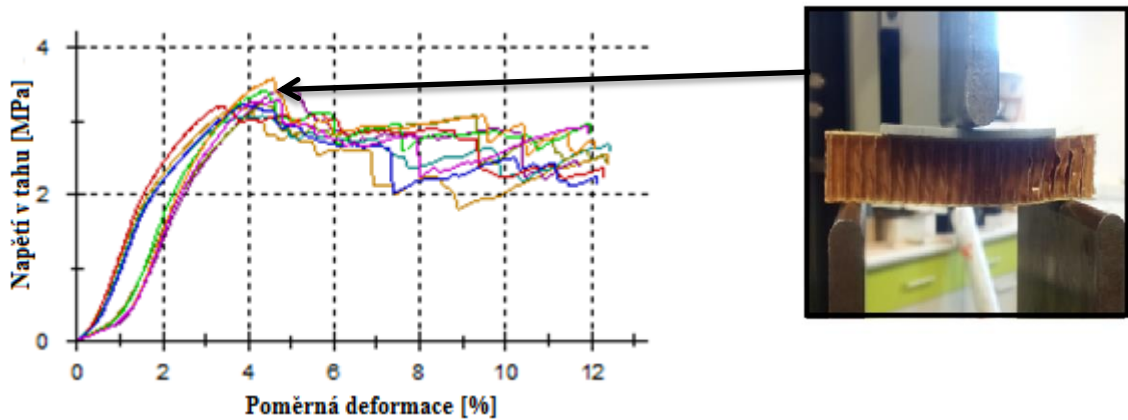
n=9	a [mm]	b [mm]	$\sigma_m$ [MPa]	E [MPa]	$\varepsilon$ [%]
$\bar{x}$	20	20,66	3,21	70,8	1,6
s	0	0	0,211	46,7	0
v	0	0	6,6	65,96	2,7



Obr. 50. Graf zkušební vzorku 2A

Tab. 6. Výsledky vzorku 3A

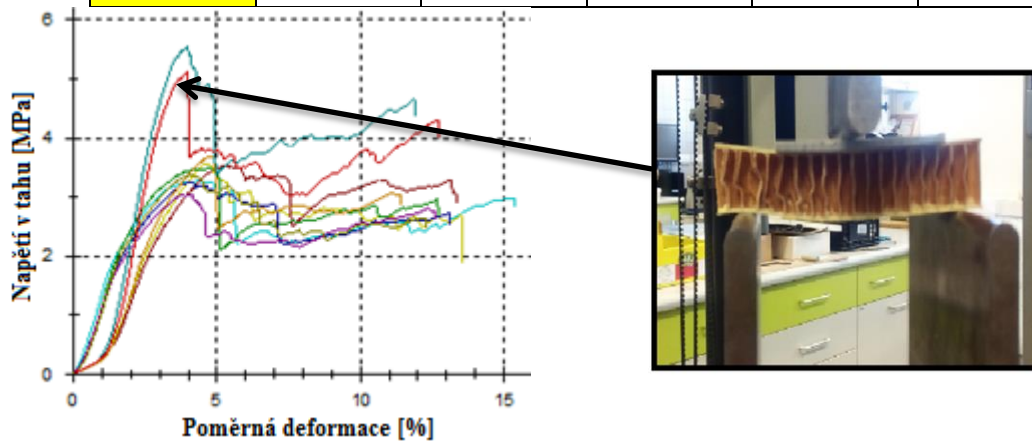
n=9	a [mm]	b [mm]	$\sigma_m$ [MPa]	E [MPa]	$\varepsilon$ [%]
$\bar{x}$	21,4	20,55	3,29	33,2	4,3
s	0	0	0,155	14,2	0,4
v	0	0	4,72	42,72	10,41



Obr. 51. Graf vzorku 3A

Tab. 7. Výsledky pro zkušební vzorek 4A

n=9	a [mm]	b [mm]	$\sigma_m$ [MPa]	E [MPa]	$\epsilon$ [%]
$\bar{x}$	22	20,51	3,79	42,7	4,4
s	0	0	0,835	27,3	0,5
v	0	0	22,04	63,95	11,31

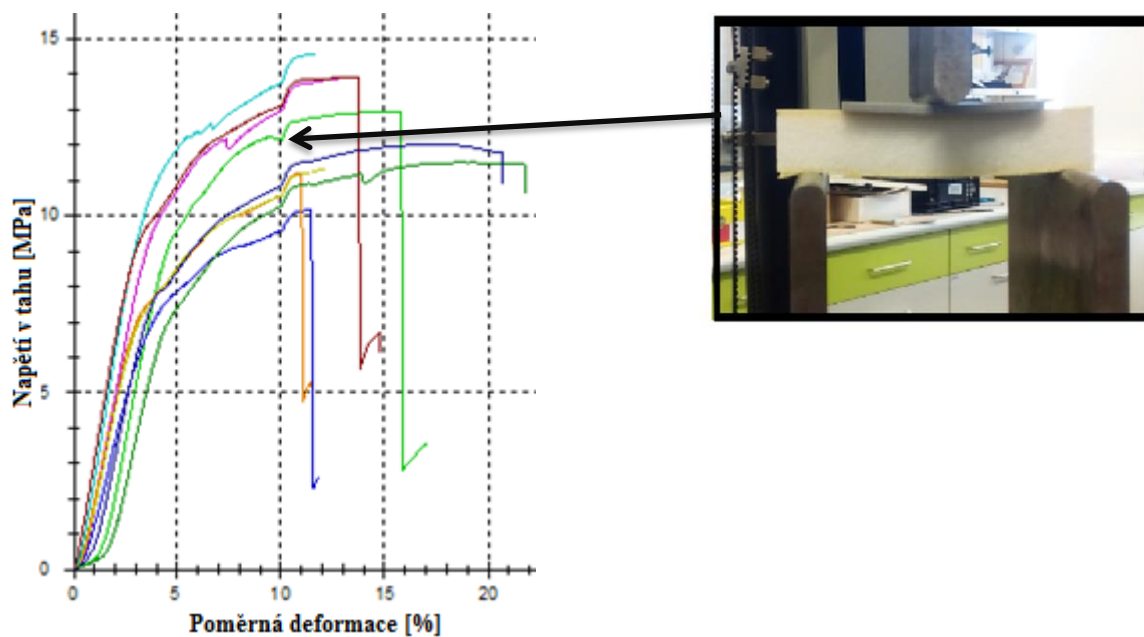


Obr. 52. Graf vzorku 4A

### 5.6.2 Vzorky B

Tab. 8. Výsledky vzorku 2B

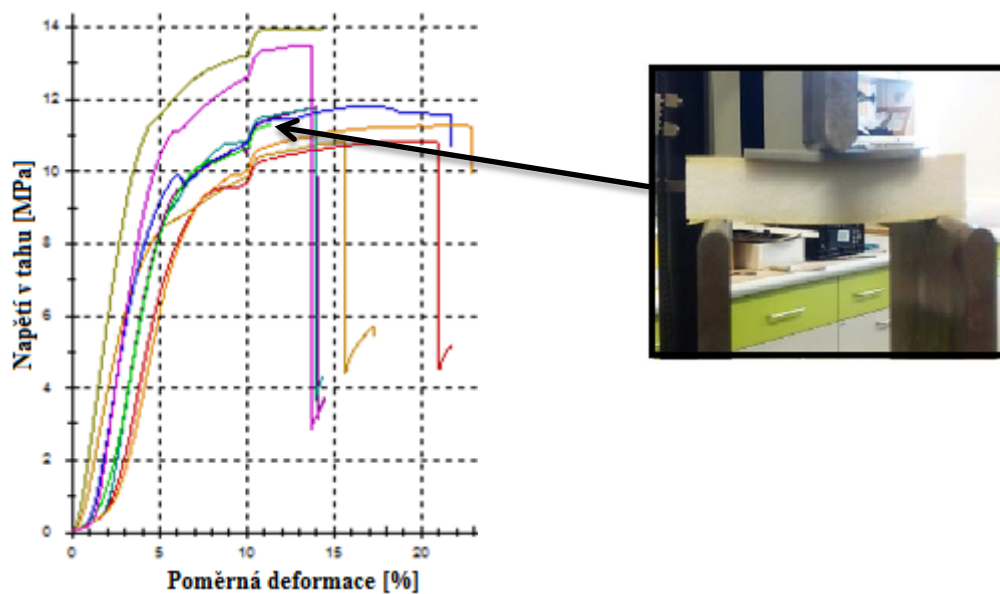
n=9	a [mm]	b [mm]	$\sigma_m$ [MPa]	E [MPa]	$\epsilon$ [%]
$\bar{x}$	21,4	20,55	12,4	67,8	13,8
s	0	0	1,5	65,5	2,8
v	0	0	12,12	96,56	20,31



Obr. 53. Graf vzorku 2B

Tab. 9. Výsledky vzorku 3B

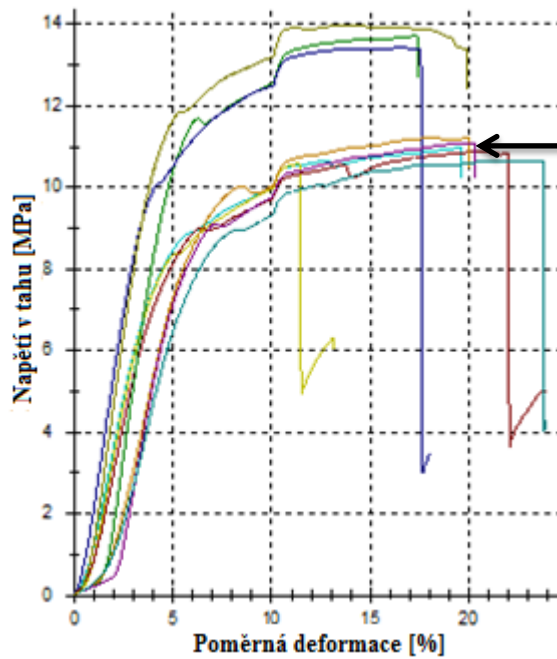
n=9	a [mm]	b [mm]	$\sigma_m$ [MPa]	E [MPa]	$\varepsilon$ [%]
$\bar{x}$	21,14	20,55	11,9	32,1	15,5
s	0	0	1,11	27,6	3,2
v	0	0	9,32	85,82	20,55



Obr. 54. Graf vzorku 3B

Tab. 10. Výsledky vzorku 4B

n=9	a [mm]	b [mm]	$\sigma_m$ [MPa]	E [MPa]	$\varepsilon$ [%]
$\bar{x}$	21,62	20,55	11,8	36,1	17,9
s	0	0	1,43	30,2	3,7
v	0	0	12,05	83,82	20,89

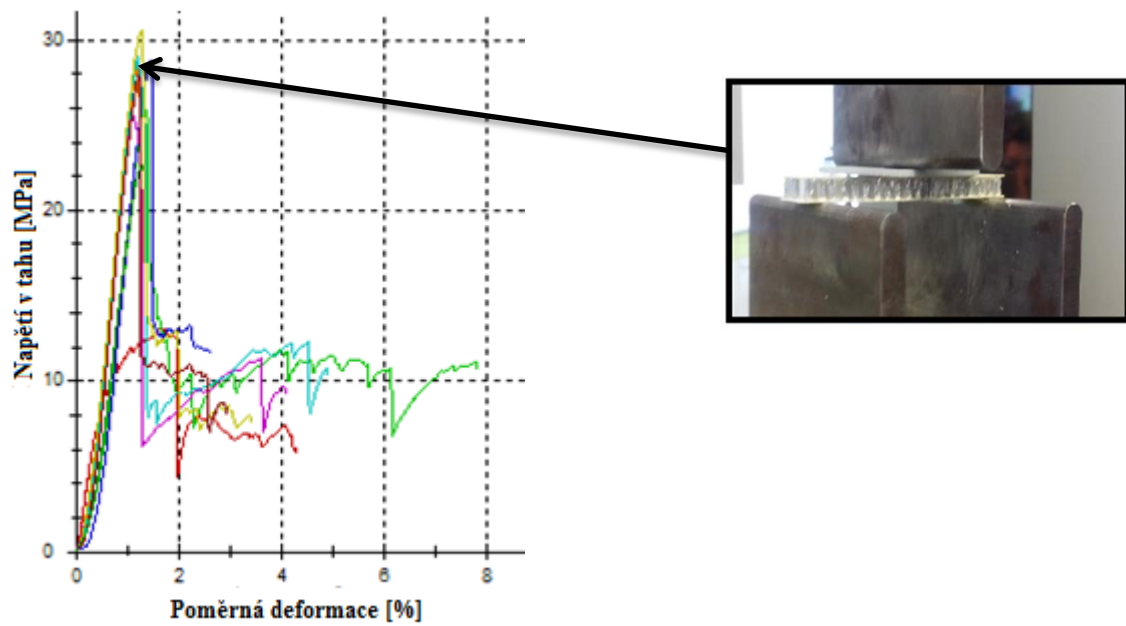


Obr. 55. Graf vzorku 4B

### 5.6.3 Vzorky C

Tab. 11. Výsledky vzorku 2C

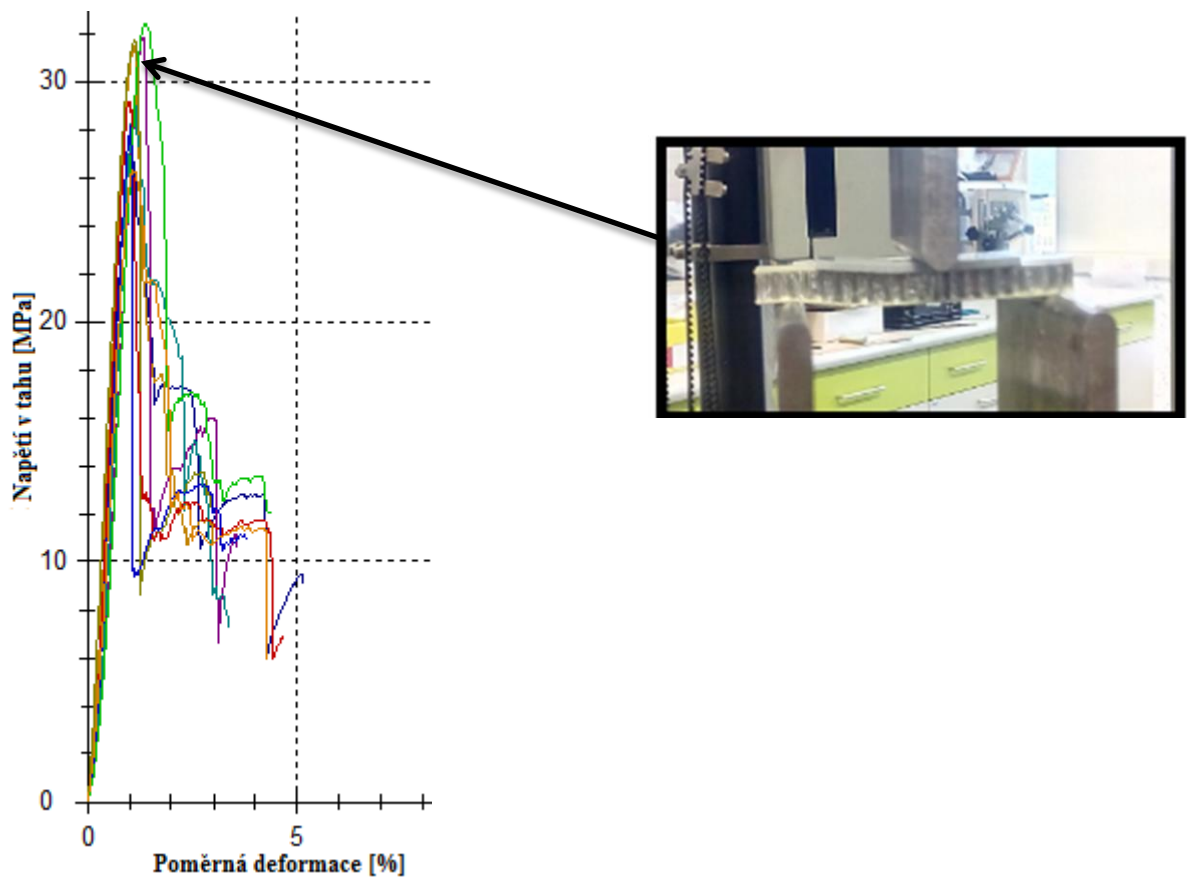
n=9	a [mm]	b [mm]	$\sigma_m$ [MPa]	E [MPa]	$\varepsilon$ [%]
$\bar{x}$	9,85	20,55	25,8	1070	1,3
s	0	0	5,33	550	0,2
v	0	0	20,63	51,28	12,44



Obr. 56. Graf vzorku 2C

Tab. 12. Výsledky vzorku 3C

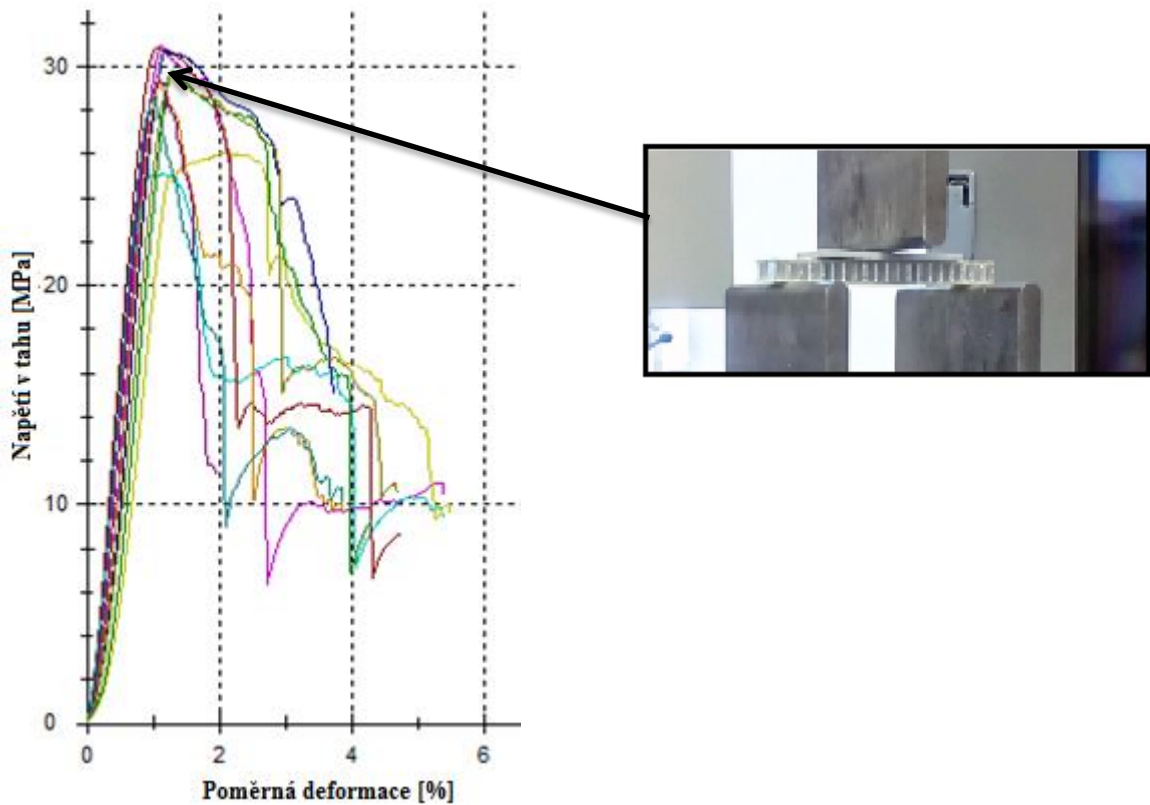
n=9	a [mm]	b [mm]	$\sigma_m$ [MPa]	E [MPa]	$\varepsilon$ [%]
$\bar{x}$	10,28	20,53	29,7	1860	1,1
s	0	0	2,27	631	0,1
v	0	0	7,65	33,83	11,89



Obr. 57. Graf vzorku 3C

Tab. 13. Výsledky vzorku 4C

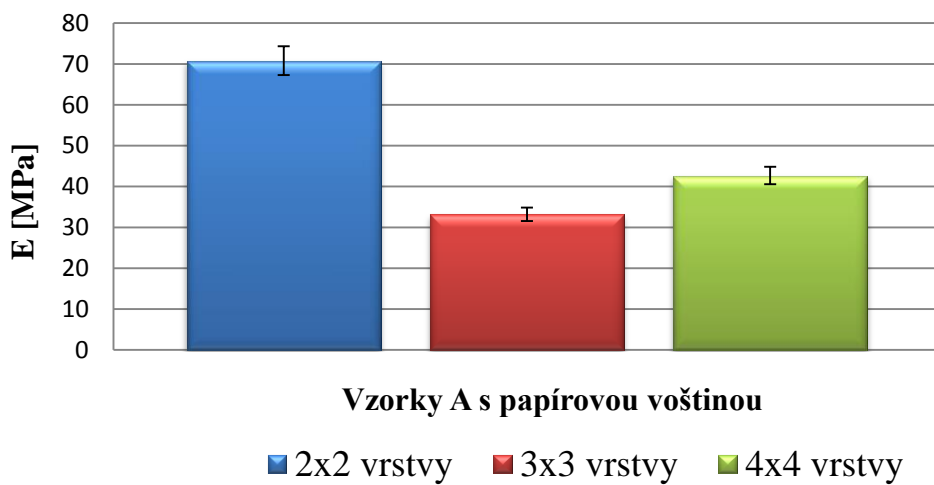
n=9	a [mm]	b [mm]	$\sigma_m$ [MPa]	E [MPa]	$\varepsilon$ [%]
$\bar{x}$	10,73	20,46	29,1	1760	1,2
s	0	0	1,99	849	0,3
v	0	0	6,86	48,26	24,4



Obr. 58. Graf vzorku 4C

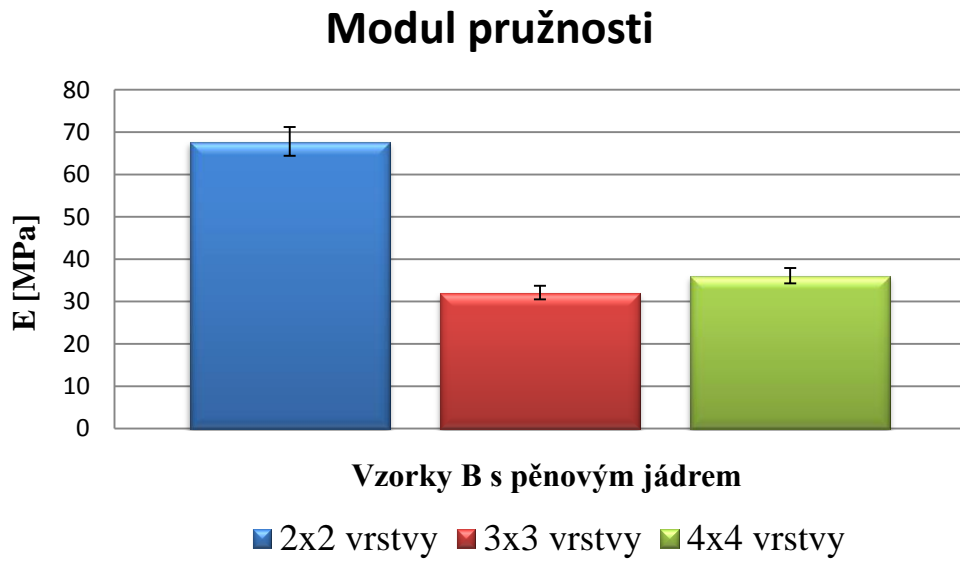
5.6.4 Vyhodnocení tříbodové ohybové zkoušky

**Modul pružnosti**

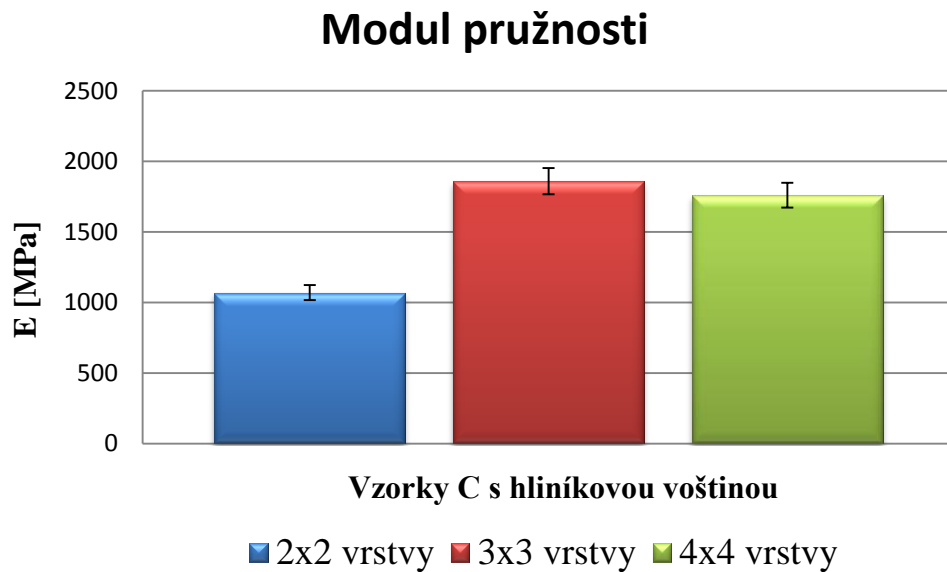


Obr. 59. Vyhodnocení modulu pružnosti při ohybové zkoušce vzorků A





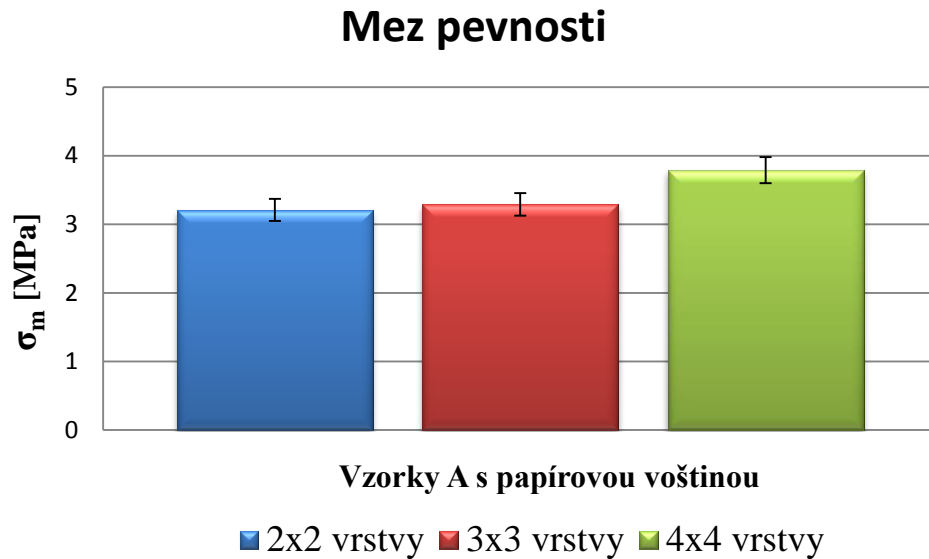
Obr. 60. Vyhodnocení modulu pružnosti při ohybové zkoušce vzorků B



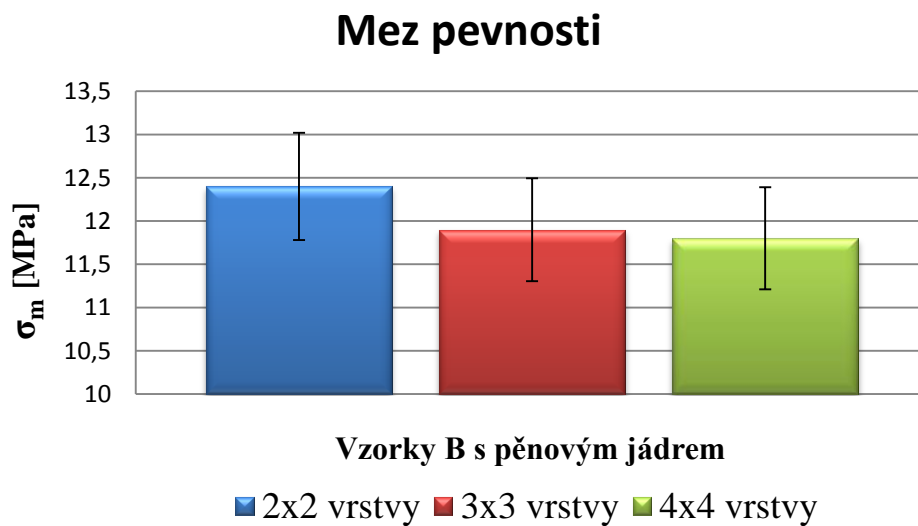
Obr. 61. Vyhodnocení modulu pružnosti při ohybové zkoušce vzorků C

Z grafů je zřejmé, že nejlépe dopadly u zkoušky ohybem vzorky typu C s jádrem z hliníkové voštiny. Největší modul pružnosti byl naměřen 1860 MPa pro vzorek typu C s 3x3 vrstvy prepregu. Naopak s nejhorším modulem pružnosti dopadly vzorky typu B s jádrem z pěny. Během průběhu zkoušky byly rovněž zaznamenávány vzniklé poruchy,

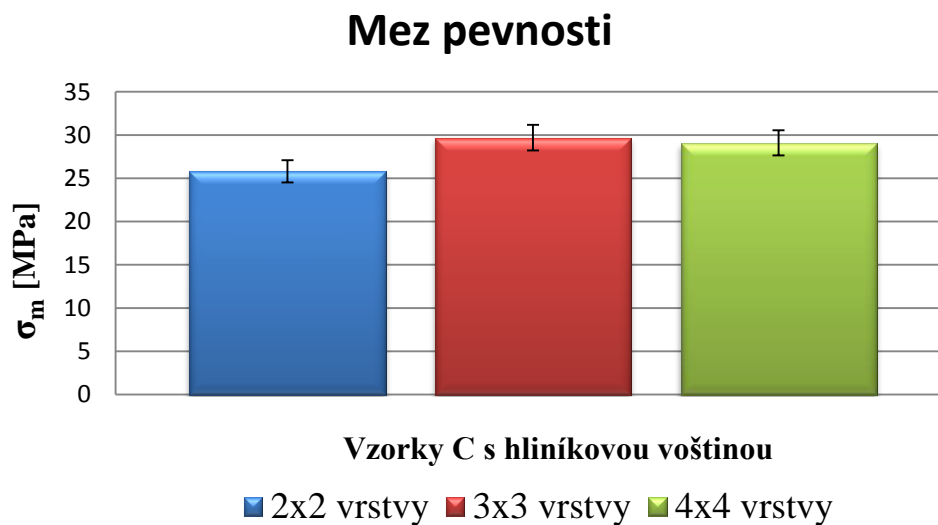
které měli ve většině případů plošný charakter a docházelo nejčastěji k porušení soudružnosti mezi jádrem a vnější vrstvou.



Obr. 62. Vyhodnocení meze pevnosti vzorků A při ohybové zkoušce



Obr. 63. Vyhodnocení meze pevnosti vzorků B při ohybové zkoušce



Obr. 64. Vyhodnocení meze pevnosti vzorků C při ohybové zkoušce

Nejvyšší hodnota meze pevnosti byla u vzorků typu C a to 29,7 MPa. Opět se ukázalo, že nejlepším typem jádra je hliníková voština, která vykazuje nejlepší výsledky meze pevnosti ze všech zkoušených vzorků. Nejhorších výsledků dosáhly vzorky A s papírovou voštinou, které dosáhly minimálních mezí pevností, nejmenší mez pevnosti byla naměřena u vzorku typu A s 2x2 vrstvami prepregu a to 3,21 MPa.

Nejvhodnější materiály vychází vzorky C s hliníkovou voštinou. V obou případech jak už u meze pevnosti nebo modulu pružnosti, vychází s nejvyššími hodnotami.

Aby se výsledky srovnaly, tak by se daly navrhnout vzorky s jinou papírovou voštinou. Vybrala by se s hustší sítí buněk na  $m^3$  nebo by se zvolila větší tloušťka voštiny. Získaly bychom lepší mechanické vlastnosti. Ovšem musí se počítat s tím, že vzroste i hmotnost výsledného vzorku.

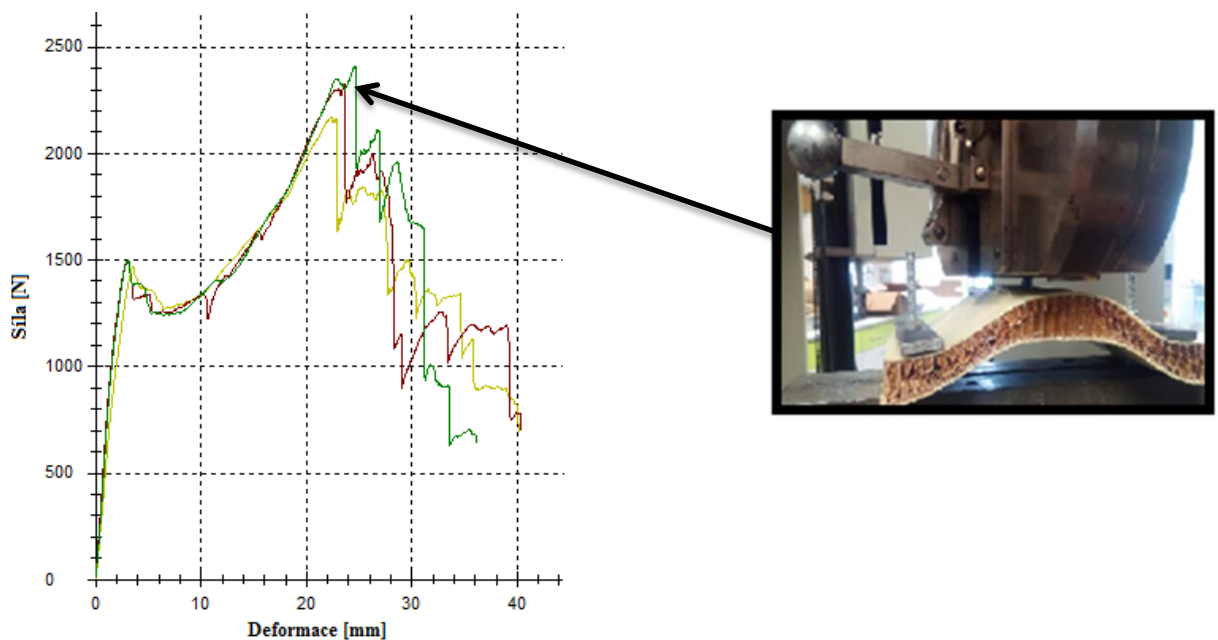
## 5.7 Měření síly potřebné k vytržení závitového insertu

U zkoušky byly testovány vzorky s papírovou voštinou o tloušťce 20 mm, do kterých byly aplikovány vložky z HPL desky 40 x 40 mm. Do vložek poté byly našroubovány závitové inserty M8 a M6. U poloviny vzorků byl použit tmel k připevnění vložek k papírovým voštinám, druhá polovina byla bez tmelu. Výsledkem zkoušky bylo při jaké síle, jsou vytrženy vložky ze vzorků a zda je potřeba tmel k jejímu přichycení.

### 5.7.1 Vzorky M8-4S

Tab. 14. Naměřené výsledky z trhačky pro vzorek M8-4S

n=3	Síla F [N]	Deformace $\Delta l$ [mm]
$\bar{x}$	2300	23,5
s	120	1,2
v	5,21	4,94

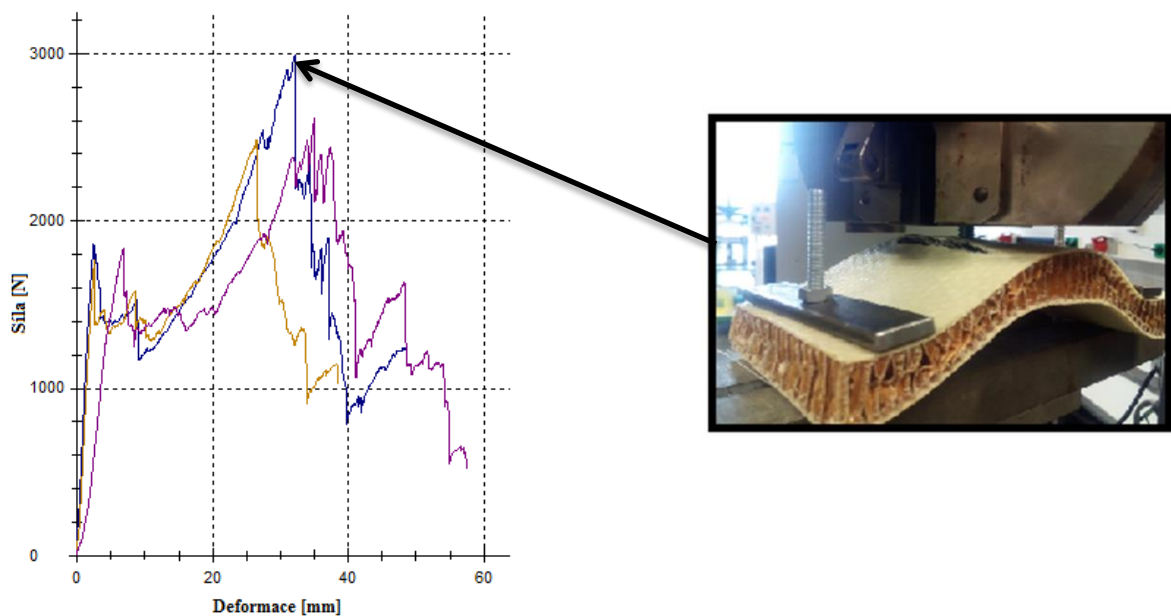


Obr. 65. Graf vzorku M8-4S

## 5.7.2 Vzorky M8-2S

Tab. 15. Naměřené výsledky z trhačky pro vzorek M8-2S

n=3	Síla F [N]	Deformace $\Delta l$ [mm]
$\bar{x}$	2700	31,2
s	261	4,4
v	9,67	13,95

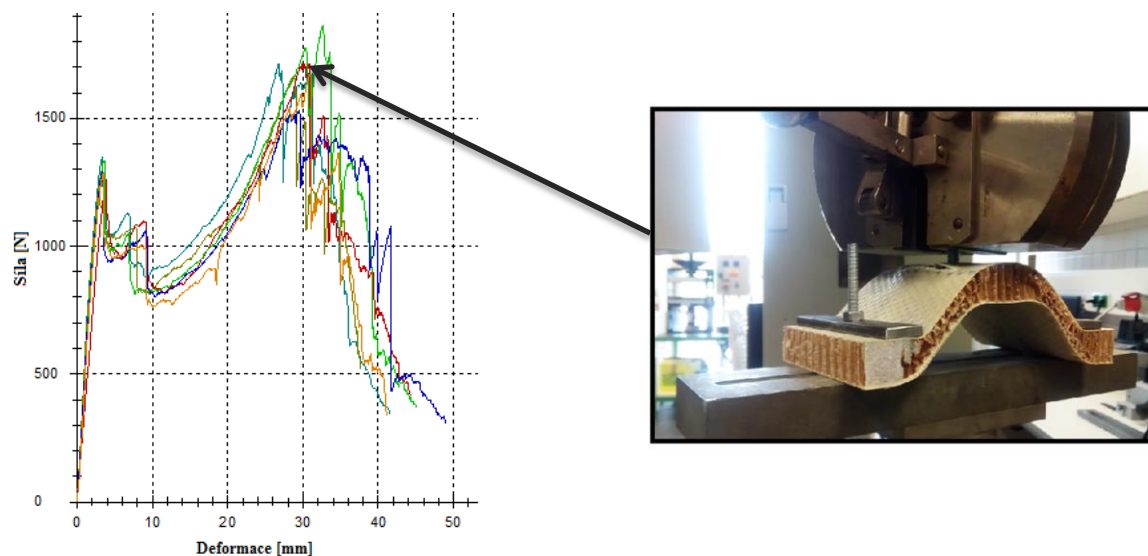


Obr. 66. Graf vzorku M8-2S

## 5.7.3 Vzorky M8-2B

Tab. 16. Naměřené výsledky z trhačky pro vzorek M8-2B

n=3	Síla F [N]	Deformace $\Delta l$ [mm]
$\bar{x}$	1690	29,8
s	107	2
v	6,33	6,72

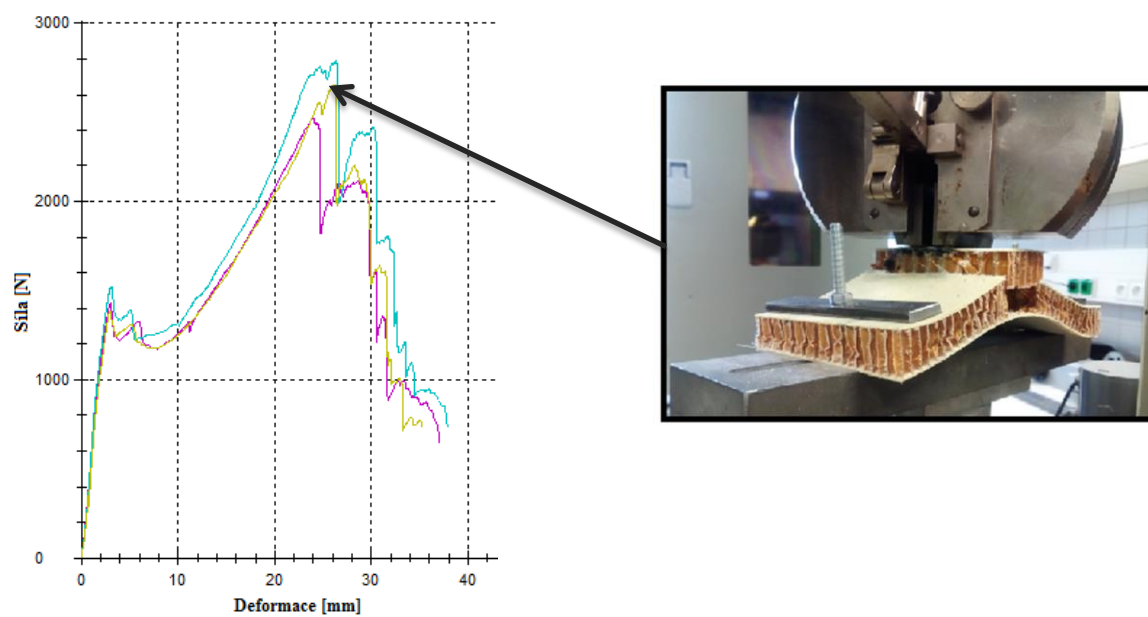


Obr. 67. Graf vzorku M8-2B

### 5.7.4 Vzorky M6-4S

Tab. 17. Naměřené výsledky z trhačky pro vzorek M6-4S

n=3	Síla F [N]	Deformace $\Delta l$ [mm]
$\bar{x}$	2640	25,5
s	164	1,3
v	6,22	5,1

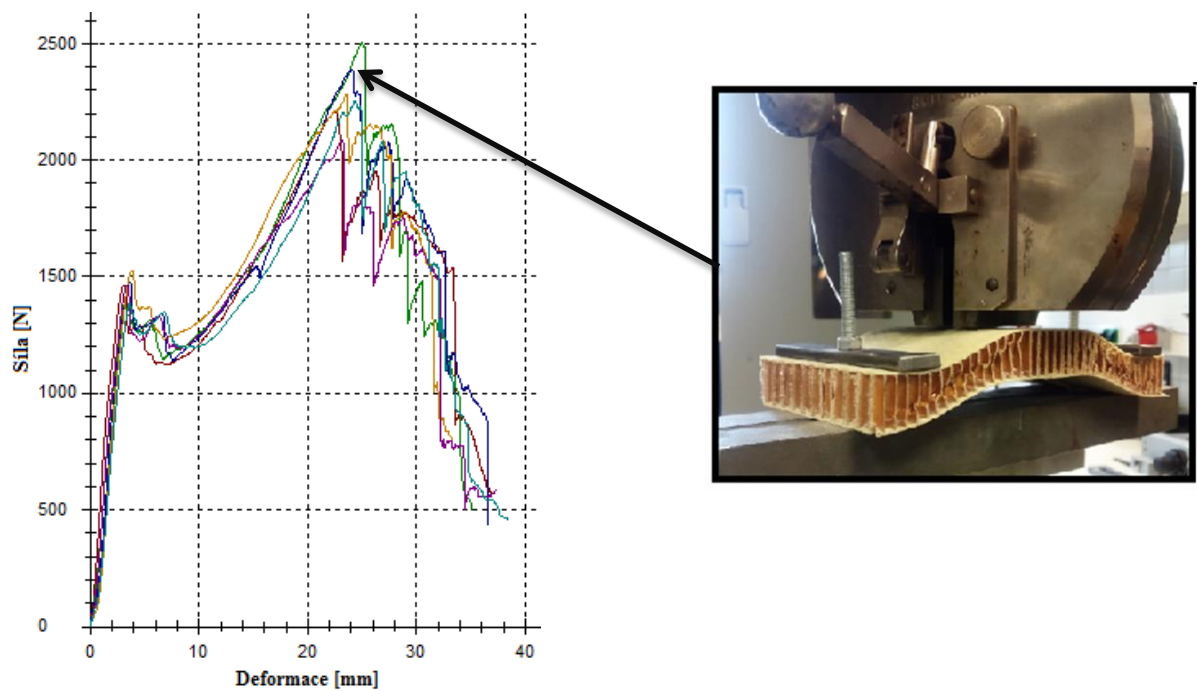


Obr. 68. Graf vzorku M6-4S

## 5.7.5 Vzorky M6-4B

Tab. 18. Naměřené výsledky z trhačky pro vzorek M6-4B

n=3	Síla F [N]	Deformace $\Delta l$ [mm]
$\bar{x}$	2290	23,8
s	145	0,8
v	6,33	3,56

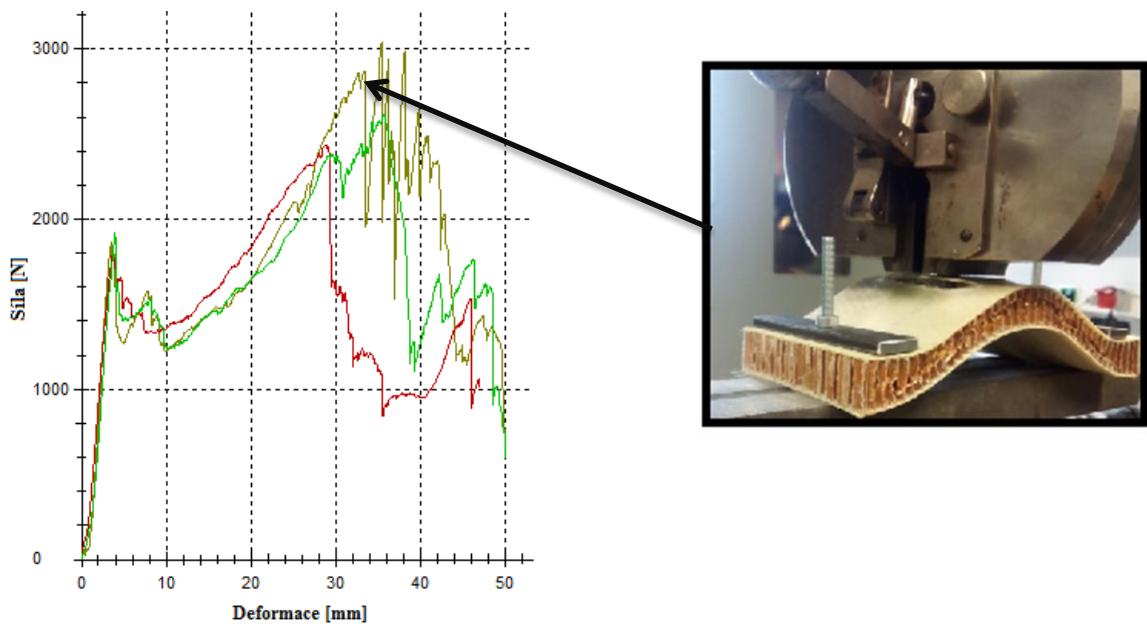


Obr. 69. Graf vzorku M6-4B

## 5.7.6 Vzorky M6-2S

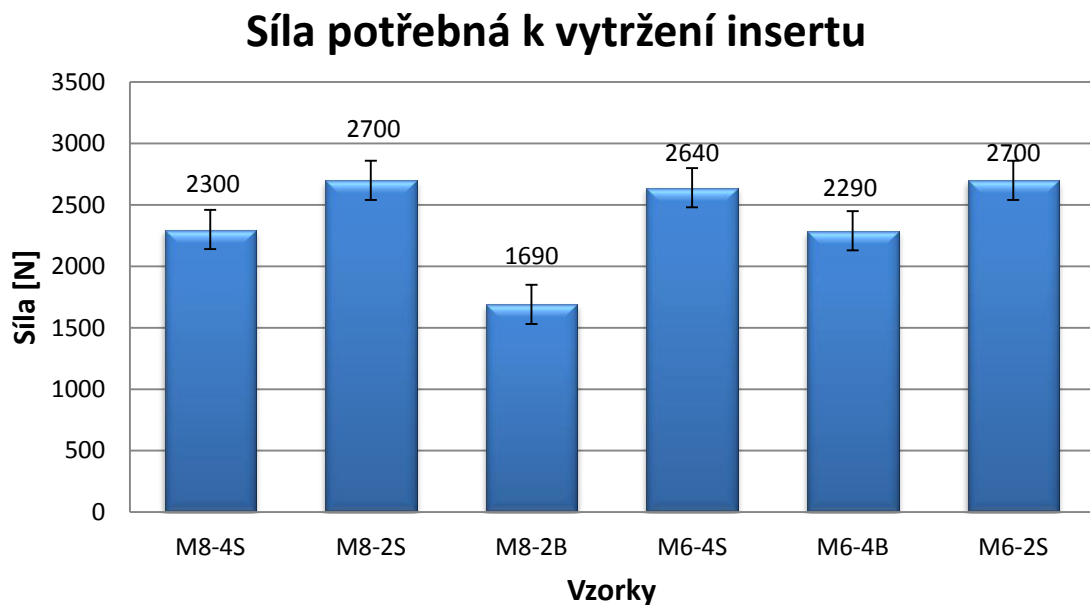
Tab. 19. Naměřené výsledky z trhačky pro vzorek M6-2S

n=3	Síla F [N]	Deformace $\Delta l$ [mm]
$\bar{x}$	2700	33,3
s	310	3,9
v	11,48	11,85



Obr. 70. Graf vzorku M6-2S

### 5.7.7 Vyhodnocení síly potřebné k vytržení insertu



Obr. 71. Vyhodnocení síly potřebné k vytržení

Z grafu je patrné, že u vzorků M8-2S, M6-2S a M6-4S je potřebná větší síla k vytržení. Je to z důvodu, že u vzorků s označením 2S nebo 4S, byly vložky upevněny k papírové vošti-



ně pomocí tmelu. U vzorků s označením 2B nebo 4B nedošlo k upevnění pomocí tmelu. Očekávalo se, že vzorky s tmelem, budou vycházet lépe než vzorky bez tmelu. Co se ovšem nepředpokládalo, že by dvouvrstvé vzorky měly vycházet lépe než čtyřvrstvé. Průměrná síla potřebná k vytržení byla u vzorků M8-2S a M6-2S na stejné úrovni a to 2700 N. Naopak u vzorku M8-2B je potřeba nejnižší potřebná síla k vytržení 1690N.

U všech vzorků nedošlo k vytržení závitových insertů, ale pouze k deformaci zkoušených vzorků. U některých typů docházelo k vytržení celé vložky z HPL desky, ve které byl našroubován insert. Pokud byla vložka připevněna tmelem k voštině, tak docházelo k vytržení vložky i s kouskem voštiny.

## 5.8 Výsledky zkoušky odrazivosti

Zkouška se vztahovala na 1A,2A,3A,2B,3B,4B a 2C,3C,4C. Každý vzorek musí být upevněn v kovovém rámu, který musí být umístěn na naprosto rovné vodorovné pevné podlaze. Rám musí být pečlivě vycentrován kolmo ke kuličce. Plocha zkušební vzorku musí být pokryta s listem uhlového papíru, počerněná strana papíru je ve styku s horní plochou vzorku. Výška pádu ocelové kuličky byla stanovena dle tabulky Tab. 18., kde jsou zvýrazněny podmínky pro naše vzorky o tloušťce větší než 10mm je výška pádu kuličky 2 m a pro vzorky větší než 15mm je výška pádu kuličky 2,5m. Kulička se pak nechá spadnout na zkušební vzorek. Po pádu a odrazu se kulička musí chytit, aby se zamezilo jejího pádu na zkušební vzorek podruhé. Kopírovací papír se odstraní a měří se průměr získaného otisku kuličky ve vzorku. Výsledky musí být v souladu s ustanoveními, průměr kulového otisku musí být menší než 10 mm, dle normy UIC CODE 844-4 R.

Tab. 20. Podmínky testování

Kategorie	Tloušťka vzorku [mm]	Výška pádu [m]	Podmínka zkušební- ho vzorku
<b>A</b>	Jakákoliv tloušťka	1,20	přilepen
<b>A a B</b>	e < 0,9	0,80	přilepen
	0,9 ≤ e < 1,3	1,00	přilepen
	1,3 ≤ e < 3	1,75	přilepen
	3 ≤ e < 4	0,70	nepřilepen
	4 ≤ e ≤ 6	0,90	nepřilepen
<b>B</b>	6 < e ≤ 10	1,50	nepřilepen
	10 < e ≤ 15	<b>2,00</b>	<b>nepřilepen</b>
	e > 15	<b>2,50</b>	<b>nepřilepen</b>

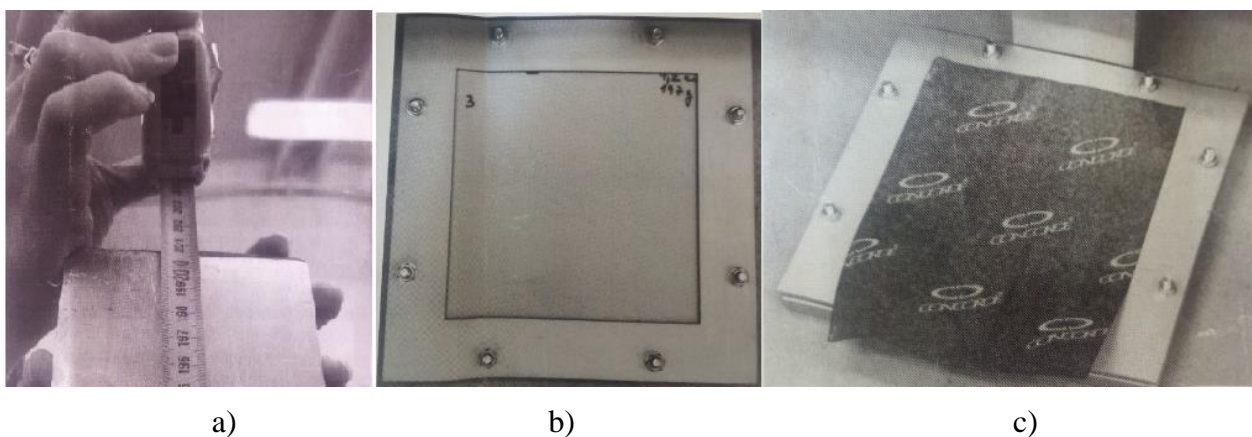
### 5.8.1 Průběh zkoušky

1. V prvním kroku bylo nezbytné dohledat všechny pomůcky, které jsou potřeba k provedení zkoušky. Kovový rám koresponduje rozměrům, viz Obr. 40., kulička o průměru  $42,8 \pm 0,2$  mm a váze  $324\text{g} \pm 5$  g, kopírovací papír, kalibrovaný metr, kalibrovaná váha a kalibrované posuvné měřítko.



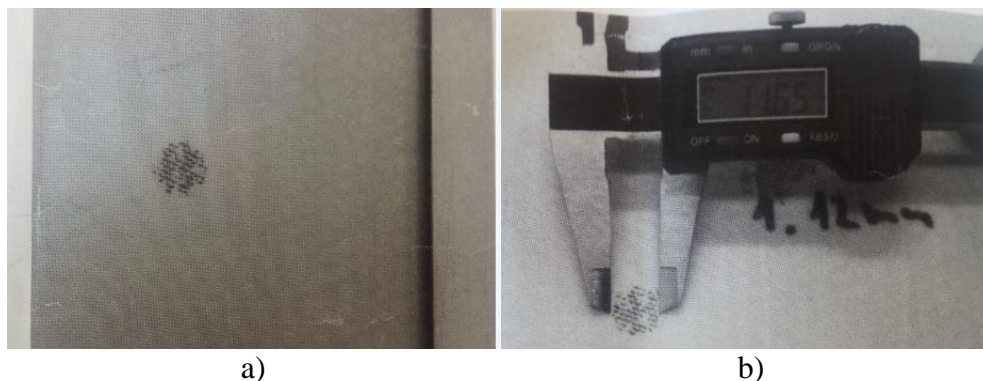
Obr. 72. Průměr kuličky

2. Po upnutí zkušební vzorku do připraveného ocelového rámu a umístění na rovnou pevnou plochu, se odměřila výška 2 m nebo 2,5 m, z které se bude pouštět kulička na zkušební vzorek. Pro určení výšky pádu kuličky sloužila Tab. 18. Na připravený rámeček s upnutým vzorkem se položí kopírovací papír, počerněnou stranou na plochu vzorku, tak aby došlo po pádu k otisku kuličky.



Obr. 73. a) výška 2m pro pád kuličky, b) ocelový rám, c) kopírovací papír

3. V tomto kroku dochází k provedení zkoušky odrazivosti, tak že se kulička spustí volným pádem na vzorek z 2 m nebo 2,5 m. Při dopadu kuličky na vzorek s kopírovacím papírem, dochází k otisku kuličky přes papír na vzorek. Následně se změřil průměr otisku. Tento krok se ještě několikrát opakoval pokaždé pro jiný vzorek.



Obr. 74. a) otisk kuličky, b) měření průměru otisku

4. Naměřené hodnoty se vyhodnocovaly, zda splňují požadavky normy UIC CODE 844-4 R a je možné je dále použít ve výrobě.

Tab. 21. Výsledky odolnosti proti nárazu

Vzorky	Typ výplně	Tloušťka [mm]	Výška pádu [m]	1. Otisk	2. Otisk	3. Otisk	Aritmetický průměr [mm]
2A	Papírová voština	20,90	2,50	13,50	12,02	-	12,76
3A	Papírová voština	21,30	2,50	10,91	11,53	-	11,22
4A	Papírová voština	21,80	2,50	11,02	9,84	-	10,43
2B	Pěna	20,50	2,50	13,62	13,70	14,60	13,97
3B	Pěna	21,00	2,50	12,32	12,49	-	12,41
4B	Pěna	21,50	2,50	10,89	10,53	-	10,71
1C	Hliníková voština	11,50	2,00	15,00	13,34	-	14,17
2C	Hliníková voština	12,00	2,00	12,00	11,60	11,70	11,77
3C	Hliníková voština	17,50	2,00	11,20	10,50	11,50	11,07

### 5.8.2 Vyhodnocení zkoušky odrazivosti

Navrhnuté konstrukce vzorků neshodují se s podmínkami UIC CODE 844-4 R. Každá naměřená hodnota byla větší než 10 mm, aby se tato zkouška dala považovat za úspěšnou, musely by být naměřené hodnoty menší než 10 mm. Nejblíže ke splnění podmínek normy byl vzorek 4A, kompozit se čtyřmi vrstvami prepregu vyplněn papírovou voštinou vykazuje nejlepší výsledky odolnosti proti nárazům.

Řešením tohoto problému je změna skladby materiálů a použití jiných typů jader, nebo použít stejné typy, ale vybrat takové, které by měly lepší mechanické vlastnosti. Především s vyšší pevností a hustější sítí buněk na m<sup>3</sup>. Musí se volit takové typy jader, aby se zbytečně nezvýšila hmotnost.

## 5.9 Výsledky kónického kalorimetru

Jedná se o vzorky sendvičových kompozitních struktur s dvěma různými lakovacími systémy. Rozměr vzorků použitých na zkoušku na kónickém kalorimetru byly v souladu s požadavkem technických norem ISO 5660-1 a ISO 5660-2. Vzorky byli před zkouškou kondicionované podle požadavků ISO 5660-1.

### Lakovací systémy

➤ **Lakovací systém 1** - se skládá z plniče a vrchní vrstvy

1. Plnič - Je dvousložková vyplňovací nátěrová hmota na polyurethanové bázi s vysokým obsahem částic. Má vysokou chemickou a mechanickou odolnost.
2. Vrchní vrstva - Jedná se o dvousložkový strukturální lak na bázi polyuretanu, s anti-graffiti vlastnostmi. Je možné vytvářet jednovrstevné hladké nebo zjizvené (Narben) povrchy a dvouvrstvé perlové strukturální efekty. Vytvrzený film je otěruvzdorný, nenáchylný k poškrábání, odpuzující nečistoty a lehce čistitelný.

➤ **Lakovací systém 2** – obsahuje plnič a vrchní vrstvu.

1. Plnič - je dvousložkový polyuretanový stříkací antikorozi plnič pro vytvoření kvalitního podkladu pod vrchní vrstvu. Podle stupně naředění lze vytvořit buď silné vrstvy pro vyplnění hrubých nerovností povrchu, nebo tenké, vysoce pevné a rovné vrstvy.

2. Vrchní vrstva - Dvousložkový lak na bázi polyuretanové pryskyřice pro semi-lesk. Je možné vytvářet hladké tenké vrstvy. Tyto úpravy mají vysokou pevnost filmu, dobrou chemickou odolnost a odolnost povětrnostním vlivům.

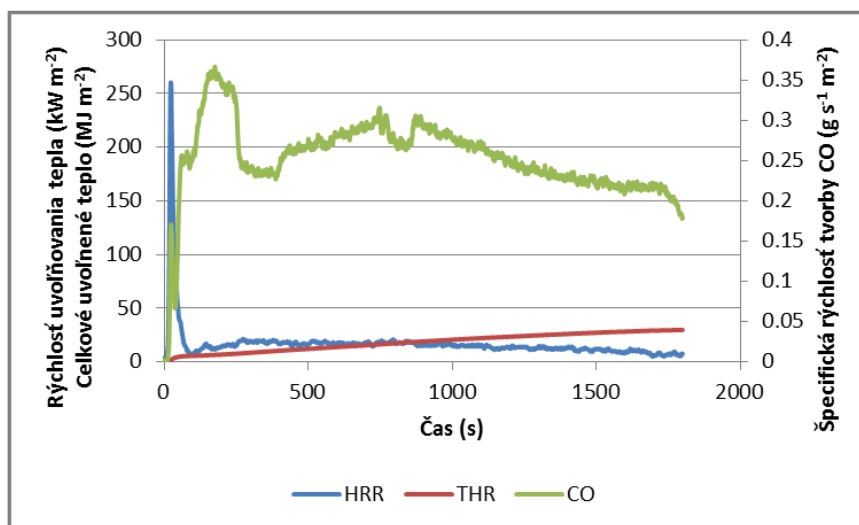
Vzorky byly zkoušené při hustotě tepelného toku  $50 \text{ kWm}^{-2}$ . Orientace vzorků v průběhu zkoušky byla horizontálně.

Podmínky v průběhu zkoušky:

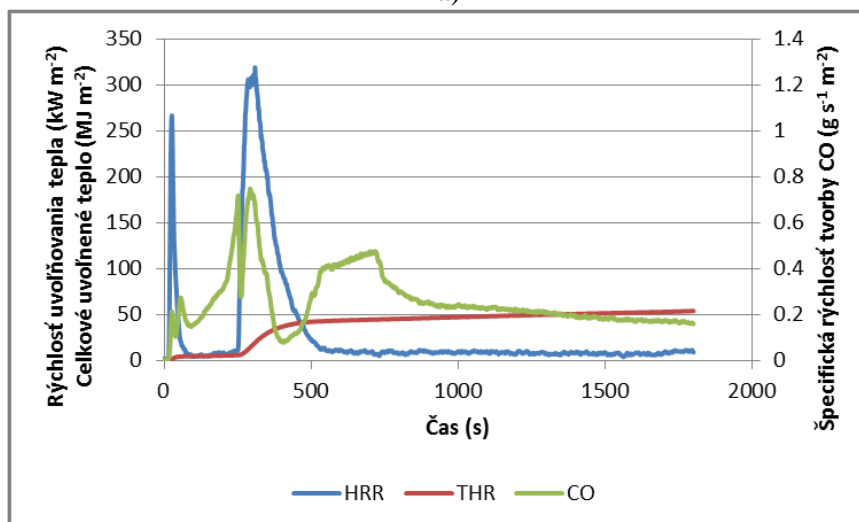
- Teplota okolí: 20 až 21 °C
- Relativní vlhkost vzduchu: 52 až 55 %
- Atmosférický tlak: 98,8 až 99,5 kPa
- Hustota tepelného toku dopadajícího na povrch zkoušených vzorků:  $50 \text{ kWm}^{-2}$
- Průtok vzduchu přes digestoř:  $0,024 \text{ m}^3/\text{s}$

Maximální průměrná rychlost uvolňování tepla je základní charakteristikou, která upozorní na požární riziko materiálu. Čas iniciace a maximální průměrnou rychlost uvolňování tepla (anglická zkratka Mahre - Maximum Average Rate of Heat Emission).

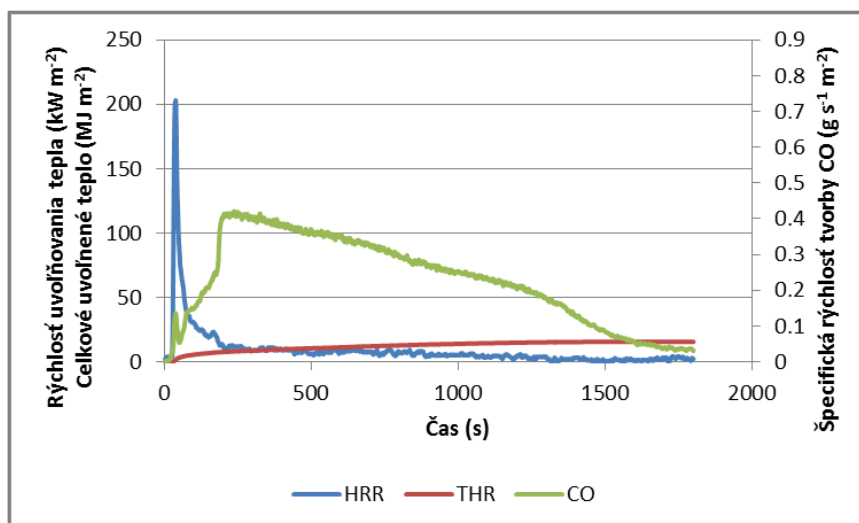
## Výsledky lakovacího systému 1



a)

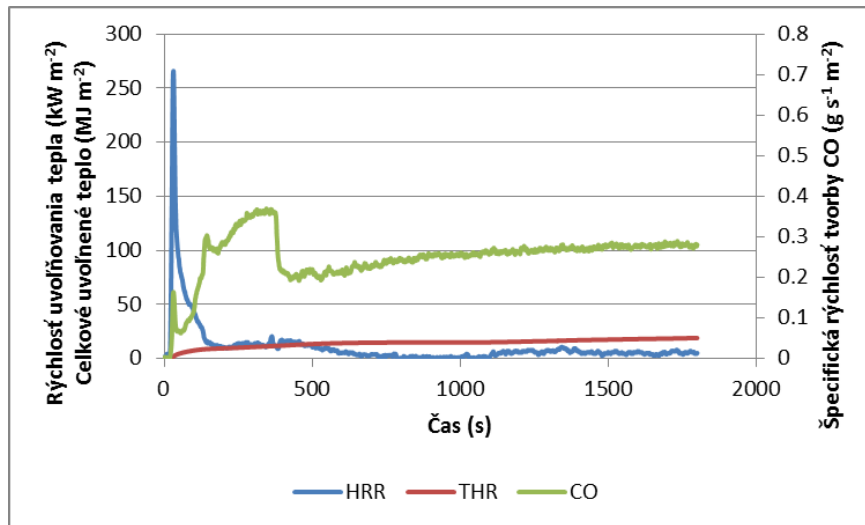


b)

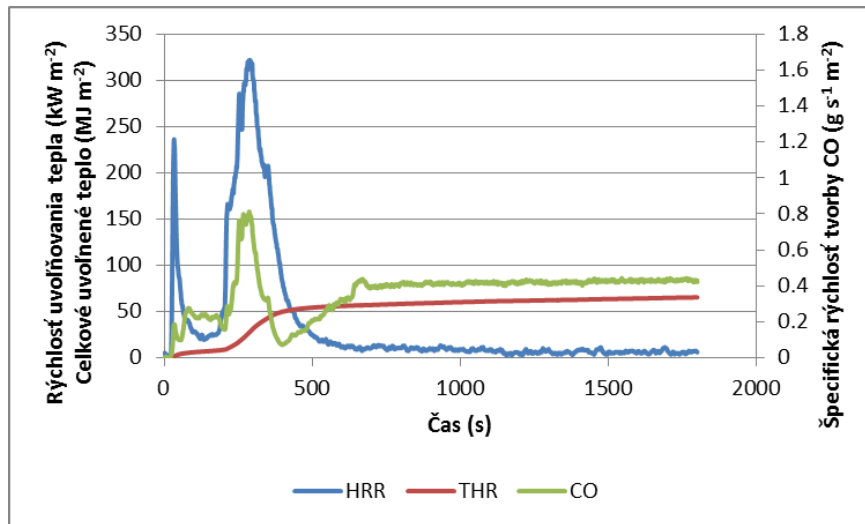


c)

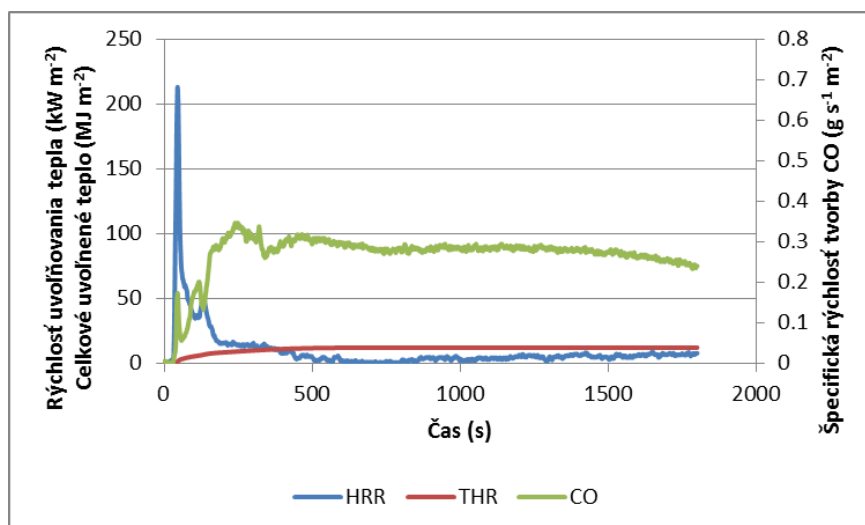
Obr. 75. Rychlost uvolňování tepla (HRR), celkové množství uvolněného tepla (THR) a specifická rychlost tvorby CO ze vzorků a)2A, b)2B, c)2C



a)



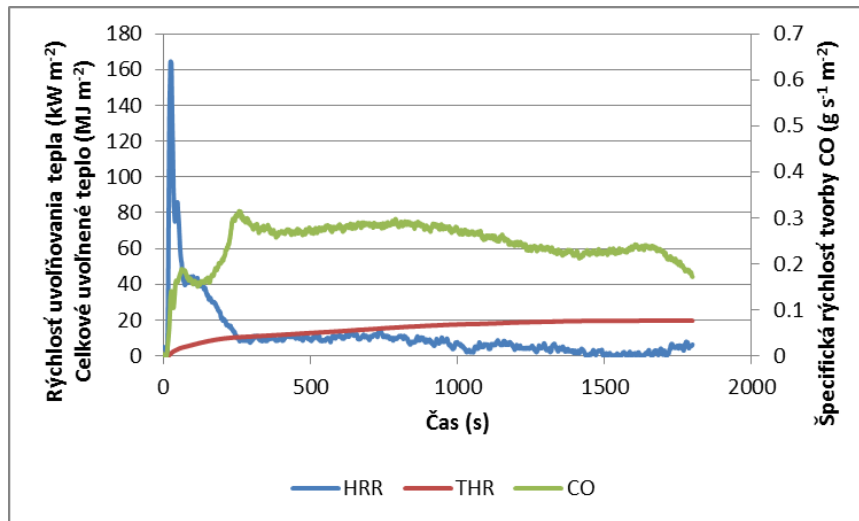
b)



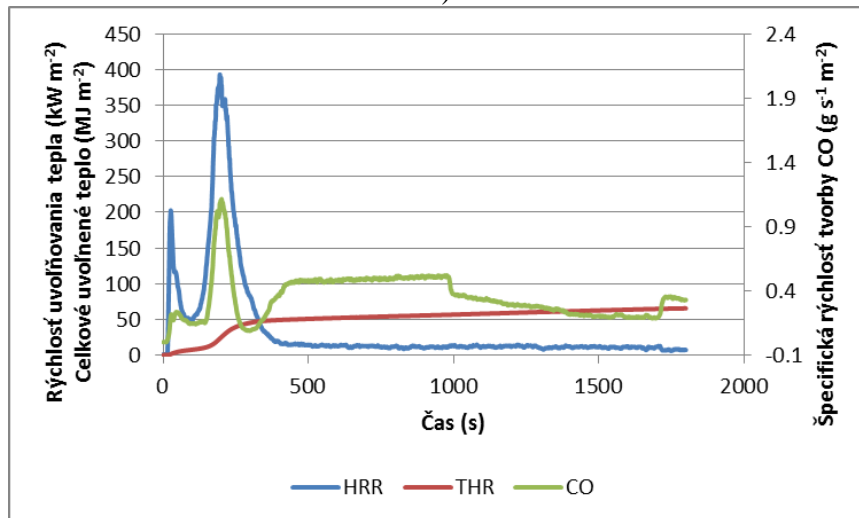
c)

Obr. 76. Rychlost uvolňování tepla (HRR), celkové množství uvolněného tepla (THR) a specifická rychlost tvorby CO ze vzorků a)4A, b)4B, c)4C

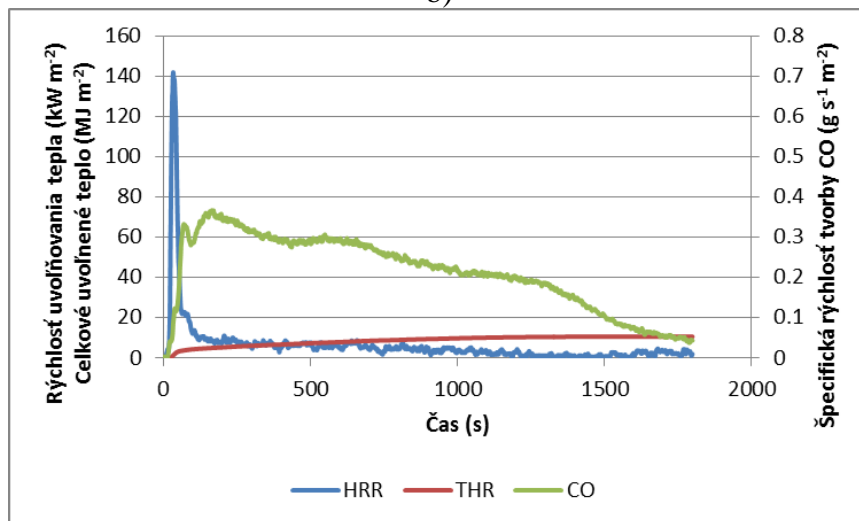
Výsledky lakovacího systému 2



a)



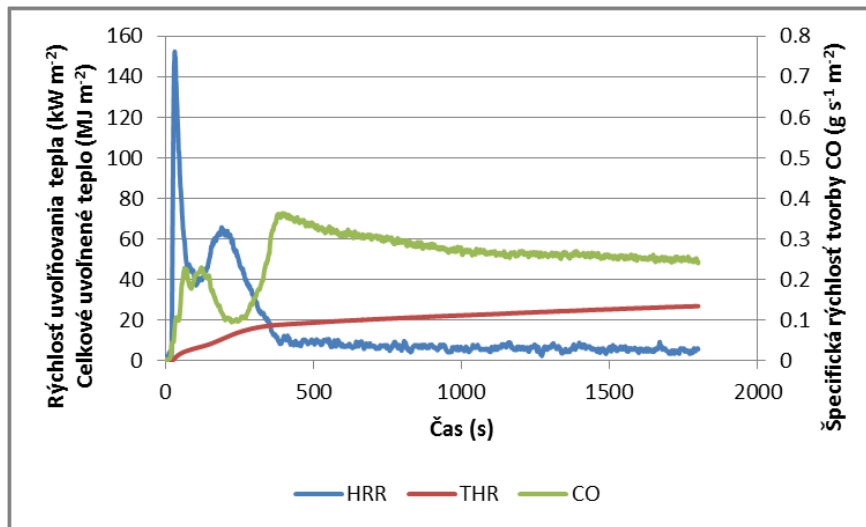
b)



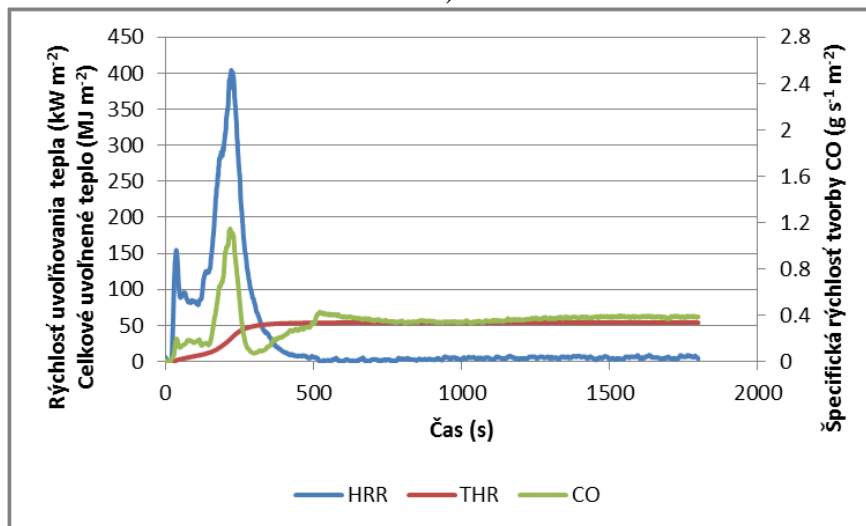
c)

Obr. 77. Rychlost uvolňování tepla (HRR), celkové množství uvolněného tepla (THR) a specifická rychlost tvorby CO ze vzorků a)2A, b)2B, c)2C

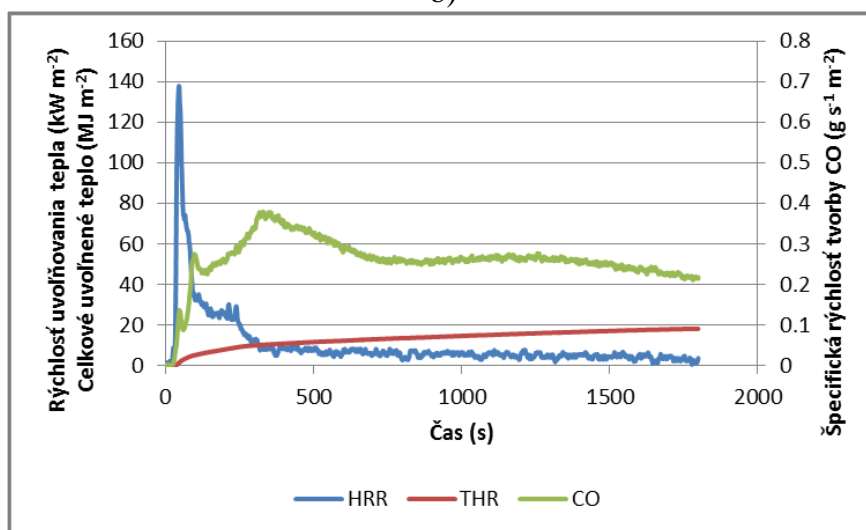




a)



b)

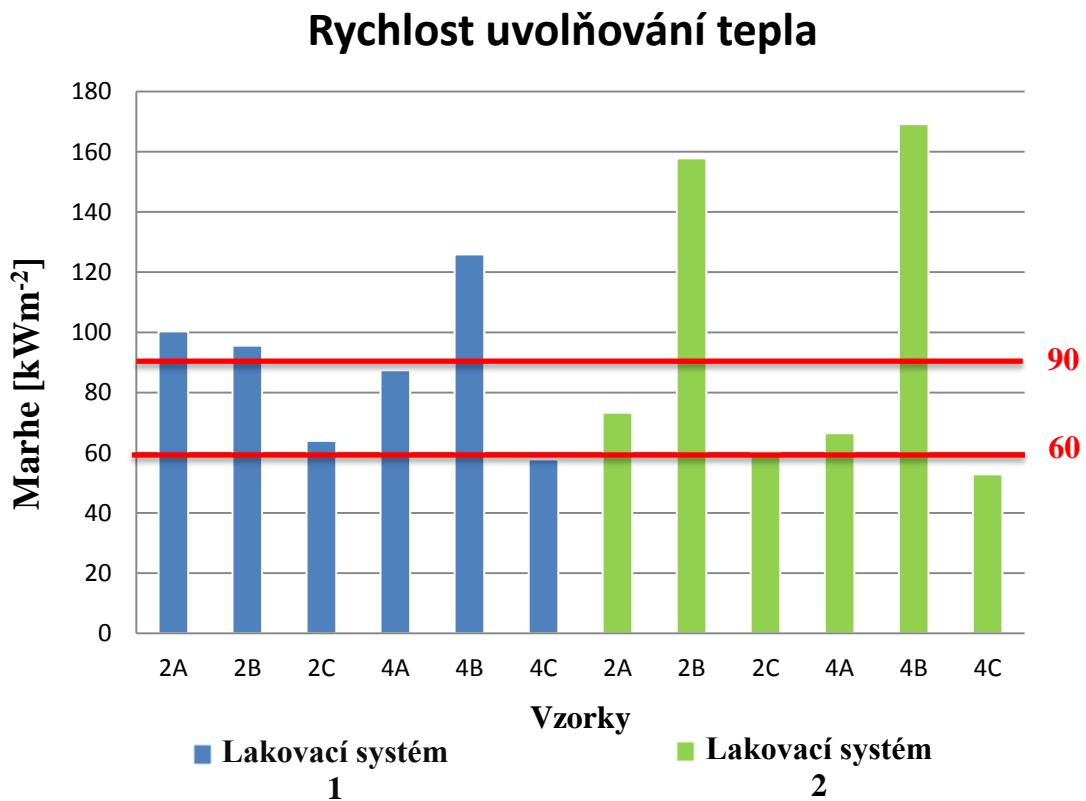


c)

Obr. 78. Rychlost uvolňování tepla (HRR), celkové množství uvolněného tepla (THR) a specifická rychlost tvorby CO ze vzorků a)4A, b)4B, c)4C

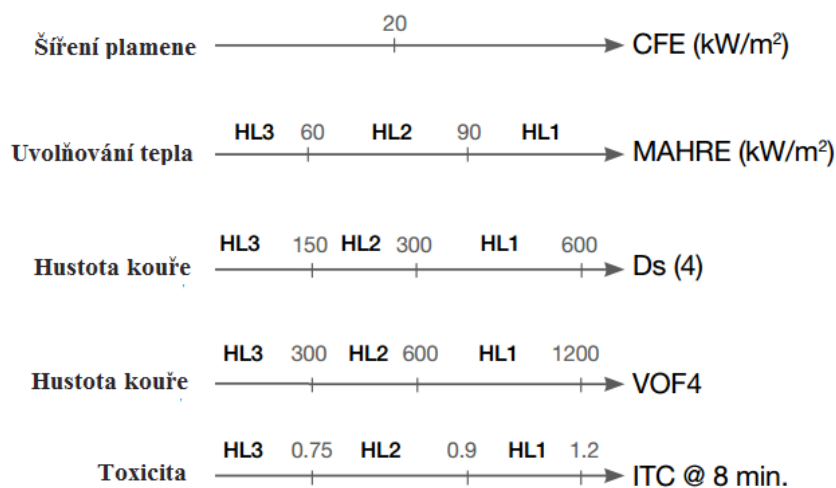
Tab. 22. Výsledky z kónického kalorimetru

Lakovací systém	Vzorek	Čas iniciace (s)	MARHE 20 s od iniciace (kW.m <sup>-2</sup> )	MARHE (kW.m <sup>-2</sup> )
1	2A	13	99,35	100,27
	2B	14	93,56	95,54
	2C	27	59,02	63,94
	4A	20	83,56	87,38
	4B	19	63,83	125,90
	4C	31	51,02	57,74
2	2A	13	67,15	73,29
	2B	15	80,19	157,78
	2C	20	49,73	59,97
	4A	21	55,58	66,45
	4B	20	47,24	169,14
	4C	33	40,61	52,80



Obr. 79. Naměřené hodnoty s vyznačenými mezemi pro skupinu HL2.

Všechny zkoumané vzorky vykázaly do 20 s od začátku zkoušky maximální průměrnou rychlost uvolňování tepla nižší, než  $40 \text{ kW m}^{-2}$ . Během celé doby trvání zkoušky vykázaly hodnotu Marhe nižší, než  $90 \text{ kW m}^{-2}$ , u lakovacího systému 1 pouze vzorky 2C, 4A, 4C a u lakovacího systému Mader to byly vzorky 2A, 2C, 4A a 4C. Získané údaje maximální průměrné rychlosti uvolňování tepla, časové závislosti rychlosti uvolňování tepla, celkového množství uvolněného tepla a specifické rychlosti uvolňování CO závisí od atmosférického tlaku, při kterém byly stanoveny, s narůstající nadmořskou výškou klesá maximální i průměrná rychlost uvolňování tepla. Z charakteru vzorků rovněž vyplývá vysoká citlivost získaných údajů od způsobu jejich uložení do držáku. V případě nedostatečného podložení vzorky minerální vlnou v držáku může během zkoušky dojít k jejímu naklonění a následnému velmi rychlému hoření výplňové části zkoumaných vzorků. Významný vliv na získané údaje má i strana vzorku, ze které je tato během zkoušky zatížena tepelným zářením.



Obr. 80. Všeobecné požadavky pro určení Hazard Level (HL) [33]

Dle výsledků uvedených v Tab. 22. je možné vidět, jak se jednotlivé výsledky zkoušek liší výrazně, což je způsobeno rozdílným materiálovým složením a nehomogenitou materiálů u vzorků. Všechny vzorky byly provedeny podle zkoušky dle normy ČSN EN 45545-2. Jednalo se především o zjištění, zda zkoušené materiály splňují kategorii HL2, musely se pohybovat v rozmezí  $60\text{-}90 \text{ [kWm}^{-2}\text{]}$ . Z důvodu, aby se daly využívat ve většině konstrukčních kategorií.

Vyhodnocovaly jsme u vzorků 2A, 2B, 2C a 4A, 4B, 4C dva lakovací systémy. Zaměřily jsme se na maximální průměrnou rychlost uvolňování tepla označovanou Marhe  $[\text{kWm}^{-2}]$ .

Vzorky s papírovou voštinou 2A a 4A u obou lakovacích systémů dosáhly hodnot pod 90 [kWm<sup>-2</sup>] až na vzorek 2A s lakovacím systémem 1, u kterého byla hodnota 100 [kWm<sup>-2</sup>] a tedy nesplňuje podmínky kategorie HL2. Špatných výsledků dosáhly vzorky s pěnovým jádrem 2B a 4B u obou lakovacích systémů, když po přepálení vnějších vrstev, došlo velmi k rychlému shoření pěnového jádra. Tyto vzorky dosáhly hodnot 95-169 [kWm<sup>-2</sup>] a nesplňují podmínky kategorie HL2. Naopak nejlepších výsledků dosáhly vzorky s hliníkovou voštinou 2C a 4C obou lakovacích systémů. Vzorky 4C vykazovaly nejlepší hodnoty ze všech 52 a 57 [kW m<sup>-2</sup>] a tím dokonce splňují vyšší kategorii HL3.

Lepších výsledků dosáhly vzorky s lakovacím systémem 2, u kterých bylo naměřeno nižších hodnot než u systému 1.

## 6 DISKUZE VÝSLEDKŮ

Pro jádro sendvičové konstrukce byly vybrány hliníkové voštiny, papírové voštiny a pěnové polymerní PET jádro.

U zkoušky 3 – bodového ohybu vyšly nejlépe vzorky C s hliníkovou voštinou. Měly mnohonásobně vyšší hodnoty ze všech testovaných vzorků, jak u meze pevnosti, tak i u modulu pružnosti. Nejlépe dopadl vzorek 3C se 3 vrstvami prepregu z obou stran. U meze pevnosti dosáhl nejvyšší hodnoty a to 29,7 MPa a u modulu pružnosti dosáhl hodnoty 1860 MPa, hodnota byla 26krát vyšší než nejvyšší naměřená hodnota u vzorků s jádrem z pěny a papírové voštiny. Naopak nejhorších výsledků dosáhly vzorky A s papírovou voštinou.

Modifikovaná zkouška ke zjištění síly potřebné k vytržení závitového insertu, u které se hodnotily vzorky s papírovou voštinou s 2x2 vrstvami nebo 4x 4 vrstvami prepregu, byly vyrobeny s vložkami z HPL desky do kterých se pak aplikoval závitový insert, polovina byla s tmelem a druhá bez tmelu. Při tomto měření nás zajímala především síla potřebná k vytržení insertu. Nejlepších výsledků dosáhly vzorky se závitem M8 (M8-2S) a M6 (M6-2S), které měly shodnou sílu 2700N, jednalo se o zkušební tělesa, které měli pouze 2x2 vrstvy prepregu a vložky byly přichyceny tmelem k voštině.

Zkouška odrazivosti navrhnuté konstrukce vzorků A, B, C ukázala, že vzorky nesplňují podmínky normy UIC CODE 844-4 R, protože naměřené hodnoty byly vyšší, než povoluje norma. Kompozit se čtyřmi vrstvami prepregu a vyplněn papírovou voštinou (4A) vykazoval nejlepší výsledky odolnosti proti nárazům. Dalším řešením je změna složení a použití výplně o vyšší pevnosti.

U kónického kalorimetru se jednalo především o zjištění, zda zkoušené materiály splňují kategorii HL2, musely se pohybovat v rozmezí 60-90 [kWm<sup>-2</sup>].

Vzorky s papírovou voštinou 2A a 4A u obou lakovacích systémů dosáhly hodnot pod 90 [kWm<sup>-2</sup>]. Špatných výsledků dosáhly vzorky s pěnovým jádrem 2B a 4B u obou lakovacích systémů, když po přepálení vnějších vrstev, došlo velmi k rychlému shoření pěnového jádra. Tyto vzorky dosáhly hodnot 95-169 [kWm<sup>-2</sup>] a nesplňují podmínky kategorie HL2. Naopak nejlepších výsledků dosáhly vzorky s hliníkovou voštinou 2C a 4C obou lakovacích systémů. Vzorky 4C vykazovaly nejlepší hodnoty ze všech 52 a 57 [kW m<sup>-2</sup>] a tím dokonce splňují vyšší kategorii HL3.

## ZÁVĚR

Diplomová práce se zabývá návrhem vhodných materiálů pro skladbu sendvičové struktury s použitím pro obkladovou aplikaci v železničním průmyslu. Práce je rozdělena na teoretickou a praktickou část. Část teoretická je zaměřena obecně na kompozity, sendvičové struktury, používané materiály a poruchy sendvičových konstrukcí. Praktická část diplomové práce slouží jako podklad pro vývoj nové skladby sendvičové struktury, která by se mohla začít aplikovat v železničním průmyslu.

Porovnávaly se různé typy povrchových a lakovacích systémů. V rámci experimentálního měření byly použity různé materiály. Pro jádro sendvičové konstrukce byly vybrány hliníkové voštiny, papírové voštiny a pěnové polymerní PET jádro a na vnější vrstvy 2 druhy prepregu.

Vycházely jsme z požadavků na pevnost a tuhost, bezpečnost – samozhášivost, odolnosti proti opotřebení, proto vzorky byly otestovány na 3 - bodový ohyb podle normy ČSN EN ISO 178, modifikovaná zkouška ke zjištění síly potřebné k vytržení závitového insertu, zkoušku odrazivosti dle normy UIC CODE 844 – 4 R a podle normy ČSN EN 45545 - 2 požární ochrany drážních vozidel, byla vybrána zkouška Kónický kalorimetr dle normy ISO 5660-1.

U všech zkoušek dosáhly vzorky s pěnovým jádrem nejnižších hodnot a nesplnil ani jeden požadavek norem. Řešením je použít jiný typ pěny, s lepšími mechanickými vlastnostmi nebo upravit počet jednotlivých vrstev prepregu, které můžou být nahrazeny jinými druhy prepregů. Sendvičové struktury s pěnovým jádrem jsou velmi dobře tvarovatelné a jde s nimi vyrábět i velmi složité výrobky.

U vzorků s papírovou voštinou docházelo k proměnlivým výsledkům u všech zkoušek. U zkoušky ohybem dosáhly nejnižších hodnot ze všech zkoušených materiálů. samozhášivosti vzorky vyhovovaly, až na jeden, který měl pouze 2 vrstvy prepregu. U odolnosti proti opotřebení nejlepšího výsledku dosáhl právě vzorek 4A, ani ten však nesplnil požadavky normy. V dalším návrhu je změna voštiny, na jinou s větší hustotou buněk, díky tomu se zvýší pevnost i tuhost.

Nejvyšších a nejlepších hodnot dosáhly vzorky s hliníkovou voštinou. U ohybové zkoušky dosáhly až několikanásobně vyšších hodnot u meze pevnosti a modulu pružnosti, oproti vzorkům s papírovým a pěnovým jádrem. U vyhodnocení z kónického kalorimetru dosáhly

všechny vzorky velmi dobrých výsledků a splňují kategorii HL2. Čtyřvrstvé vzorky splnily i kategorii HL3.

Vhodné kombinace materiálů, které by již splňovali všechny požadavky pro železniční průmysl se musí dále vyvíjet a testovat. Výsledný produkt musí mít dostatečnou pevnost a tuhost, bezpečnost, funkčnost, odolnost proti opotřebení, ale velmi důležitou podmínkou je také nízká hmotnost

## SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] EHRENSTEIN, G. W. *Polymerní kompozitní materiály*. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009, 351 s. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [2] JANČÁŘ, J., *Úvod do materiálového inženýrství polymerních kompozitů*. Vyd. 1. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, 2003. ISBN 8021424435.
- [3] Ducháček V.: *Polymery - výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. 2. vyd. Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, Praha 2006. ISBN 80-7080-617-6
- [4] Best Practice Guide for Sandwich Structures in Marine Applications. In: TRIP - Transport Research & Innovation Portal [online]. [cit. 2015-01-21]. Dostupné z: [http://www.transportresearch.info/Upload/Documents/201302/20130201\\_105501\\_16344\\_RevisedBPGv1-00---Report-Format.pdf](http://www.transportresearch.info/Upload/Documents/201302/20130201_105501_16344_RevisedBPGv1-00---Report-Format.pdf) <
- [5] ŠUBA, O., Vyd. 3. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2010. ISBN 978-807-3189-488.
- [6] *Vývoj konstrukčních materiálů v leteckém průmyslu*, Fs.cvut.cz [online]. [cit. 2016-03-11]. Kompozitní materiály. Dostupné z: <http://users.fs.cvut.cz/libor.benes/vyuka/matlet/OLR-Uvod.pdf> <
- [7] *Ateam.zcu.cz* [online]. [cit. 2016-03-11]. Kompozitní materiály. Dostupné z: [http://www.ateam.zcu.cz/download/kompozity09\\_10.pdf](http://www.ateam.zcu.cz/download/kompozity09_10.pdf) <
- [8] KOŘÍNEK, Z.: *Volny.cz. Kompozity* [online]. 2010 [cit. 2016-10-03]. Dostupné z: <http://mujweb.cz/zkorinek/technologie.pdf> <
- [9] PTÁČEK, L. *Nauka o materiálu II*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 1999. ISBN 80-7204-130-4.
- [10] RUSNÁKOVÁ, S., *Zpracovatelské inženýrství kompozitů. Přednášky 2012*
- [11] VLÓD, A. *Glare – History of the development of a new aircraft material*. Kluwer academic publishers. 2001. 65 s. ISBN 0-306-48398-X
- [12] *Mmspektrum.com* [online]. [cit. 2016-01-04]. *Sendvičové konstrukce*. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/sendvicove-konstrukce.html> <



- [13] *Hliníková plošina pro vozíčkáře* [online]. [cit. 2016-03-16]. Dostupné z: <  
<http://www.5m.cz/cz/hlinikove-panely/>>
- [14] MIRACLE, D. B. a S. L. Donaldson. *ASM Handbook: Volume 21 – Composites*. Ohio: ASM International, 2001. 1201 s. ISBN 0-87170-703-9
- [15] FABRIGER, D., *Technologie výroby sendvičových kompozitních struktur Vakuovou infuzí pod pružnou folií*. 2011. 124 s. Diplomová práce.
- [16] *Gurit.com* [online]. [cit. 2016-04-18]. *Guide to Composites*. Dostupné z: <  
<http://www.gurit.com/guide-to-composites.aspx> >
- [17] CRIPPS, D, O'CONNELL, NOONAN a ORME. SP SYSTEMS. *Composite Materials Handbook* [online]. Newport: SP Systems, ©1998 [cit. 2016-03-19]. Dostupné z: <  
<https://www.bolton.ac.uk/CODATE/SPHandbook.pdf>>
- [18] *Netcomposites.com* [online]. [cit. 2013-01-14]. Honeycomb Cores. Dostupné z: <  
<http://www.netcomposites.com/guide/honeycomb-cores/46> >
- [19] DYMÁČEK, P.; KLEMENT, J. *Vlákno-kovové lamináty na bázi ocel-uhlik/epoxy*. Letecký zpravodaj, 2000, č. 3, 120s. ISBN: 0 -12110 – 87 - 9.
- [20] *Monitoring nosné konstrukce* [online]. [cit. 2016-02-18]. *Letecký týdeník*. Dostupné z: <  
[www.vzlu.cz/cs/transfer-19-2013-s731.pdf](http://www.vzlu.cz/cs/transfer-19-2013-s731.pdf) >
- [21] *Self-healing* [online]. [cit. 2016-03-18]. *Letecký týdeník*. Dostupné z: <  
<http://2012.flyin.cz/wwwFrontend/files/pdf/FLYIN> >
- [22] *Celokompozitní letoun VL-3* [online]. [cit. 2016-03-15]. *Letecký týdeník*. Dostupné z: <  
<http://vztlak.net/Profily-a-testy/Letouny/VL-3-Nejrychlejsi-ULL> >
- [23] *Kompozitní trup letounu ATEC 321 FAETA* [online]. [cit. 2016-03-15]. *Letecký týdeník*. Dostupné z: <  
<http://www.atecaircraft.eu/letadla/faeta/technicka-data/> >
- [24] *WC od firmy STX* [online]. [cit. 2016-04-15]. *Vlakový průmysl*. Dostupné z: <  
<http://www.railway-technology.com/contractors/passenger/stx-cabins/>>
- [25] *Kabina DE-Light Transport* [online]. [cit. 2016-04-18]. Dostupné z: <  
<http://www.ncl.ac.uk/newrail/assets/docs/DE-LIGHTBrochurev1-2-12Pages.pdf> >

- [26] *Inrektor* [online]. [cit. 2016-04-10]. Dostupné z WWW: <<http://auto.idnes.cz/prevratna-novinka-pro-staveni-aut-zahubi-plechy-a-svarecky-pox-/>>
- [27] *Boeing 747* [online]. [cit. 2016-04-11]. Dostupné z: <<http://users.fs.cvut.cz/libor.benes/vyuka/matlet/OLR-Uvod.pdf>>
- [28] *Okenní rám* [online]. [cit. 2016-04-14]. Dostupné z: <<https://www.divaportal.org/smash/get/diva2:416836/FULLTEXT01.pdf>>
- [29] *Uhlíkové vlákno* [online]. [cit. 2016-04-14]. Dostupné z: <<http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=11061>>
- [30] *Pevnost a tuhost vláken* [online]. [cit. 2016-04-14]. Dostupné z: <[http://umi.fs.cvut.cz/wp-content/uploads/2014/08/6\\_kompozitni-materialy.pdf](http://umi.fs.cvut.cz/wp-content/uploads/2014/08/6_kompozitni-materialy.pdf)>
- [31] ČSN EN ISO 178. *Vlákný vyztužené plastové kompozity – Stanovení ohybových vlastností*. Praha: Český normalizační ústav, 2003
- [32] ČSN EN ISO 527-4. *Vlákný vyztužené plastové kompozity – Stanovení tahových vlastností*. Praha: Český normalizační ústav, 1998
- [33] Interní dokumentace firmy FORM s.r.o.

**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

a	Tloušťka zkušebního tělesa.
AF	Aramidové vlákna (Aramid Fiber).
$A_b$	Celková energie
b	Šířka zkušebního vzorku.
CMC	Ceramic matrix composite.
$\text{kWm}^{-2}$	Kilowatt na metr čtvereční.
CF	Uhlíkové vlákno.
ČSN	Česká technická norma.
E	Modul pružnosti v ohybu.
EN	Evropské normy.
ISO	Mezinárodní organizace pro standardizaci.
$\sigma_m$	Mez pevnosti v ohybu.
$\varepsilon$	Poměrná deformace.
F	Síla.
$F_{\max}$	Maximální rázová síla.
$F_p$	Rázová síla při průrazu.
$\bar{x}$	Aritmetický průměr.
s	Směrodatná odchylka.
v	Variační koeficient.
GF	Skelné vlákno (Glass Fiber).
GFRP	Polymerem tvrzené skelné vlákno.
h	Tloušťka tělesa.
L	Vzdálenost podpěr při ohybu.
$\Delta l$	Deformace.
MMC	Metal Matrix Composite.

---

n	Počet měření.
PMC	Polymer Matrix Composite.
UP	Polyesterové pryskyřice.
VE	Vinylesterové pryskyřice.
G	Modul pružnosti ve smyku.
$E_{ef}$	Efektivní modul pružnosti.
HL	Hazard level.
$F_{O_{max}}$	Maximální ohybová síla.
y	Průhyb.
$M_o$	Ohybový moment.
CMC	Ceramic matrix composite.
PEI	Polyetherimid.
PP	Polypropylen.
PS	Polystyren.
PVC	Polyvinylchlorid.
PUR	Polyuretan.

## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1. Schéma rozdělení kompozitních materiálů. [8] .....	12
Obr. 2. Znárodnění pevností a tuhostí vláken [30] .....	14
Obr. 3. A - Sendvičový panel, B - vnější vrstvy, C – jádro [10] .....	17
Obr. 4. Prepregová sendvičová konstrukce. [1].....	18
Obr. 5. Hliníková plošina (jádro – hliníková voština) pro.....	19
Obr. 6. a) aramidová voština, b) voština z PP, c) hliníková voština [15] .....	20
Obr. 7. Pěny [10].....	21
Obr. 8. a) Honeycomb, b) pěna s otevřenými buňkami, c) pěna s.....	21
Obr. 9. Příklady poruch sendvičových konstrukcí. [4] .....	23
Obr. 10. Složení Boeingu 787[27] .....	25
Obr. 11. Křídlo větroně TST-14M. [20] .....	25
Obr. 12. Rotorová lopatka pro pohonnou jednotku. [22].....	26
Obr. 13. Celokompozitní letoun VL-3. [22] .....	26
Obr. 14. Toaleta od firmy STX. [24] .....	27
Obr. 15. Kabina De-Light Transport. [25].....	28
Obr. 16. Korejský vlak TTX. [28] .....	28
Obr. 17. Návrh okenního rámu.[29] .....	29
Obr. 18. Inrektor [26].....	29
Obr. 19. Nanotrubičky [20].....	30
Obr. 20. Monitoring nosné konstrukce ke snížení provozních nákladů. [20].....	31
Obr. 21. Self-healing [20] .....	32
Obr. 22. Složení vzorku 2A - 1,2,4,5 prepreg 1; 3 Papírová voština.....	36
Obr. 23. Složení vzorku 3A - 1,2,3,5,6,7 prepreg 1; 4 papírová voština .....	36
Obr. 24. Složení vzorku 4A - 1,2,3,4,6,7,8,9 prepreg 1; 5 papírová voština .....	36
Obr. 25. Složení vzorku 2B - 1,2,4,5 prepreg 1; 3 pěna .....	37
Obr. 26. Složení vzorku 3B - 1,2,3,5,6,7 prepreg 1; 4 pěna .....	37
Obr. 27. Složení vzorku 4B - 1,2,3,4,6,7,8,9 prepreg 1; 5 pěna .....	37
Obr. 28. Složení vzorku 2C - 1,5 prepreg 1; 3 Hliníková voština; 2,4 prepreg 2.....	38
Obr. 29. Složení vzorku 3C - 1,2,6,7 prepreg 1; 4 Hliníková voština; 3,5 prepreg 2.....	38
Obr. 30. Složení vzorku 4C - 1,2,3,7,8,9 prepreg 1; 5 Hliníková voština; 4,6 prepreg 2.....	38
Obr. 31.HPL deska.....	39

Obr. 32. Závitový insert Ensats®-SD 303. [35].....	40
Obr. 33. Rozměření vzorků a vyříznutí otvorů pro vložky.....	41
Obr. 34. 4 vrstvy prepregu a následné aplikování voštin na prepregy.....	41
Obr. 35. Očistěné vložky lihem.....	42
Obr. 36. Použitý tmel a aplikované vložky 40 x 40 mm, s tmelem a bez tmelu.....	42
Obr. 37. Aplikované vložky 20 x 20 mm, s tmelem a bez tmelu.....	43
Obr. 38. a) vrchní vrstvy prepregu, b) separační folie, c) netkaná textilie.....	43
Obr. 39. a) vakuová folie, b) vytvoření vakua, c) měřicí přístroj.....	44
Obr. 40. Pohled do otevřené pece.....	44
Obr. 41. Pila a nařezané vzorky.....	45
Obr. 42. Rozměření os otvorů a vyvrtaný otvor 8 mm.....	45
Obr. 43. Tříbodový ohyb [31].....	47
Obr. 44. Zkušební těleso typ 1B [32].....	48
Obr. 45. Zkušební těleso typ 3 [32].....	49
Obr. 46. Ocelový rám dle normy UIC 844-4R [33].....	51
Obr. 47. Schéma přístroje pro metodu kónického kalorimetru [30].....	52
Obr. 48. Všeobecné požadavky pro určení Hazard Level (HL) [33].....	54
Obr. 49. Trhací stroj Zwick 1456.....	57
Obr. 50. Graf zkušební vzorku 2A.....	58
Obr. 51. Graf vzorku 3A.....	59
Obr. 52. Graf vzorku 4A.....	59
Obr. 53. Graf vzorku 2B.....	60
Obr. 54. Graf vzorku 3B.....	60
Obr. 55. Graf vzorku 4B.....	61
Obr. 56. Graf vzorku 2C.....	62
Obr. 57. Graf vzorku 3C.....	63
Obr. 58. Graf vzorku 4C.....	64
Obr. 59. Vyhodnocení modulu pružnosti při ohybové zkoušce vzorků A.....	64
Obr. 60. Vyhodnocení modulu pružnosti při ohybové zkoušce vzorků B.....	65
Obr. 61. Vyhodnocení modulu pružnosti při ohybové zkoušce vzorků C.....	65
Obr. 62. Vyhodnocení meze pevnosti vzorků A při ohybové zkoušce.....	66
Obr. 63. Vyhodnocení meze pevnosti vzorků B při ohybové zkoušce.....	66
Obr. 64. Vyhodnocení meze pevnosti vzorků C při ohybové zkoušce.....	67

Obr. 65. Graf vzorku M8-4S.....	68
Obr. 66. Graf vzorku M8-2S.....	69
Obr. 67. Graf vzorku M8-2B .....	70
Obr. 68. Graf vzorku M6-4S.....	70
Obr. 69. Graf vzorku M6-4B .....	71
Obr. 70. Graf vzorku M6-2S.....	72
Obr. 71. Vyhodnocení síly potřebné k vytržení.....	72
Obr. 72. Průměr kuličky .....	74
Obr. 73. a) výška 2m pro pád kuličky, b) ocelový rám, c) kopírovací papír .....	74
Obr. 74. a) otisk kuličky, b) měření průměru otisku.....	75
Obr. 75. Rychlost uvolňování tepla (HRR), celkové množství uvolněného tepla (THR) a specifická rychlost tvorby CO ze vzorků a)2A, b)2B, c)2C .....	78
Obr. 76. Rychlost uvolňování tepla (HRR), celkové množství uvolněného tepla (THR) a specifická rychlost tvorby CO ze vzorků a)4A, b)4B, c)4C .....	79
Obr. 77. Rychlost uvolňování tepla (HRR), celkové množství uvolněného tepla (THR) a specifická rychlost tvorby CO ze vzorků a)2A, b)2B, c)2C .....	80
Obr. 78. Rychlost uvolňování tepla (HRR), celkové množství uvolněného tepla (THR) a specifická rychlost tvorby CO ze vzorků a)4A, b)4B, c)4C .....	81
Obr. 79. Naměřené hodnoty s vyznačenými mezemi pro skupinu HL2 .....	82
Obr. 80. Všeobecné požadavky pro určení Hazard Level (HL) [33].....	83

**SEZNAM TABULEK**

Tab. 1. Vybrané vlastnosti pěn. ....	22
Tab. 2. Vybrané inserty [35] .....	40
Tab. 3. Tabulka testů [33] .....	53
Tab. 4. Konstrukční kategorie [33] .....	55
Tab. 5. Výsledky pro zkušební vzorek 2A.....	58
Tab. 6. Výsledky vzorku 3A .....	58
Tab. 7. Výsledky pro zkušební vzorek 4A.....	59
Tab. 8. Výsledky vzorku 2B .....	59
Tab. 9. Výsledky vzorku 3B .....	60
Tab. 10. Výsledky vzorku 4B .....	61
Tab. 11. Výsledky vzorku 2C .....	61
Tab. 12. Výsledky vzorku 3C .....	62
Tab. 13. Výsledky vzorku 4C .....	63
Tab. 14. Naměřené výsledky z trhačky pro vzorek M8-4S .....	68
Tab. 15. Naměřené výsledky z trhačky pro vzorek M8-2S .....	69
Tab. 16. Naměřené výsledky z trhačky pro vzorek M8-2B.....	69
Tab. 17. Naměřené výsledky z trhačky pro vzorek M6-4S .....	70
Tab. 18. Naměřené výsledky z trhačky pro vzorek M6-4B.....	71
Tab. 19. Naměřené výsledky z trhačky pro vzorek M6-2S .....	71
Tab. 20. Podmínky testování .....	73
Tab. 21. Výsledky odolnosti proti nárazu.....	75
Tab. 22. Výsledky z kónického kalorimetru.....	82



## SEZNAM PŘÍLOH

PŘÍLOHA PI Materiálový list hliníkového voštinového jádra.

PŘÍLOHA PII Materiálový list pěnového jádra.

# PŘÍLOHA PI MATERIÁLOVÝ LIST HLINÍKOVÉHO VOŠTINOVÉHO JÁDRA



EURO-COMPOSITES®

Aluminiumwaben

Technisches Datenblatt für alle Wabentypen

**Material:** Alu-Alloy 3003 (AlMnCu)

**Korrosionsschutz:** Zirkoxidbeschichtet

Mechanische Eigenschaften	Einheit	Testmethode	Typische Werte für Aluwaben							
			ECM 3.2-128	ECM 4.8-77	ECM 6.4-68	ECM 8.0-62	ECM 9.6-57	ECM 11.2-52	ECM 12.8-47	ECM 14.4-42
Folienstärke, Nominal	µm	ECF 221-04	60	60	60	80	60	80	80	80
Zellgröße, Nominal	mm	DIN 20470	3.2	4.8	6.4	8.0	9.6	9.6	12.7	16.2
Raumgewicht, Nominal	kg/m <sup>3</sup>	DIN 20470	130	77	60	82	41	55	42	29
Druckfestigkeit Unstabilität	N/mm <sup>2</sup>	DIN 52291	7.00	3.94	2.90	4.25	1.73	2.24	1.00	0.69
Druckfestigkeit Stabilität	N/mm <sup>2</sup>	DIN 52291	-	-	3.55	4.50	-	2.75	-	-
Querschubfestigkeit (Crush Strength)	N/mm <sup>2</sup>	ASTM D149-01**	3.390	1.679	-	1.965	0.874	0.891	-	0.203
L-Schubfestigkeit	N/mm <sup>2</sup>	DIN 52294	4.00	2.29	1.72	2.40	1.13	1.48	1.00	0.60
L-Schubmodul	N/mm <sup>2</sup>	DIN 52294	550	450	370	430	227	253	193	201
W-Schubfestigkeit	N/mm <sup>2</sup>	DIN 52294	2.50	1.32	0.93	1.40	0.80	0.88	0.46	0.32
W-Schubmodul	N/mm <sup>2</sup>	DIN 52294	350	265	160	220	98	170	87	54
Service-temperatur	°C	-	-55°C bis +177°C							

**Mikroperforiert** Alle ECM-Wabentypen können, wenn gewünscht, auch mikro-perforiert geliefert werden.

**Wabe** Aluminium-Wabentypen: ECM-P

\*- Teilscheibendicke: 13.87mm

\*\*- Teilscheibendicke: 25.40mm

# PŘÍLOHA PII MATERIÁLOVÉ LISTY PĚNOVÉHO JÁDRA

**AIREX**BALTEK**BANOVA**

## DATA SHEET

03.2015 (replaces 02.2012)

### AIREX<sup>®</sup> T90

#### The Fire Resistant Structural Foam

##### CHARACTERISTIC

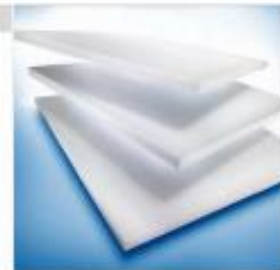
- Superior fire resistance (FAR 25.853; NF 16-101; DIN 5510)
- Outstanding fatigue strength
- Excellent long term thermal stability up to 100 °C (212 °F)
- Best thermal stability in process up to 150 °C (302 °F)
- Good thermal insulation
- Highly consistent material properties
- Easy to process with all types of resin and lamination processes
- Good adhesion (skin-to-core bond)
- Very high chemical stability
- No water absorption, no after-expansion, no outgassing

##### APPLICATIONS

- **Road and Rail**  
Floors, sidewalls, front ends, interiors, roofs, engine covers
- **Marine**  
Decks, interiors, superstructures
- **Industrial**  
Covers, containers, x-ray tables, sporting goods
- **Architecture and Construction**  
Roofs, claddings, domes, portable building

##### PROCESSING

- Contact molding (hand/spray)
- Vacuum infusion
- Resin infusion / injection (VARTM / RTM)
- Adhesive bonding
- Pre-preg processing
- Compression molding (GMT, SMC)
- Thermoforming



AIREX<sup>®</sup> T90 is a closed-cell, thermoplastic and recyclable polymer foam with excellent fire, smoke & toxicity (FST) properties.

It has very good mechanical properties and an extraordinary resistance to fatigue, is chemically stable, UV-resistant and has negligible water absorption.

It is thermally stable during high temperature processing and post curing. T90 is designed for easy use with all resin systems and processing technologies.

AIREX<sup>®</sup> T90 is the ideal core material for structural sandwich applications requiring high fire resistance.

# AIREX BALTEK BANOVA

Typical properties for AIREX <sup>®</sup> T90		Unit (metric)	Value <sup>1)</sup>	T90.60	T90.100	T90.150	T90.210
Density	ISO 845	kg/m <sup>3</sup>	Average Typ. range	65 60 - 70	110 105 - 115	145 140 - 150	210 200 - 220
Compressive strength perpendicular to the plane	ISO 844	N/mm <sup>2</sup>	Average Minimum	0.80 0.7	1.4 1.2	2.2 2.0	3.5 3.2
Compressive modulus perpendicular to the plane	DIN 53421	N/mm <sup>2</sup>	Average Minimum	50 35	85 75	115 100	170 145
Tensile strength perpendicular to the plane	ASTM C297	N/mm <sup>2</sup>	Average Minimum	1.5 1.2	2.2 1.6	2.7 2.2	3.0 2.4
Tensile modulus perpendicular to the plane	ASTM C297	N/mm <sup>2</sup>	Average Minimum	85 70	120 90	170 140	225 180
Shear strength	ISO 1922	N/mm <sup>2</sup>	Average Minimum	0.46 0.4	0.8 0.7	1.2 1.1	1.85 1.5
Shear modulus	ISO 1922	N/mm <sup>2</sup>	Average Minimum	12 10.5	20 18	30 28	50 44
Shear elongation at break	ISO 1922	%	Average Minimum	12 8	10 5	8 4	5 3
Thermal conductivity at room temperature	ISO 8301	W/m.K	Average	0.033	0.033	0.036	0.041
Standard sheet	Width <sup>2)</sup>	mm ± 5		610	610	610	610
	Length <sup>2)</sup>	mm ± 5		1220	1220	1220	1220
	Thickness	mm ± 0.5		5 to 100	5 to 100	5 to 100	5 to 100

Finishing Options, other dimensions and closer tolerances upon request

<sup>1)</sup> Minimum values acc. DNV definition; test sample thickness 20 mm, except compressive modulus (40 mm)

<sup>2)</sup> Alternative width 1220 mm, alternative length 2440 mm

Fire performance	Standard		T90.60	T90.100	T90.150	T90.210
Aircraft	FAR 25.853/ABD0031	Flammability	passed	passed	passed	passed
	FAR 25.853/ABD0031	Smoke density	passed	passed	passed	passed
	FAR 25.853/ABD0031	Toxicity	passed	passed	passed	passed
Rail	DIN 5510/2	Flammability	S4	S4	S4	S4
	DIN 5510/2	Smoke density	SR2	SR2	SR2	SR2
	DIN 5510/2	Dripping	ST2	ST2	ST2	ST2
	DIN 5510/2 / DIN 53438-2	Edge flaming	K1	K1	K1	
	DIN 5510/2	Toxicity (FED)	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
Rail	NF F16-101	Flammability	M2	M1	M1	M1
	NF F16-101	Smoke density	F1	F1	F1	F1
Rail	EN 45545-2		HL3 achievable; Certification depending on sandwich design			
Building & Construction	DIN 4102-1	Material Class	tbd	B1	tbd	B1
Building & Construction	EN 13501-1	Fire reaction behaviour	tbd	C	tbd	C
	EN 13501-1	Smoke production	tbd	s2	tbd	s2
	EN 13501-1	Flaming droplets	tbd	d0	tbd	d0