

Návrh skladby sendvičového kompozitního materiálu pro dopravní a stavební aplikace

Lukáš Staněk

Bakalářská práce
2013



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická
Ústav výrobního inženýrství
akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Lukáš STANĚK**
Osobní číslo: **T10282**
Studijní program: **B3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Technologická zařízení**
Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Návrh skladby sendvičového kompozitního materiálu pro dopravní a stavební aplikace**

Zásady pro vypracování:

I. Teoretická část

1. Rozdělení polymerních kompozitních materiálů (částicové, vláknové, vícevrstevové), definice jednotlivých složek, význam matrice a výtzuže.
2. Vícevrstevové kompozitní materiály – lamináty, hybridní lamináty, sendviče.
3. Přehled jádrových materiálů, jejich způsoby výroby a vzájemné porovnání.
4. Způsoby výroby sendvičových kompozitních materiálů.

II. Experimentální část

1. Návrh sendvičových systémů pro dopravní a stavební aplikace (tloušťka, hustota, zpracovatelské podmínky).
2. Výroba zkušebních vzorků pomocí navrhnutých technologií (popište zpracovatelské podmínky – teploty, čas, doba vytvrzování, atd.)
3. Mechanické testování navrhnutých kompozitních sendvičových struktur dle zvolených testovacích metod.
4. Porovnání dosáhnutých výsledků a návrh praktických aplikací v průmyslu (dopravní, stavební, atd.).
5. Shrnutí dosáhnutých výsledků.

Rozsah bakalářské práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

[1] Ehrenstein, G. W.: Polymerní kompozitní materiály. Vyd. 1. 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. 193 s.

[3] Zenkert, D.: The Handbook of Sandwich Construction, EMAS Publishing, Nordic Industrial Fund, Worcestershire, 1997.

[4] Bareš, R. A.: Kompozitní materiály. SNTL Praha, 325 s, 1988.

[5] Elektronické zdroje dle doporučení vedoucího práce.

Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Soňa Rusnáková, Ph.D.**
Ústav výrobního inženýrství

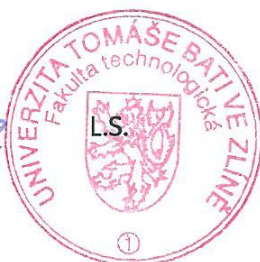
Datum zadání bakalářské práce: **8. února 2013**

Termín odevzdání bakalářské práce: **17. května 2013**

Ve Zlíně dne 11. února 2013



doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.
děkan



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

Příjmení a jméno: ŠTAVĚJ LUBÁŠ

Obor: TECHNOLOGICKÁ ZAŘÍZENÍ

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby¹⁾;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3²⁾;
- beru na vědomí, že podle § 60³⁾ odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60³⁾ odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Ve Zlíně 17.5.2013



.....

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

(1) Vysoká škola 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.*

²⁾ *zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 35 odst. 3:*

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

³⁾ *zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 60 Školní dílo:*

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

(2) *Není-li sjednáno jinak, může autor školního díla své dílo 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

Cílem této bakalářské práce je navrhnout vhodnou sendvičovou konstrukci, která by se mohla uplatnit v dopravním a stavebním průmyslu.

Součástí této práce jsou teoretická a praktická část. V teoretické části jsou definovány kompozitní materiály, matrice a výztuž. Dále se tato část zabývá sendvičovými kompozitními materiály, druhy sendvičových jader, atd. V poslední řadě jsou zde popsány výrobní technologie. Praktická část se zabývá výrobou a testováním zkušebních vzorků.

Klíčová slova: kompozitní materiál, sendvič, prepreg, voština, třibodový ohyb, odlup, rázová zkouška

ABSTRACT

The aim of this bachelor thesis is design a suitable sandwich construction, which could be used in transport and building industry.

The parts of this thesis are theoretical and practical part. In the theoretical part there are defined composite materials, matrix and reinforcement. Further this part deals with sandwich composite materials, kinds of sandwich cores etc. In the last row there are described production technologies. The practical part deals with production and testing of test samples.

Keywords: composite material, sandwich, prepreg, honeycomb, three-point bending test, peel test, impact test.

Rád bych zde touto cestou chtěl poděkovat své vedoucí paní doc. Ing. Soně Rusnákové, Ph.D. za ochotu, vstřícnost, připomínky, odborné rady a čas, který mně věnovala při vypracování této bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat panu Ing. Vladimírovi Rusnákovi a společnosti Form s. r. o. za umožnění výroby vzorků. V neposlední řadě chci poděkovat panu Ing. Milanu Žaludkovi, Ph.D. za pomoc při testování vzorků, cenné informace a zkušenosti. Můj poslední dík patří mé rodině, která mě podporovala po celou dobu mého studia.

Nemůžete nikoho nic naučit. Můžete mu nanejvýš pomoci, aby to sám v sobě našel.

Galileo Galilei

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

OBSAH

ÚVOD	10
I TEORETICKÁ ČÁST	11
1 DEFINICE KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ	12
1.1 SOUČASNÉ POŽADAVKY NA KOMPOZITNÍ MATERIÁLY	13
1.2 SYNERGICKÝ EFEKT.....	13
1.3 ROZDĚLENÍ KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ.....	14
1.4 MATRICE	15
1.5 VÝZTUŽ.....	15
1.5.1 Vlákna	16
1.5.2 Druhy vazeb	17
2 SENDVIČOVÉ KONSTRUKCE	19
2.1 VLASTNOSTI SENDVIČOVÝCH KONSTRUKCÍ	19
2.2 TUHOST A PEVNOST V OHYBU.....	20
2.3 TEPelná ODOLNOST A ODOLNOST PROTI OHNI	21
2.4 VNĚJŠÍ VRSTVY SENDVIČOVÝCH KONSTRUKCÍ.....	21
2.4.1 Potahy.....	21
2.4.2 Prepregy.....	22
2.5 DRUHY SENDVIČOVÝCH JADER.....	22
2.5.1 Dřevo.....	22
2.5.2 Voštiny	24
2.5.3 Polymerní pěny.....	29
2.6 APLIKACE SENDVIČOVÝCH KONSTRUKCÍ	31
3 TECHNOLOGIE VÝROBY KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ	34
3.1 RUČNÍ KLADENÍ (HAND LAY-UP).....	34
3.2 NANÁŠENÍ SPRAYEM (SPRAY LAY-UP)	35
3.3 LISOVÁNÍ SE VSTŘIKEM - RTM (RESIN TRANSFER MOULDING).....	36
3.4 VAKUOVÁ INFÚZE POD PRUŽNOU FÓLIÍ (VACUUM FOIL INFUSION)	37
3.5 PULTRUZE (PULTRUSION)	38
3.6 LISOVÁNÍ PREPREGŮ POMOCÍ VAKUA (PREPREG TECHNOLOGY).....	39
3.7 LISOVÁNÍ V AUTOKLÁVU	40
II PRAKTICKÁ ČÁST	42
4 CÍLE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE	43
5 POUŽITÉ MATERIÁLY	44

5.1	HLINÍKOVÁ VOŠTINA ECM 6.4-82.....	44
5.2	FENOLICKÉ PREPREGY	44
5.2.1	Prepreg PHG840N-F300-47.....	44
5.2.2	Prepreg PHG840N-G123-40.....	45
5.3	EPOXIDOVÝ PREPREG TV 45 EMT 125 PLUS	46
5.4	VYSOKOTLAKÝ LAMINÁT HPL	46
5.5	POMOCNÉ KOMPONENTY	47
6	VÝROBA VZORKŮ	48
6.1	POSTUP VÝROBY.....	48
6.1.1	Vzorek č. 1	51
6.1.2	Vzorek č. 2	51
6.1.3	Vzorek č. 3	52
6.1.4	Vzorek č. 4	52
6.1.5	Vzorek č. 5	53
6.1.6	Vzorek č. 6	54
6.1.7	Vzorek č. 7	54
6.2	VYTVRZOVÁNÍ VZORKŮ	55
6.3	PŘÍPRAVA VZORKŮ.....	56
7	TESTOVÁNÍ VZORKŮ	57
7.1	ZKOUŠKA TŘÍBODOVÝM OHYBEM.....	58
7.1.1	Naměřené výsledky při zkoušce tříbodovým ohybem.....	58
7.2	ZKOUŠKA ODLUPEM	62
7.2.1	Naměřené výsledky při zkoušce odlupem.....	62
7.3	RÁZOVÁ ZKOUŠKA	66
7.3.1	Naměřené výsledky při rázové zkoušce	67
	DISKUZE VÝSLEDKŮ	69
	ZÁVĚR	73
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	74
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	77
	SEZNAM OBRÁZKŮ	79
	SEZNAM TABULEK.....	82
	SEZNAM PŘÍLOH.....	83

ÚVOD

Historicky byl okolo roku 1820 představen koncept spojení dvou vrstev různých materiálů se vzdáleností mezi nimi, sendvičovým jádrem, kdy na tuto myšlenku přišel Francouz Duleau. Sendvičové konstrukce se zejména začaly používat za II. světové války. Za války byly v Anglii u letounů „de Havilland Mosquito“ použity sendviče, hlavně kvůli nedostatku jiných materiálů. Povrchové vrstvy byly vyrobeny z dýhy a jádro z balzového dřeva. Během II. světové války byly objeveny první teoretické poznatky o sendvičích. V 50. letech se výroba zaměřila na voštinové materiály. Voštinové jádro se hlavně využívalo jako základní materiál v leteckém průmyslu. Nicméně existovala zde určitá omezení, například velké problémy s korozí. Na konci 50. a během 60. let se výroba soustředila na pěnové hmoty, nikoliv na voštinové materiály. Zpočátku ve výrobě byly používány spíše měkké materiály díky jejich izolačním vlastnostem, například polystyren a polyuretan. Později bylo možné produkovat tvrdší pěnové hmoty s vyšší hustotou a od té doby sendvičové konstrukce patří mezi užitečná a flexibilní řešení.

V dnešní době sendvičové konstrukce nacházejí velmi vysoké uplatnění v dopravním a leteckém průmyslu. Tyto speciální typy kompozitních materiálů lze taky najít i v mnoha dalších odvětvích průmyslu, jako je například stavebnictví, kosmický, lodní a vojenský průmysl. Sendviče lze také aplikovat do oblasti sportu. Využívá se hlavně jejich vysoké tuhosti při velmi nízké hmotnosti.

Tato bakalářská práce se ze začátku v teoretické části věnuje přiblížení čtenáři, co je to vlastně kompozitní materiál. Následně je už práce zaměřena na samotné sendvičové konstrukce, kde se popisují jejich výhody, různé aplikace a druhy materiálů, které lze použít při výrobě sendvičových konstrukcí. Také je zde věnována určitá pozornost různým zpracovatelským technologiím.

V praktické části je uveden přehled použitých materiálů, samotná výroba a testování vzorků. V závěru jsou naměřené výsledky porovnávány a diskutovány.

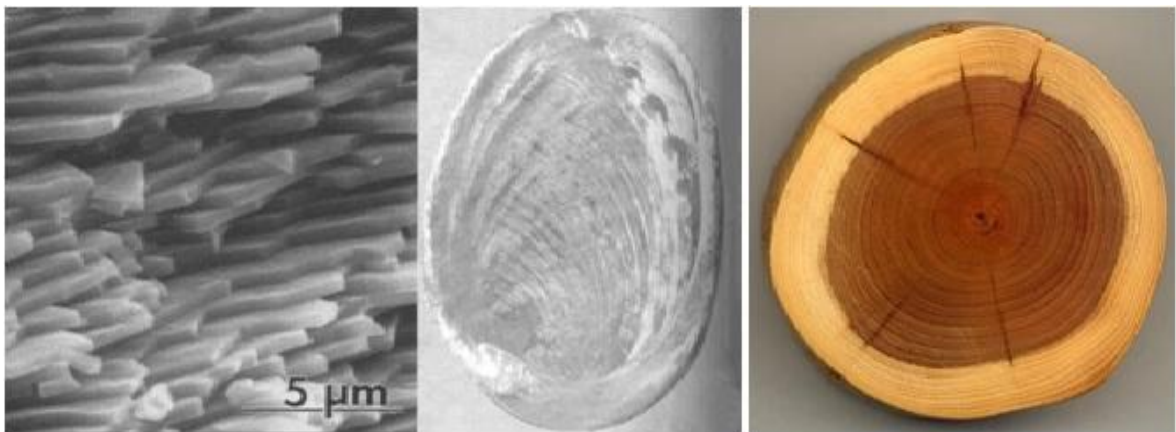
I. TEORETICKÁ ČÁST

1 DEFINICE KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ

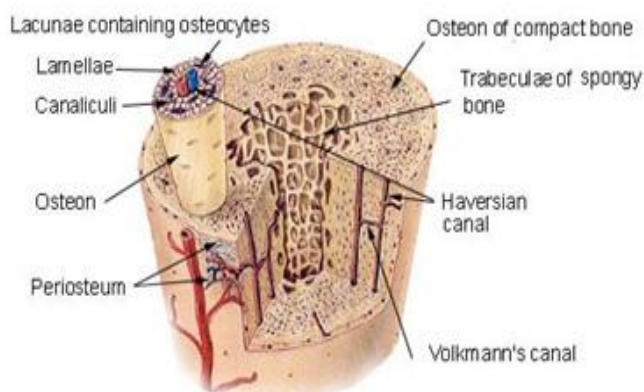
Pod pojmem kompozitní materiály rozumíme heterogenní materiály, složené ze dvou nebo více fází, které se vzájemně výrazně liší svými mechanickými, fyzikálními a chemickými vlastnostmi. Pro kompozitní materiály je dále charakteristické, že se vyrábějí mechanickým mísením jednotlivých složek. Tím se liší například od slitin, které jsou rovněž heterogenní. [1]

Proč kompozitní materiály?

Mnoho nových technologií, či konstrukcí žádá kombinaci vlastností, které nelze u konvenčních materiálů (kovů, keramik, polymerů) docílit. Např. letečtí konstruktéři požadují konstrukční materiály s nízkou specifickou hmotností, které mají ale současně vysokou pevnost, tuhost, odolnost proti abrazi a korozi, lomovou houževnatost. Takové a obdobné požadavky lze splnit pouze synergickým účinkem dvou nebo více fází či materiálů s různými vlastnostmi. [2]



Compact Bone & Spongy (Cancellous Bone)



Obr. 1: Příklady přírodních kompozitních materiálů [2]

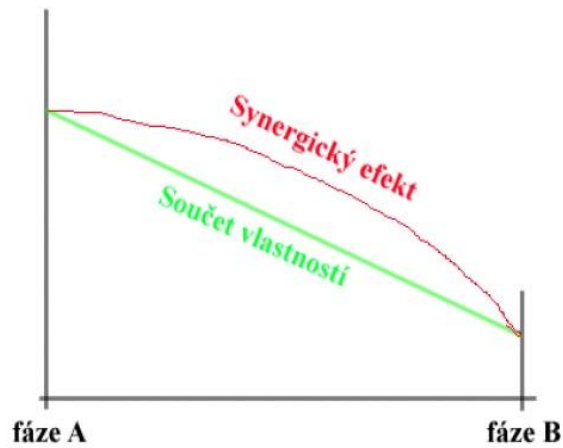
1.1 Současné požadavky na kompozitní materiály

Cílevědomé vytváření nových kompozitních materiálů má za svůj účel splnění některých požadavků, které u klasických materiálů jsou jen těžko splnitelné. Jde zejména o tyto požadavky:

- Zvýšení tuhosti (zvláště specifické tuhosti – poměru Youngova modulu a hustoty)
- Zvýšení pevnosti (zvláště specifické pevnosti – poměru meze pevnosti a hustoty)
- Zvýšení rozměrové stability
- Zvýšení houževnatosti (odstranění křehkosti)
- Zvýšení teplotní stability (rozšíření teplotního intervalu použitelnosti)
- Zvýšení mechanického tlumení (antivibrační a antihlukové materiály)
- Snížení propustnosti pro kapaliny nebo plyny
- Modifikace elektrických vlastností (zvýšení elektrické vodivosti)
- Snížení nasákavosti
- Zmenšení teplotní roztažnosti
- Zvýšení korozní nebo chemické odolnosti
- Udržení tuhosti anebo pevnosti při vysoké teplotě
- Snížení negativního dopadu na životní prostředí
- Redukce hmotnosti (snížení hustoty)
- Snížení ceny [1]

1.2 Synergický efekt

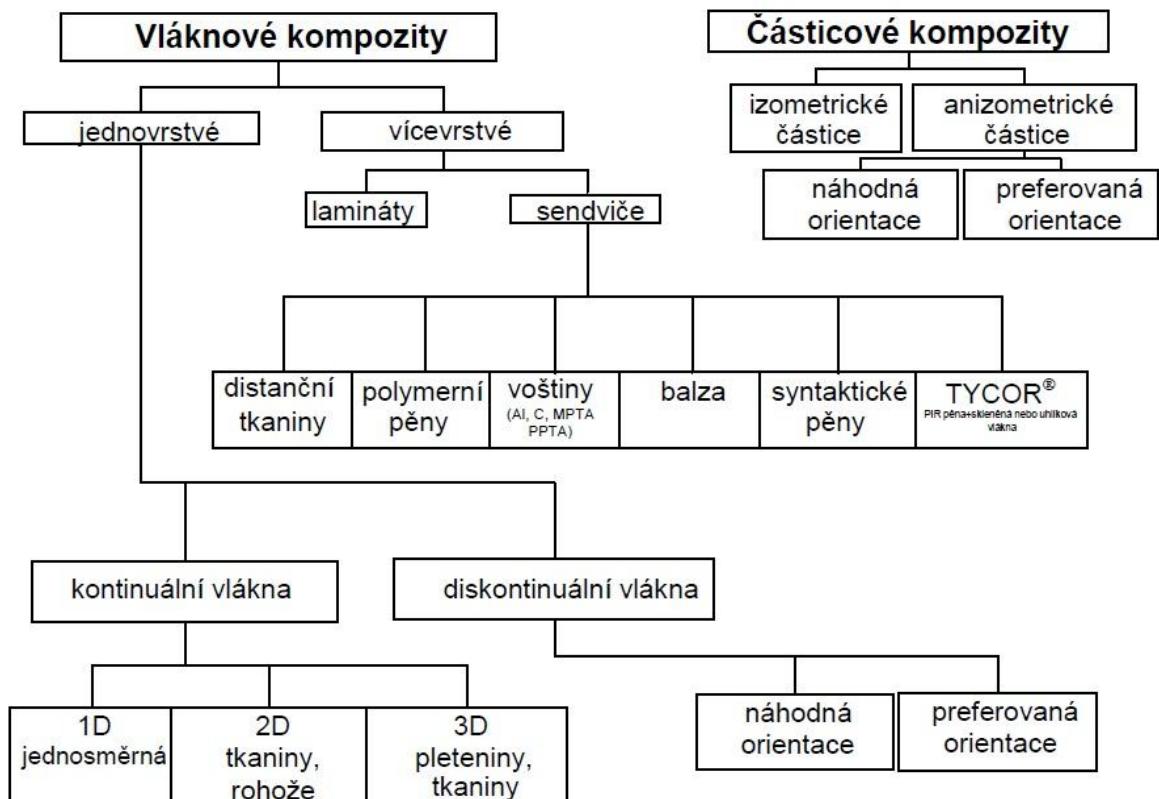
Odlišení kompozitního materiálu od běžné heterogenní materiálové směsi je tzv. synergický efekt. Synergický efekt nám říká, že kombinací materiálů je nutné získat nové, odlišné vlastnosti, než poskytují samotné materiály nebo lepší vlastnosti než je jen prostý součet vlastností materiálů, z nichž se kompozitní materiál skládá. [3]



Obr. 2: Synergický efekt kompozitu [4]

1.3 Rozdělení kompozitních materiálů

V průmyslu mají největší význam mikrokompozitní materiály. Rozdělení mikrokompozitních materiálů podle geometrie a orientace výztuže je patrné z následujícího schématu:



Obr. 3: Rozdělení kompozitních materiálů podle geometrie a orientace výztuže [5]

1.4 Matrice

Spojité složka, která zastává funkci pojiva výztuže a chrání většinou křehká vlákna, se nazývá matrice. [6]

Pod pojmem matrice se rozumí materiál, kterým je prosycen systém vláken a partikulárních komponent tak, že po zpracování vznikne tvarově stálý výrobek. Vzniklá surovina se označuje jako kompozit. [7]

Úkolem matrice je zaručení geometrického tvaru, zavedení a přenos sil, ochrana vláken, tj.:

- Přenos namáhání na vlákna
- Převedení namáhání z vláken na vlákno
- Zajištění geometrické polohy vláken a tvarové stálosti výrobku
- Ochrana vláken před vlivy okolí [7]

Nejpoužívanější matrice jsou nenasycené polyestery (UP), vinylestery (VE), epoxidy (EP), z termoplastů polypropylen (PP) a polyamidy (PA). [6]

Tab. 1: Vlastnosti různých druhů pryskyřic [8]

Druh pryskyřice	Epoxidové	Polyesterové	Fenolické	Polyimidové
Modul pružnosti E [MPa]	4 500	4 000	3 000	4 000 - 19 000
Poissonova konst. ν_m [-]	0.4	0.4	0.4	0.35
Modul pružnosti ve smyku G_m [MPa]	1 600	1 400	1 100	1 100
Pevnost v tahu σ_{pm} [MPa]	130	80	70	70
Hustota ρ [kg/m ³]	1 200	1 200	1 300	1 400
Maximální teplota T_{max} [°C]	90 - 200	60 - 100	120 - 200	250 - 300

1.5 Výztuž

Úkolem výztuže v kompozitním materiálu je především zajistit mechanické vlastnosti materiálu, jako je pevnost a tuhost. Avšak i elektrické vlastnosti závisejí na výztuži, a proto typ výztuže má klíčový vliv na vlastnosti profilu. [9]

Formy výztuže:

- Vlákna
- Rohože
- Roving
- Tkaniny a kombinované výztuže [10]

1.5.1 Vlákna

Pevnost vlákna je vždy významně větší než pevnost stejného materiálu v kompaktní formě. Příčinou je malý příčný průřez vláken. V tenkých vláknech jsou minimalizovány rozměry vrozených vad materiálu a také nebezpečnost povrchových vad je při velmi malých příčných rozměrech menší (tenká vlákna mají proti stejně dlouhým vláknům větších průměrů významně menší povrch). Vady existují jen v podobě submikroskopických až mikroskopických trhlinek a dutinek, které jsou přednostně orientovány (protaženy) v podélném směru vlákna. [11]

Existují tři široce používané druhy vláken:

- a) Skleněná
- b) Aramidová (známá pod obchodním označením kevlar)
- c) Uhlíková [8]



Obr. 4: Aramidové, uhlíkové a skleněné vlákno [8]

Tab. 2: Vlastnosti různých materiálů vláken [12]

Typ vlákna	Sklo	Aramid	HS - uhlík	HM - uhlík	Hliník	Ocel
Modul pružnosti v podélném směru E_{fl} [MPa]	74 000	130 000	230 000	390 000	75 000	210 000
Modul pružnosti v příčném směru E_{ft} [MPa]	74 000	5 400	15 000	6 000	75 000	210 000
Modul pružnosti ve smyku G_{fLT} [MPa]	30 000	12 000	50 000	20 000	30 000	81 000
Pevnost v tahu σ_{fl} [MPa]	2 100	3 000	5 000	3 800	500	1 800
Hustota ρ [kg/m ³]	2500	1 500	1 600	1 700	2 700	7 850
Cena [USD/kg]	100 % \$30	800 % \$250	600 % \$185	1800 % \$600	6 % \$2	< 3 % < \$1

1.5.2 Druhy vazeb

Rovingové tkaniny mají různou textilní vazbu. Vedle požadavků na tuhost a pevnost kompozitu o vhodné vazbě rozhoduje i tvarová členitost forem. Vzájemné uspořádání osnovy a útku vytváří tři základní typy vazeb:

- Plátňová vazba
- Keprová vazba
- Atlasová vazba

Plátňová vazba (angl. „plain”)

Je nejpevnější a také nejméně poddajná při tvarování, když prameny (nebo rovingy) v osnově i útku jsou stejně silné a stejnoměrně vzdálené. Pramenec útku prochází vždy pod a nad každým pramenem osnovy (tzv. vyvážená plátňová vazba). Volnější a tím i poddavnější plátňovou vazbu vytvářejí dva a více pramenů útku procházejícího pod dvěma nebo více nitěmi osnovy (košíková vazba, angl. „basket”). [11]

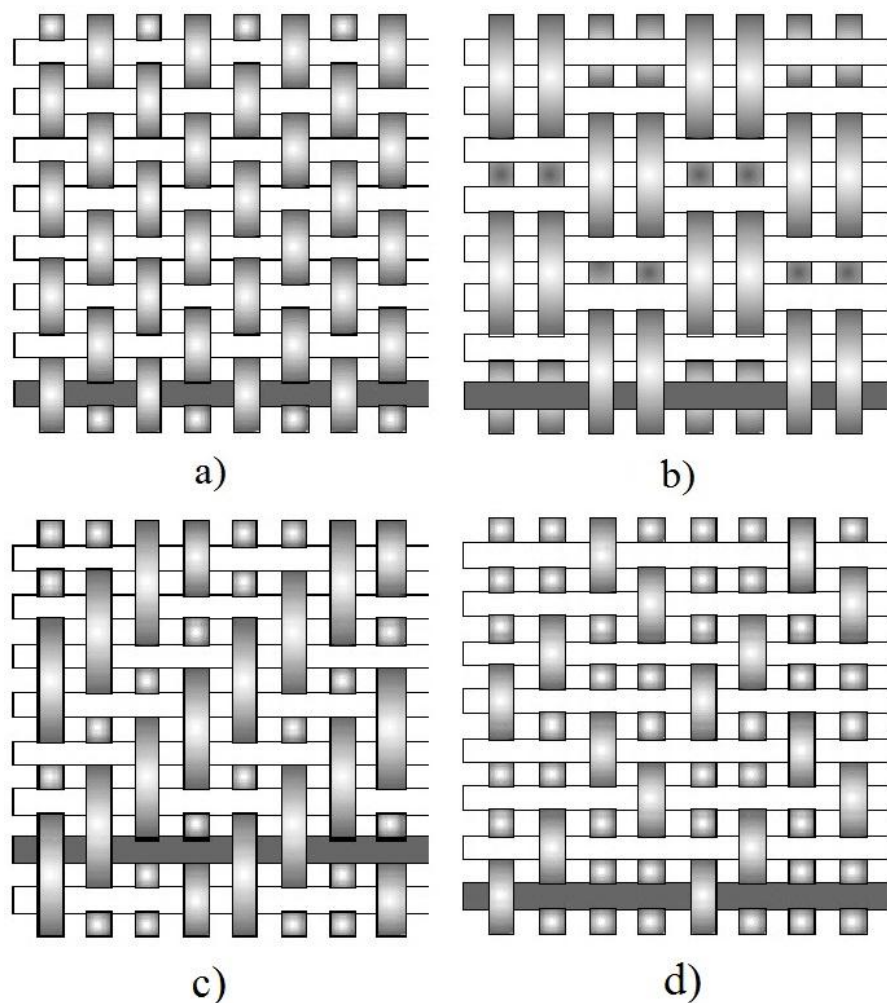
Keprová vazba (angl. „twill”)

Je vytvořena, když útek překříží minimálně dvěma prameny osnovy, než opět projde pod jedním nebo více prameny osnovy. V další řadě se útek posouvá doprava nebo doleva vždy k nejbližšímu prameni osnovy. Na tkanině je tak vytvářen diagonální vzor. Pokud je použi-

ta vazba např. 3/1, znamená to, že jeden pramen osnovy je překryt třemi prameny útku a jedním pramenem na spodní straně (vzniká lomený vzor). Tkanina s keprovou vazbou je ohebnější, ovšem pouze při měkké povrchové úpravě vláken. [11]

Atlasová vazba (angl. „satin“)

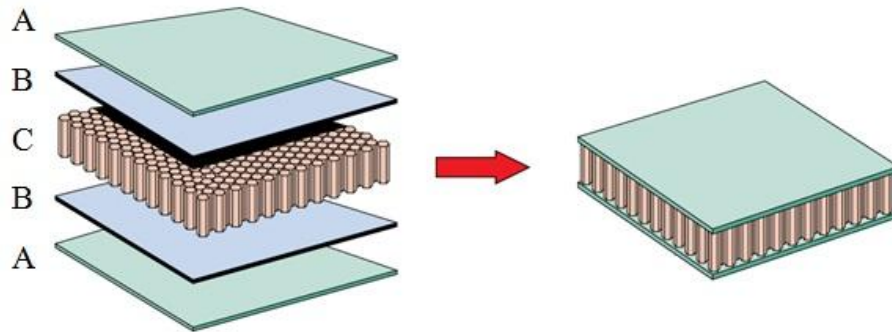
Je nejméně pevnou textilní vazbou. Jeden pramen osnovy je překryt čtyřmi a více prameny útku svrchu a jedním pramenem ze spodní strany. Počet pramenů osnovy překrytých útkem udává tzv. vaznost atlasu (5 až 12). Povrch tkaniny je hladký a lesklý, s dlouhými ploškami, v nichž vlákna leží rovnoběžně s povrchem. Vazba umožňuje dosáhnout vysoký objemový podíl vláken ve vrstvě kompozitu a zaručuje minimální zvlnění vláken. S atlasovou tkaninou je tedy možno získat kompozit s větší pevností a tuhostí než při použití běžných tkanin. [11]



Obr. 5: a) Plátňová vazba, b) Košíková vazba, c) Keprová vazba, d) Atlasová vazba [13]

2 SENDVIČOVÉ KONSTRUKCE

Sendvičové materiály tvoří speciální třídu kompozitních materiálů. Vznikají ze tří materiálových vrstev. Dvě z nich jsou tenké vnější vrstvy, které obklopují třetí vrstvu jádro z obou stran. Jádro se vyznačuje nízkou hmotností, tato vlastnost představuje hlavní výhodu sendvičového materiálu. [14]



Obr. 6: Sendvičový panel (A - vnější vrstva, B - adhezní vrstva, C – voštinové jádro) [12]

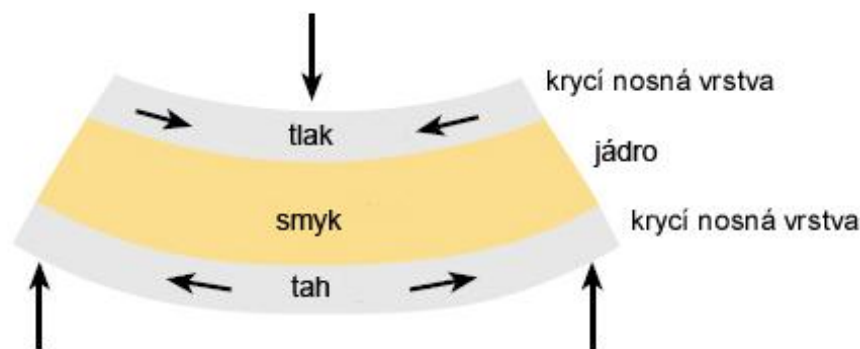
Sendvičové materiály řadíme k vrstveným konstrukcím. Jsou tvořeny různými jednoduchými či složenými materiály, odlišného charakteru vzájemně pevně spojenými. Spojují vlastnosti tuhých povrchových materiálů a jádra odolného proti smyku. Velmi důležitá je vazba povrchová vrstva – jádro. Nejdůležitější jádra jsou z profilovaných vrstev, voštin nebo pěn. Nejčastější materiály jsou dřevo, plasty nebo kovy. Venkovní části jsou tenké, ale tuhé, vnitřní vrstva (tzv. distanční) je hrubší a zpravidla méně pevná hmota. [12]

2.1 Vlastnosti sendvičových konstrukcí

Sendvičové konstrukce se uplatňují převážně v letecké a dopravní technice, kde se využívá jejich hlavních předností, a to vysoké ohybové pevnosti a tuhosti při nízké hmotnosti. Sendviče však lze nalézt i v ostatních průmyslových odvětvích. Ohybová tuhost a pevnost nejsou jejich jedinými přínosy. Mezi další výhody patří únavová odolnost, odolnost proti šíření trhlin, odolnost proti rázům, tepelná odolnost a odolnost proti ohni, tlumení a tepelná a akustická izolace. Tyto vlastnosti jsou určeny převážně materiálem jádra. [15]

2.2 Tuhost a pevnost v ohybu

Ohybová tuhost sendviče je přímo úměrná druhé mocnině její tloušťky. Výhodou je, že se zvětšováním tloušťky sendviče dochází k velmi malému nárůstu jeho hmotnosti – zvětšuje se pouze tloušťka lehkého jádra, které obvykle má hustotu okolo 80 kg/m^3 . Pevnost v ohybu také roste se vzdáleností potahů, ale při dimenzování sendviče je nutné zároveň posuzovat smykovou pevnost jádra. Obecně lze říci, že pevnost jádra ve smyku roste s jeho hustotou. O pevnosti sendviče v tlaku ve směru jeho tloušťky rozhoduje především pevnost jádra v tlaku, ale i tuhost a tloušťka potahů. Pevnost v tlaku jádra roste s jeho hustotou. [15]

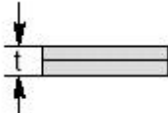
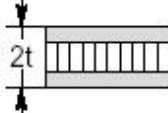
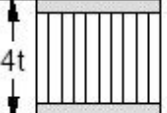


Obr. 7: Zatížení sendvičové konstrukce na ohyb [13]

Na obr. 7 je vidět, že na vnější vrstvy sendvičové konstrukce působí tahové a tlakové síly, zatímco jádrový materiál musí udržovat velikost průřezu a odolává smykovému zatížení. [12]

V následující tabulce můžeme vidět porovnání celistvého materiálu a struktury s jádrem. Lze vidět, že s použitím sendvičového materiálu a vhodnou volbou tloušťky můžeme docílit značného zvýšení tuhosti a pevnosti v ohybu. Sendvičové konstrukce vykazují vysokou tuhost a pevnost v ohybu při zachování nízké hmotnosti. Z tabulky vyplývá, že tuhost můžeme při zachování stejné hmotnosti zvýšit 37krát a pevnost v ohybu okolo 9 násobku. [14]

Tab. 3: Porovnání pevnosti v ohybu a tuhosti [12]

	Celistvý materiál	Síla jádra t	Síla jádra $3t$
			
tuhost	1.0	7.0	37.0
pevnost v ohybu	1.0	3.5	9.2
hmotnost	1.0	1.03	1.06

2.3 Tepelná odolnost a odolnost proti ohni

Stejně jako na ostatní strojírenské výrobky i na sendviče jsou kladeny požadavky na tepelnou odolnost. Zde se však musí brát v úvahu tepelná odolnost všech složek sendviče, tj. potahů, jádra i spojovacího lepidla. U tepelné odolnosti také hraje velký vliv tepelná vodivost použitých materiálů. Při vysoké tepelné vodivosti použitých materiálů je ohřev sendviče nižší než při nízké tepelné vodivosti (při ohřevu sendviče pouze na jedné straně). Této vlastnosti se využívá při stavbě kosmických raket, kde se právě z tohoto důvodu používají hliníkové voštiny.

Při návrhu sendvičů pro dopravní techniku je nutné respektovat požadavky oborových konstrukčních předpisů na odolnost proti ohni. Všechny použité materiály musí mít atest, že splňují příslušné předpisy na odolnost proti ohni. [15]

2.4 Vnější vrstvy sendvičových konstrukcí

2.4.1 Potahy

Na venkovní vrstvy sendvičů se nejčastěji používají lamináty vyztužené skleněnými nebo uhlíkovými vlákny, pro některé účely i kovové fólie. Jádro a potahy pro optimální splnění funkce sendviče musí být dokonale spojené, přičemž se využívá na spojení matrice potahu nebo speciální lepidla. Vzniká tak velmi tuhá konstrukce, odolávající dynamickému namáhání a rázům. [12]

2.4.2 Prepregy

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

Samolepící prepreg nevyžaduje dodatečnou lepicí vrstvu a umožňuje výrobu lehké konstrukce při snížených nákladech výroby. Mezi výhody patří nízká hmotnost, vysoká tuhost, trvanlivost, volnost při návrhu a snížení nákladů na výrobu. [12]



Obr. 8: Prepreg [12]

Dále se jako vnější vrstvy mohou používat:

- Hliník
- Ocel
- Titan
- Dekorativní plasty
- Dřevo [12]

2.5 Druhy sendvičových jader

2.5.1 Dřevo

Spojování několika silných vrstev dřeva dohromady se poprvé objevilo u Egypťanů kolem roku 3500 př. n. l. Důvodem k tomu bylo to, že jednak chtěli získat silnou vrstvu a jednak ušetřit drahé dřevo. Proto vrstvy méně kvalitního dřeva obkládali dobrým dřevem. Překližku v dnešním slova smyslu vymyslel Emmanuel Nobel, otec Alfreda Nobela, známého

vynálezce dynamitu a zakladatele Nobelovy ceny. Emmanuel zjistil, že několik slabších vrstev dřeva spojených dohromady může být pevnější než jedno dřevo stejné tloušťky. [2]

Dřevo může být popsáno jako „přírodní voština“, jelikož má strukturu, která je v mikroskopickém měřítku podobná buněčné hexagonální struktuře syntetických voštin. Při použití u sendvičových konstrukcí běží vlákna kolmo k rovině potahu, výsledný komponent má podobné vlastnosti jako syntetické nebo umělé voštiny. Nicméně přes různé chemické ošetření, které jsou dnes k dispozici, jsou všechny dřevěné jádra náchylná k absorpci vlhkosti a hnilobě, pokud nejsou dobře uzavřeny v laminátu či v pryskyřici. [16]



Obr. 9: Dřevěné jádro - překližka [2, 12]

Balza

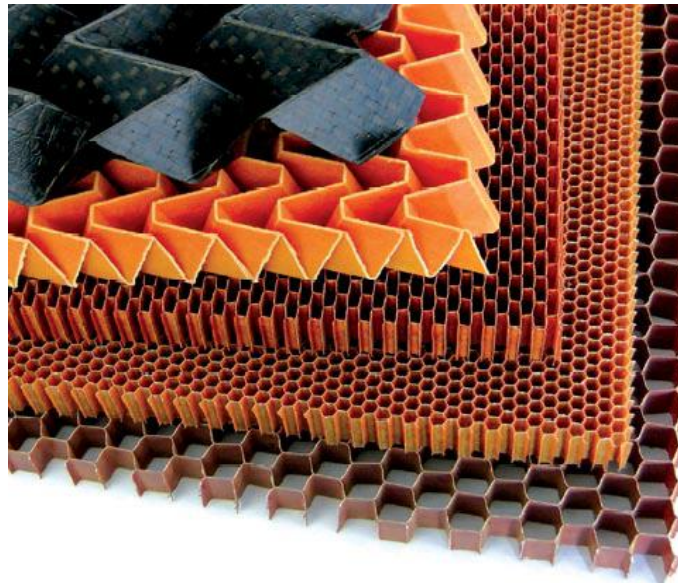
Balza je velký (až 30 m), rychle rostoucí strom. Plody jsou malvice. Roste v Jižní Americe, 95 % komerční produkce pochází z Ekvádoru. Struktura dřeva se vyznačuje velkými buňkami, které jsou vyplněny vodou. Stěny buněk jsou tvořeny vlákny celulózy v ligninové matici. Tento přírodní kompozit má hustotu 40 až 340 kg/m³ (obvykle 160 kg/m³). Balzové dřevo nehoří, spíše pomalu doutná. Oproti polymerním pěněm teplem neměkne a vyznačuje se i menší tepelnou vodivostí. Oproti voštinám („honeycomb“) jsou buňky uzavřené, takže například sendvičové panely lze vyrábět technikou infúze pryskyřice. [11]



Obr. 10: Balzové jádro [17]

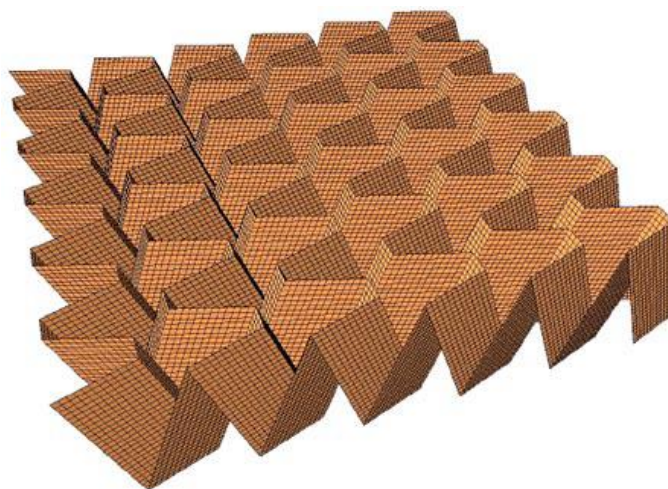
2.5.2 Voštiny

Voština je materiál, který se používá jako jádro s různou výškou, velikostí a tvarem buněk v sendvičových kompozitech. Koncept vynalezl Norman de Buoye ve Velké Británii a nechal jej patentovat v roce 1938 jako hliníkovou voštinu pro sendvičové kompozity. Průmyslově se vyrábí od roku 1945. Označení voština je odvozeno z podobnosti se šestihrannou strukturou plástve včelího medu. [18]



Obr. 11: Typy voštin [12]

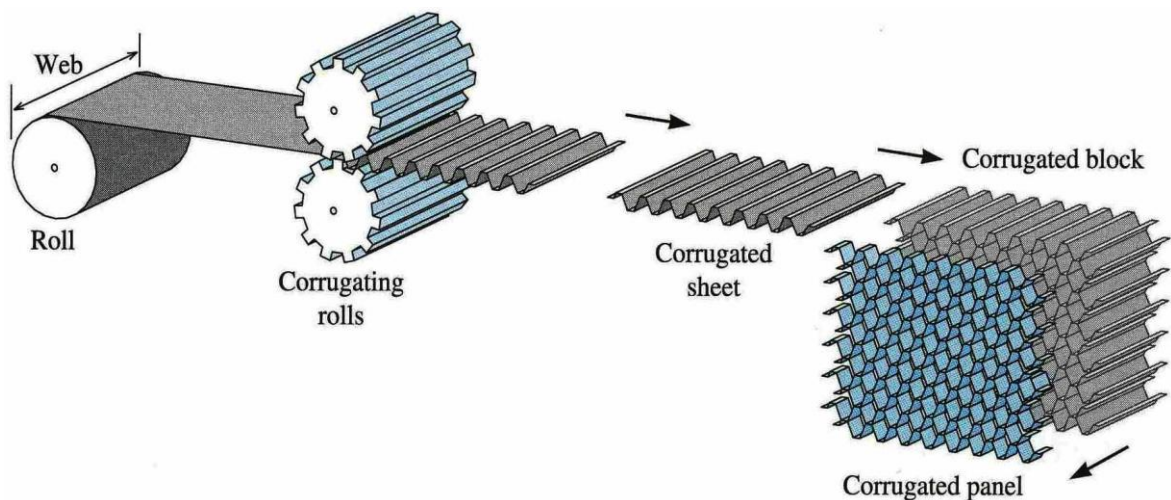
Materiál voštiny je složen z pravidelných n -úhelníků s vysokým štíhlostním poměrem. Pevnost struktury je dána stabilitou stěny voštiny. Z odborné literatury jsou známé také jiné než šestiúhelníkové tvary voštin, např. skládané nebo pyramidové. [19, 12]



Obr. 12: Skládaná voština [12]

Výroba voštin

Voštiny se formují z plošného materiálu několika různými technologiemi. Jako výchozí materiál se používají skleněná, aramidová nebo uhlíková fólie nebo textilie a někdy hliníkový plech. Jeden z moderních výrobních postupů sestává z vrapování fólie (příčné vlny) – stříhání fólie – spojováním dvou listů vzniká panel s šestihrannými dutinami v příčném směru – nanášení pryskyřice a sušení – řezáním panelu v podélném směru se tvoří voštinové pláty s určitou tloušťkou. [18]



Obr. 13: Postup výroby plechové voštiny [12]

Typy voštinových buněk

- Šestihranná
- OX-Core
- Flex-Core
- Double-Flex

Šestihranná

Standardní šestihranná voština je základní a nejčastěji používaná konfigurace. Je běžně k dispozici z kovových i nekovových materiálů. [20]

OX-Core

Konfigurace voštiny je šestihranná, která je prodloužena ve směru W a v tomto směru poskytuje obdélníkovou konfiguraci, jež umožňuje zakřivení nebo formování ve směru L.

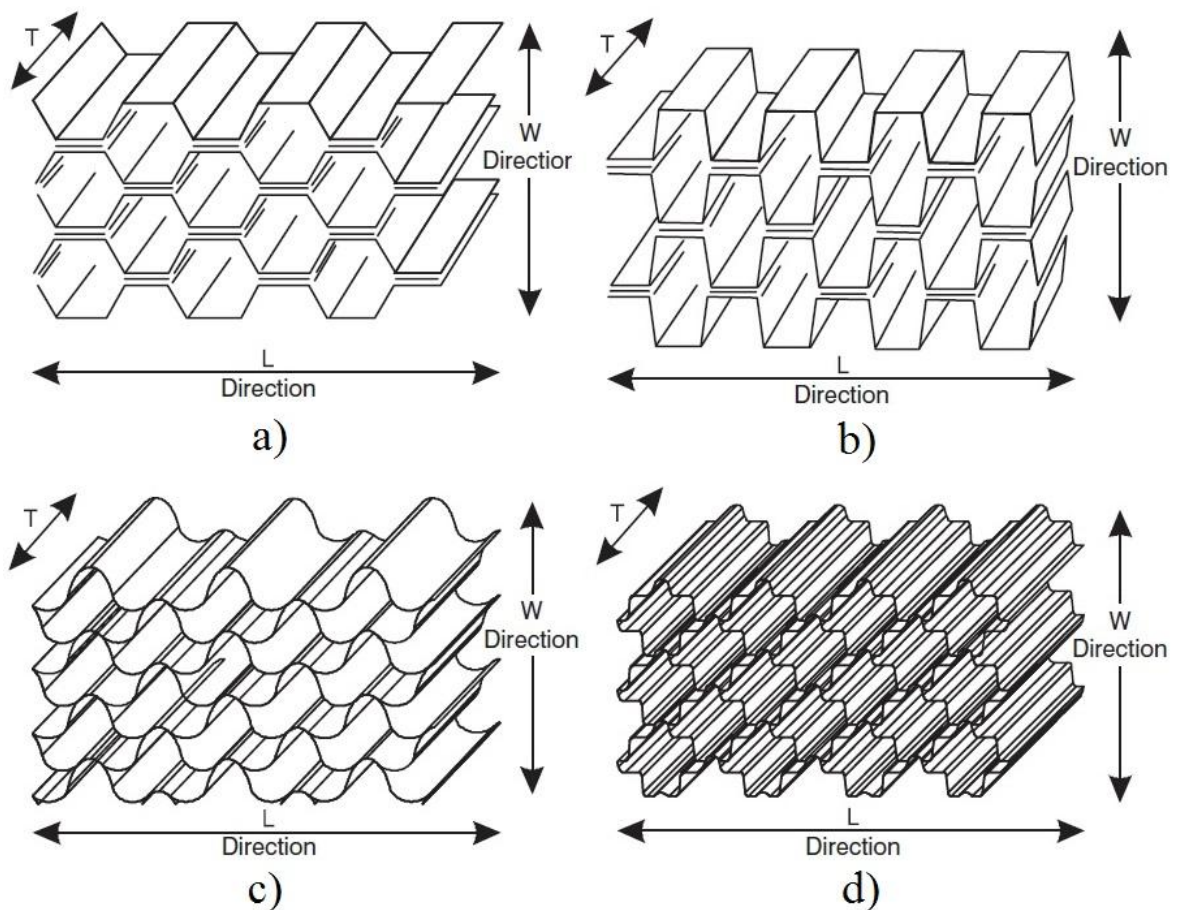
Tento typ voštiny zvyšuje smykové vlastnosti ve směru W a snižuje smykové vlastnosti ve směru L ve srovnání se šestihrannou voštinou. [20]

Flex-Core

Konfigurace Flex-Core poskytuje výjimečné vlastnosti v oblasti tvárnosti ve složitých zakřiveních. Flex jádro poskytuje vyšší pevnost ve smyku než srovnatelné šestihranné jádro se stejnou hustotou. [20]

Double-Flex

Double-Flex je unikátní velká buňka hliníku Flex-Core s vynikající tvarovatelností a vysokými specifickými tlakovými vlastnostmi. [20]



Obr. 14: a) Šestihránná voština, b) OX-Core voština, c) Flex-Core voština, d) Double-Flex voština [20]

Zatěžování voštin

Obr. 15: Způsoby zatěžování voštin [12]

Hliníková voština

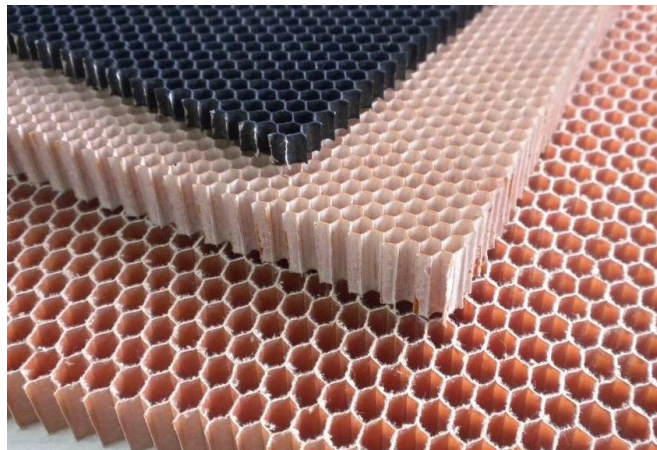
Hliníková voština nabízí jeden z nejvyšších poměrů pevnosti a hmotnosti pro konstrukční materiály. Existují různé konfigurace na lepení hliníkových fólií, které mohou vést k mnoha geometrickým buněčným tvarům (obvykle šestihran). Jejich vlastnosti lze také upravit změnou velikosti buněk a tloušťky fólie. Přes jejich dobré mechanické vlastnosti a relativně nízkou cenu je nutno hliníkovou voštinu používat u některých aplikací s opatrností, např. u velkých lodních konstrukcí, kvůli možným problémům s korozí v prostředí se slanou vodou. Hliníková voština má také tu nevýhodu, že nemá „mechanickou paměť“. Při rázu na voštinový laminát se bude voština nezvratně deformovat i vzhledem k tomu, že odolný plášť se vrátí do svého původního stavu. To může mít za následek v prostoru s pláštěm zhoršení mechanických vlastností. [21]



Obr. 16: Hliníková voština [22]

Nomex voština

Nomex voština je vyrobena z papíru Nomex – jde o určitou formu papíru, který je tvořen kevlarovým vláknem, někdy se také používá celulózové vlákno. Papírová voština se obvykle ponoří do fenolické pryskyřice, tím vznikne voštinové jádro s vysokou pevností a velmi dobrou odolností proti ohni. U letadel se často používají jako lehké interiérové panely ve spojení s pláštěm pomocí fenolických pryskyřic. Nomex voština se stává stále používanějším materiálem u více namáhaných neleteckých komponentů díky svým výborným mechanickým vlastnostem, nízké hustotě a dobré dlouhodobé stabilitě. Nicméně je podstatně dražší než jiné jádrové materiály. [21]



Obr. 17: Nomex voština [23]

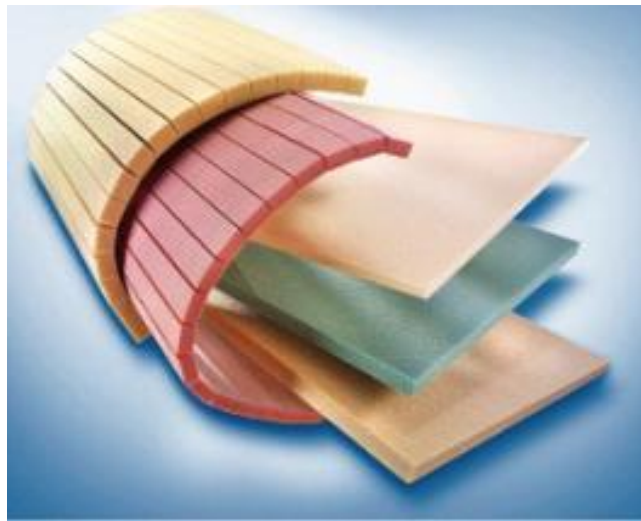
Termoplastická voština

Jádrové materiály vyrobené z termoplastů jsou lehké a nabízejí několik užitečných vlastností a možností pro snadnější recyklaci. Jejich hlavní nevýhoda je obtížné dosažení dobré mezifázové vazby mezi voštinou a pláštěm.

- **ABS** - pro tuhost, pevnost v rázu, houževnatost, povrchovou tvrdost a rozměrovou stálost.
- **PC** - pro UV stabilitu, výbornou propustnost světla, dobrou tepelnou odolnost a samozhášivé vlastnosti.
- **PP** - pro dobrou chemickou odolnost.
- **PE** - pro nízkou cenu jádrového materiálu. [21]

2.5.3 Polymerní pěny

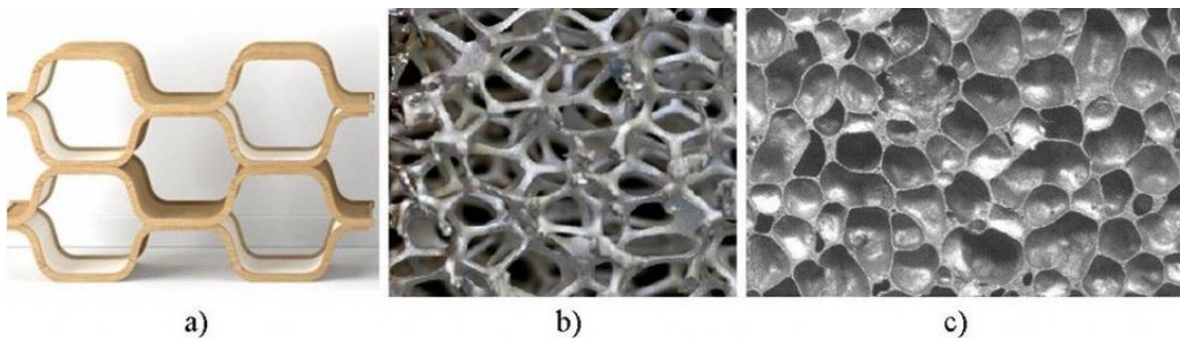
Se snahou o snížení nákladů a zefektivnění výroby se v praxi začaly používat nové, lehčí materiály s lepšími mechanickými vlastnostmi. Proto se v nedávné době výrazně zvýšil zájem o buňková tělesa, též nazývané pěnové materiály nebo pěny, obzvláště polymerní a kovové. Polymerní pěny jsou dvojfázové systémy se spojitou termoplastickou nebo reaktoplastickou matricí, ve které je ve značném objemovém podílu 50-90 % dispergovaná plynná fáze. [12, 24]



Obr. 18: Polymerní pěny [25]

Výroba pěn

Polymerní pěny se vytvářejí vakuovou expanzí nebo vytlačováním taveniny polymeru do vakuové komory, ale též jednoduchým mícháním nebo tlakovým foukáním plynu do taveniny polymeru. Struktura polymerních pěn je tvořená buď uzavřenými, nebo otevřenými buňkami. [12]



Obr. 19: a) honeycomb, b) pěna s otevřenými buňkami, c) pěna s uzavřenými buňkami [12]

Vlastnosti pěn

Vlastnosti polymerních pěn jsou kromě vlastností základní strukturální fáze polymeru ovlivněny objemovým podílem plynu a základní strukturální charakteristikou, podílem tloušťky stěny t a velikosti buňky l , tj. podíl t/l . Pěnovky jednoho a téhož polymeru se mohou vyrábět v několika strukturálních modifikacích. U polymerních pěn s otevřenými buňkami platí:

$$\frac{\rho}{\rho_s} = \left(\frac{t}{l}\right)^2 \quad (1)$$

kde: ρ ... hustota pěny

ρ_s ... hustota polymeru v pevné fázi

Poměr hustot se pohybuje v rozmezí od 0.005 u pěn velmi lehčených až po 0.5 u hustých tuhých pěn. Lze stanovit vztah mezi modulem pružnosti kompaktního polymeru E_s a modulem pružnosti polymerní pěny E ve tvaru:

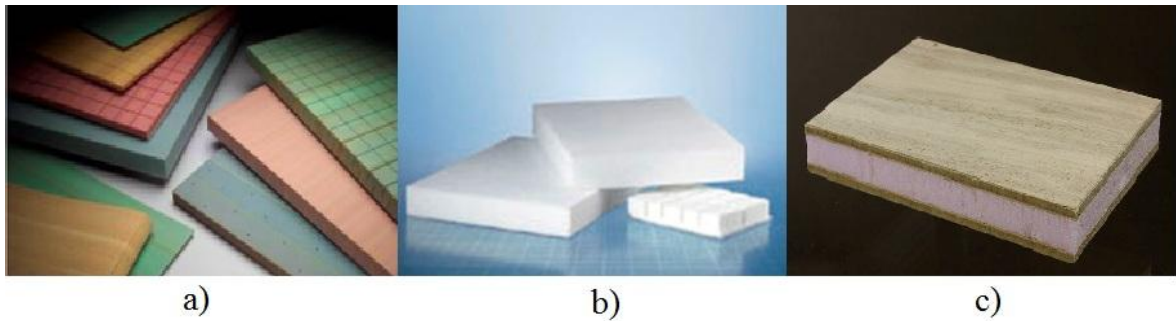
$$E = E_s \left(\frac{\rho}{\rho_s}\right)^2 \quad (2)$$

Hodnoty modulu pružnosti polymerních pěn se tedy pohybují přibližně v rozmezí 0.5 až 500 MPa. [24]

Materiály pěn

- **PVC** - pěny z polyvinylchloridu jsou jedny z nejpoužívanějších pěn pro jádro. Jsou výhodné pro vyváženou kombinaci statických a dynamických vlastností a dobrou odolností proti absorpci vody. Můžou být síťované (příčně a lineárně) nebo nesíťované.
- **PUR** - je náhrada překližky, o málo dražší pěna, ale o mnoho lehčí. Je však křehká a nevhodná pro pevnostní aplikace. [14]
- **PET** - recyklovatelný termoplast, tvarovatelný za tepla, výborná tepelná odolnost, zpracovatelnost i s prepregami. [12]
- **PS** - přestože se polystyrénové pěny hojně využívají ve výrobě plachetnic, surfových prken, kde uplatňují svou výhodu nízké hmotnosti (40 kg/m^3), nízké ceny, nejsou používány ve vysoce pevnostních konstrukčních aplikacích. Nemohou být použity v systému, kde použijeme jako matici polyesterovou pryskyřici.

- SAN - pěny kopolymeru SAN se chovají podobným způsobem jako pěny PVC – příčně síťované, ale mají mnohem větší protažení a houževnatost. PVC používají změkčovadla při výrobě, kdežto kopolymer SAN má vlastnosti, které vycházejí z polymeru samotného, proto se vlastnosti s věkem také výrazně nemění. [13]



Obr. 20: a) Lineárně zesíťovaná PVC pěna, b) PET pěna, c) Sendvič s jádrem z PS pěny [12, 26, 27]

2.6 Aplikace sendvičových konstrukcí

Sendvičové konstrukce lze uplatnit v mnoha odvětvích průmyslu. Mohou být aplikovány pro:

- Dopravní průmysl
- Lodní průmysl
- Letecký průmysl
- Stavebnictví
- Vojenský průmysl
- Kosmický průmysl
- Sportovní průmysl [12]

Kryt hlavního podvozku letounu Aero Ae-270 je sendvič tvořený kompozitními potahy s uhlíkovými vlákny a pěnovým jádrem. Použití pěny si vynutil složitý tvar dílu s několika prolisy. Při výrobě je nejprve obrobena pěnové jádro na NC stroji a jsou vlepeny duralové vložky v místech závěsů. Pak je pěnové jádro obaleno několika vrstvami uhlíkového prepregu. Díl je vytvrzen v jedné operaci v autoklávu. [15]



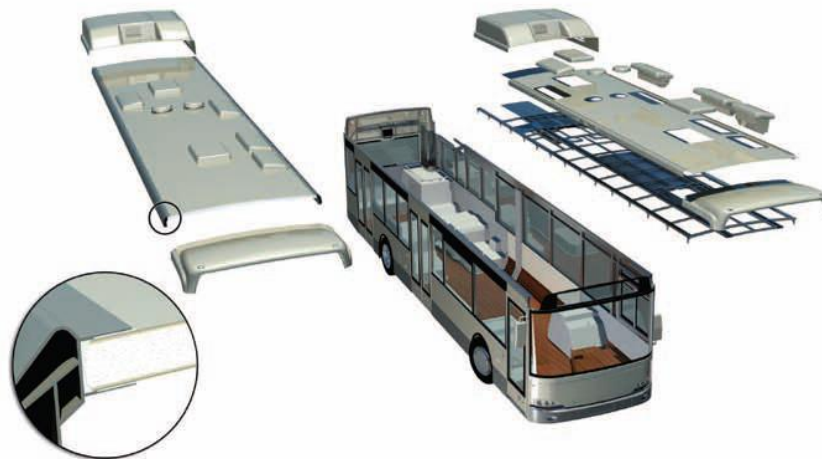
Obr. 21: Kryt hlavního podvozku Aero Ae-270 [12]

Další aplikací jsou sendviče pro zdravotnická polohovatelná lůžka, která umožňují rentgenovat pacienta přímo na lůžku. Lůžko je tvořeno rámem, ke kterému jsou přišroubovány sendvičové desky. Hlavním požadavkem byl nízký koeficient útlumu pro rentgenové záření při dostatečné ohybové tuhosti a pevnosti a zároveň při nízké hmotnosti. Tyto nároky splňují pouze kompozitní potahy s uhlíkovými vlákny. Jako jádro byla zvolena pěna, protože má homogenní strukturu a relativně nízký koeficient útlumu pro rentgenové záření. Výsledkem je dostatečně tuhá a pevná sendvičová deska, která umožňuje rentgenovat pacienta menšími dávkami RTG záření při zachování kvality snímků. [15]

Další příklady aplikací



Obr. 22: Kompozitní pancíř tanku M1A1 Adams tvořený sendvičovou strukturou oceli-plastu-keramiky-plastu-oceli [19]



Obr. 23: Sendvičová konstrukce střechy autobusů [12]



Obr. 24: Konstrukční díly pro kolejová vozidla [28]



Obr. 25: Lyže od Audi s dřevěným jádrem a vrstvami hliníku a titanu [29]

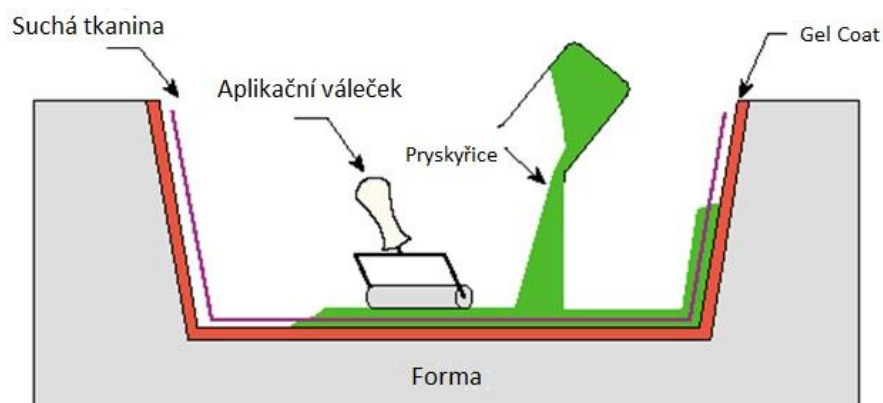
3 TECHNOLOGIE VÝROBY KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ

Jak vyplývá již z charakteru jednotlivých složek a základního rozdělení kompozitu, vzniká (až na výjimky) vláknový kompozit – laminát teprve při výrobě polotovaru resp. výrobku. Vzhledem k tomu je třeba posuzovat technologický postup při výrobě vyztužených plastů za velmi podstatný faktor, který v zásadě určuje jak jeho konečné vlastnosti, tak i ekonomiku výroby. Proto je třeba věnovat volbě technologie značnou pozornost. Výrobní technologie je dána především charakterem výrobku. Volba se řídí několika zásadními faktory:

- Sériovost dílce, velikost a členitost výrobku
- Kvalita povrchu
- Požadované vlastnosti (zejména pevnost a hmotnost)
- Limit nákladů [30]

3.1 Ruční kladení (Hand Lay-up)

Jedná se o proces, ve kterém je nanášení pryskyřice i výztuže prováděno ručně na vhodný povrch pozitivní nebo negativní formy. Podle toho, na který povrch jsou komponenty nanášeny, je dosaženo kvality povrchu vytvrzeného kompozitního dílce. Jedná se o jednu z omezujících zvláštností tohoto výrobního procesu, totiž že pouze jedna strana výrobku má kvalitní povrch. Po položení výztuže a provlhčení pryskyřicí je připravený ruční kompozit ponechán vytvrzení. [31]



Obr. 26: Ruční kladení [13]

Výhody

- Jednoduchá a rozšířená technologie
- Nízké náklady na výrobu formy
- Vhodné pro malé série
- Vhodné pro velkorozměrové a složité výroby [12]

Nevýhody

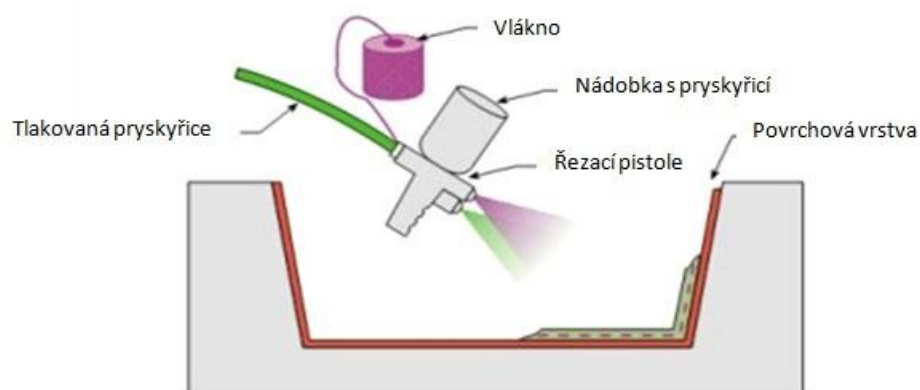
- Nereprodukovatelnost odpadu
- Malá produktivita
- Náročnost na lidskou práci
- Pouze jeden kvalitní povrch
- Kvalita výrobku silně závisí na zkušenosti a schopnostech pracovníka [31]

Aplikace

- Výroba obkladů karosérií dopravních prostředků – autobusy, vlaky
- Výroba lodí [12]

3.2 Nanášení sprayem (Spray Lay-up)

Tato metoda spočívá v tom, že se na povrch formy nastříká katalyzovaná směs krátkých skleněných vláken a matrice, je slisována a vytvrzena. [31]



Obr. 27: Nanášení sprayem [13]

Výhody

- Nízká cena zařízení
- Produktivita poměrně dobrá a reprodukovatelnost výrobků rovněž (pokud je proces automatizován)
- Žádné omezení velikosti výrobku

Nevýhody

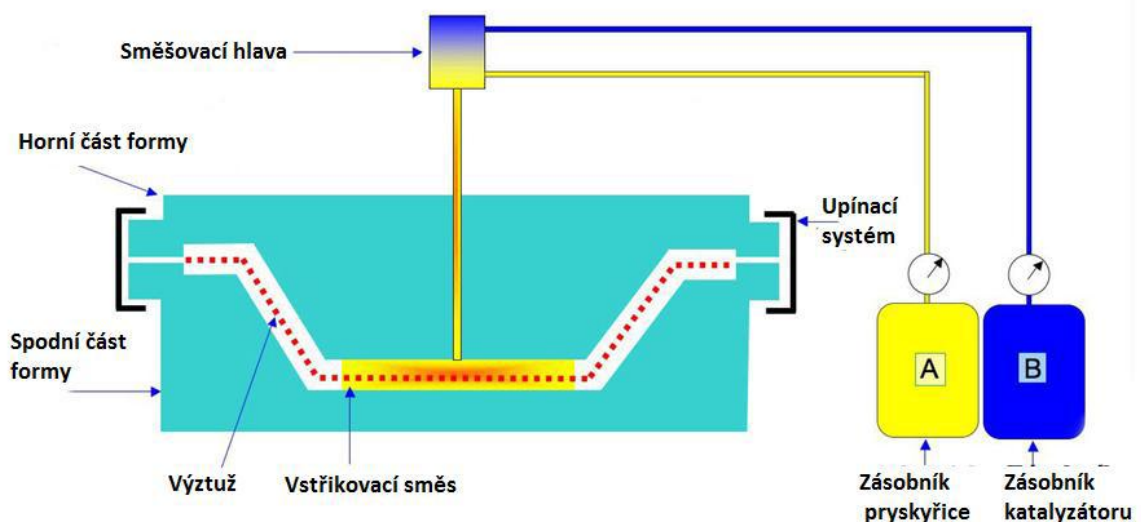
- Nesnadné dosažení přesných tolerancí
- Vysoké požadavky na kvalitní a schopnou pracovní sílu

Aplikace

- Výroba panelů, lodí, zásobníků, atd. [31]

3.3 Lisování se vstřikem - RTM (Resin Transfer Moulding)

Jde o technologii s uzavřenou formou, při které se při použití UP a VE pryskyřic do okolního prostoru neuvolňuje reaktivní rozpouštědlo. Ohřátá pryskyřice a ohřáté tvrdidlo se pomocí nízkotlakých čerpadel dopravují do mísící hlavy bezprostředně před injektáží směsi do ocelové nebo hliníkové formy. [32]



Obr. 28: Lisování se vstřikem - RTM [12]

Výhody

- Jednoduchá a rozšířená technologie
- Produktivní a přesnější technologie v porovnání s ručním kladením
- Vhodná pro střední série 300 - 5000 ks
- Obě strany výrobku jsou hladké

Nevýhody

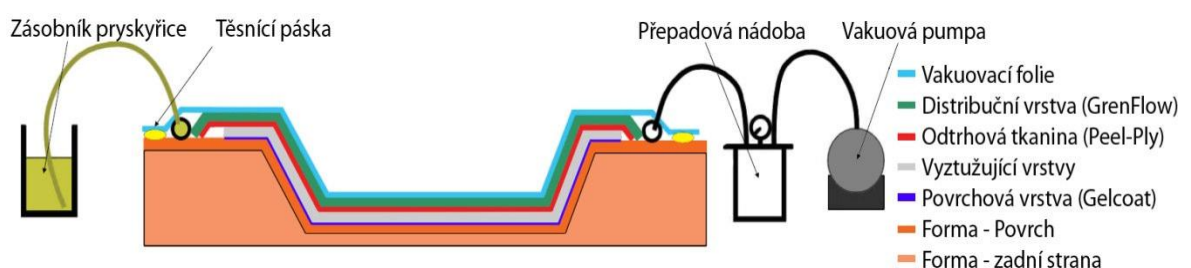
- Zvýšené náklady na výrobu forem
- Formy jsou robustní a těžké [12]

Aplikace

- Automobilové a letadlové komponenty, sedadla ve vlacích [13]

3.4 Vakuová infúze pod pružnou fólií (Vacuum Foil Infusion)

Vakuová infúze pod pružnou fólií je technologie, která využívá podtlaku k prosycení suchých vrstev výztuže kompozitního materiálu. Materiály kompozitní struktury jsou do formy vkládány suché. Následně jsou vloženy pomocné materiály pro tok pryskyřice a vytvoření vakua. Pryskyřice je „nasávána“ prostřednictvím systému hadiček a pomocí distribučního média do připravené výztuže. [12]



Obr. 29: Vakuová infúze pod pružnou fólií [33]

Výhody

- Kontrolovaný proces zaručuje lepší kvalitativní a mechanické vlastnosti produktu
- Vhodné pro malé série
- Vhodné pro velkorozměrné výrobky

Nevýhody

- Technologicky složitý proces
- Zvýšené náklady na pomocný technologický materiál (rozdávěcí tkaninu, separační a vakuovou fólii)

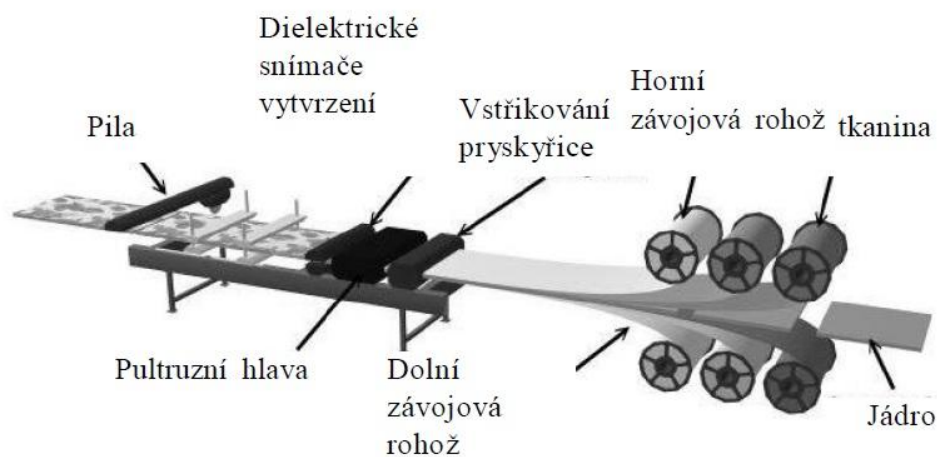
Aplikace

- Výroba lodí
- Výroba vrtulí větrných elektráren [12]

3.5 Pultruze (Pultrusion)

Při klasické pultruzi je výztuž kontinuálně impregnovaná tekutou UP nebo VE pryskyřicí a vtahována do tvarovací a vytvrzovací hlavy. V ohřívané části vytvrzovací hlavy (mikrovlnný ohřev pryskyřice (pro skleněná vlákna) nebo indukční ohřev (pro uhlíková vlákna)) je pryskyřice vytvrzena a hotový profil je odtažován housenkovými pásy nebo dvojicí střídavě popojíždějících vozíků a řezán na potřebnou délku. Stroje obvykle mívají horizontální uspořádání. [32]

U novějších pultruzních strojů je pryskyřice do tvarovací hlavy vstřikována (RIP – „Resin Injection Pultrusion“), což zajistí lepší prosycení výztuže a odstranění par reaktivního rozpouštědla při použití UP a VE pryskyřic. Nekonečný profil je řezán na potřebné délky strojní pilou vybavenou diamantovým kotoučem. [32]



Obr. 30: Pultruze [32]

Výhody

- Neomezená variabilita tvaru průřezů
- Nekonečná délka vyrobeného profilu
- Vysoká produktivita
- Minimální nároky na lidskou práci
- Vysoký stupeň automatizace
- Vysoká reprodukovatelnost fyzikálních vlastností

Nevýhody

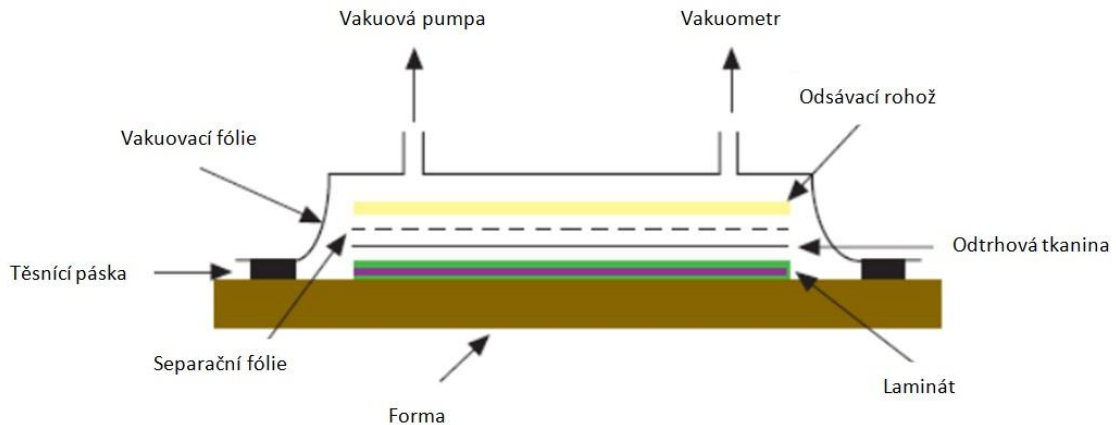
- Velké investiční náklady na pořízení technologie
- Drahý provoz
- Nutnost velmi kvalitního řídicího systému [31]

Aplikace

- Prvky letadel (Airbus A380)
- Křídla bezpilotních letadel
- Sendvičové panely [32]

3.6 Lisování prepregů pomocí vakua (Prepreg Technology)

Prosycená výztuž se aplikuje do formy jako při ručním kladení. Na poslední konstrukční vrstvy se pokládá tzv. odtrhová (strhávací) tkanina ze syntetických vláken, která usnadňuje další operace (laminování, lepení, povrchové úpravy) tím, že ji lze kdykoli po vytvrzení lehce strhnout a na vzniklém povrchu pokračovat s dalšími operacemi, aniž by bylo třeba povrch odmašťovat či brousit nebo zdrsňovat. Následuje perforovaná separační fólie a odsávací rohož, která vstřebává přebytečné pojivo a zároveň umožňuje odsátí vzduchových bublin vakuem. Nakonec se aplikuje pružná vakuovací fólie nebo pryžová plachetka, která se při obvodu formy přilepí těsnícím tmelem ve formě pásku či hmoty nebo oboustranně lepicí páskou k zajištění funkce vakua. Celá forma se transportuje do vytvrzovací pece nebo autoklávu. [30, 12]



Obr. 31: Lisování prepregů pomocí vakua [13]

Výhody

- Vysoká kvalita výrobků
- Oboustranně hladké výrobky
- Možnost dosažení vyššího obsahu výztuží [12, 30]

Nevýhody

- Vyžaduje velmi zručnou pracovní sílu
- Celý proces je velmi pomalý
- Vysoká cena materiálu [31, 12]

Aplikace

- Komponenty závodních aut
- Výroba lodí, letecký průmysl [13, 12]

3.7 Lisování v autoklávu

Jedná se o nejnákladnější a nejsložitější technologii pro sériovou výrobu velkorozměrných konstrukcí. Výchozím materiálem jsou vždy prepregy, vyžadující vytvrzování za zvýšených teplot. Skladba vrstev je prakticky stejná jako při lisování vakuem, forma pokrytá pružnou fólií nebo plachtou se umístí do vyhřívaného autoklávu, provede se nejprve evakuace pod tlakem cca 0.8 bar a pak se autokláv natlakuje na cca 6 bar. Obsah výztuže se pak pohybuje přes 60 %. [30]

Po ohřátí autoklávu na požadovanou teplotu nastane vytvrzování pryskyřice (120 až 200 °C). Vyvozením přetlaku v autoklávu se ještě lépe přitlačí vrstvy prepregů k sobě a je tak zaručen minimální obsah pryskyřice (přetlak je v desetinách MPa). [32]



Obr. 32: Autokláv [34]

Výhody

- Lze dosáhnout vysokého obsahu výztuže
- Obsah pryskyřice lze přesně stanovit - jsou stanoveny výrobcem materiálu
- Technologie je šetrná ke zdraví
- Chemickým složením pryskyřice lze ovlivnit mechanické a tepelné vlastnosti
- Potenciál pro automatizace

Nevýhody

- Vyšší náklady na materiály
- Drahá údržba a oprava autoklávu
- Sendvičové materiály musí být schopny odolávat teplotám a tlakům v procesu

Aplikace

- Konstrukční prvky letadel (např. křídla, ocas)
- Závodní automobily F1 [13]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

4 CÍLE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Cílem této bakalářské práce je navrhnout sendvičový kompozitní materiál, který by se mohl uplatnit jako komponent jak v dopravním průmyslu, tak i ve stavebnictví. Jednotlivé vzorky byly vyráběny ve firmě Form s. r. o., která se specializuje na výrobu kompozitních materiálů pro aplikace v železničním, tramvajovém a automobilovém průmyslu. Výroba byla prováděna pod dohledem odborníků z dané společnosti.

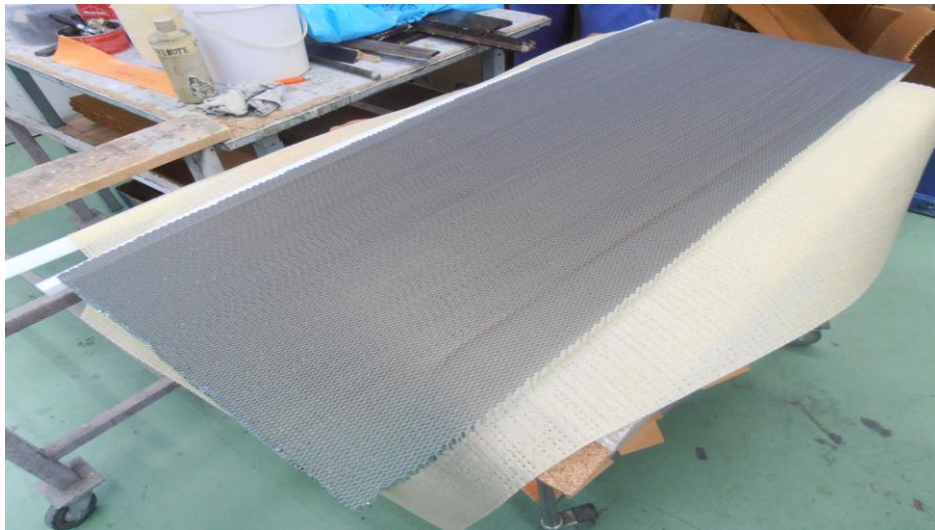
Jednotlivé cíle bakalářské práce mohou být shrnuty do těchto bodů:

- 1) Vypracovat literární studii na dané téma: Polymerní kompozitní materiály, sendvičové kompozitní struktury, typy jádrových materiálů a jejich způsoby výroby, vzájemné srovnání, aplikace a způsoby výroby sendvičových kompozitních struktur.
- 2) Experimentální část: Návrh materiálového složení sendvičových kompozitních struktur, výroba jednotlivých vzorků dle doporučení vedoucího práce (různé tloušťky voštin, počet vnějších vrstev, typy matic v předimpregnovaných polotovarech), příprava zkušebních tělísek pro experimentální pozorování.
- 3) Mechanické testování vzorků na třibodový ohyb dle normy ČSN EN ISO 178, modifikovaná metoda testování na pevnost v odlupu dle normy ISO 4578, odolnost vůči rázovému namáhání dle normy ČSN EN ISO 6603-1.
- 4) Vyhodnocení dosažených výsledků, jejich vzájemné srovnání a návrhy pro jejich aplikaci
- 5) Závěr

5 POUŽITÉ MATERIÁLY

5.1 Hliníková voština ECM 6.4-82

Pro jádro vzorků sendvičů byla vybrána hliníková voština o hustotě 82 kg/m^3 s vrstvou oxidu zirkoničitého ZrO_2 . Voština má tloušťku fólie $80 \text{ }\mu\text{m}$ a velikost buňky 6.4 mm . [Příloha PI]



Obr. 33: Hliníková voština ECM 6.4-82

Tab. 4: Mechanické vlastnosti voštiny ECM 6.4-82 [Příloha PI]

Vlastnost	Jednotka	Hodnota
Pevnost ve smyku L-Dir.	N/mm^2	2.4
Smykový modul L-Dir.	N/mm^2	430
Pevnost ve smyku W-Dir.	N/mm^2	1.4
Smykový modul W-Dir.	N/mm^2	220

5.2 Fenolické prepregy

5.2.1 Prepreg PHG840N-F300-47

Prepreg se skládá z tkaniny vyztužené skleněným vláknem o hustotě 300 g/m^2 , s atlasovou vazbou, předimpregnované se 47 % fenolické pryskyřice PH840N. Má vysokou životnost, vynikající FST chování, výborné mechanické vlastnosti a dobrou kvalitu povrchu. Pro jeho zpracování není nutný autokláv. Doba vytvrzování při $160 \text{ }^\circ\text{C}$ je 10 minut. [Příloha PII]



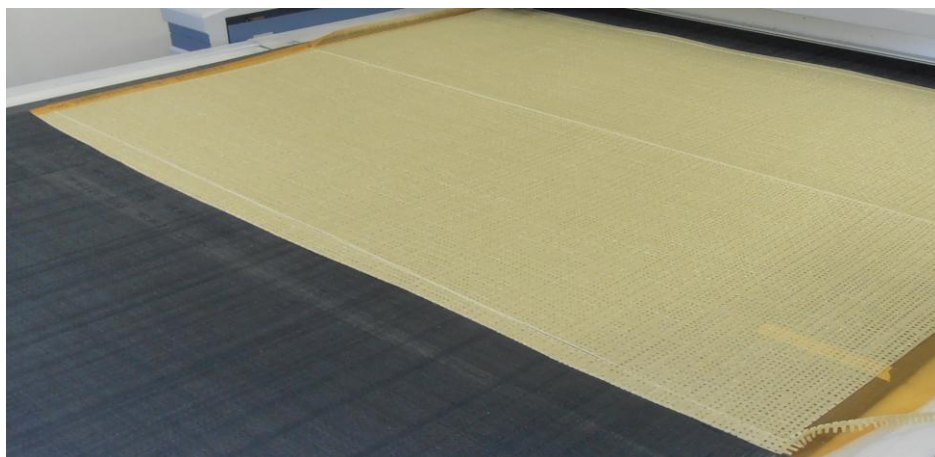
Obr. 34: Prepreg PHG840N-F300-47

Tab. 5: Mechanické vlastnosti PHG840N-F300-47 za pokojové teploty
[Příloha PII]

Vlastnost	Jednotka	Hodnota
Pevnost v ohybu	MPa	450
Ohybový modul	GPa	22
Pevnost ve smyku	MPa	18
Teplota skelného přechodu	°C	> 80 °C

5.2.2 Prepreg PHG840N-G123-40

Prepreg je složen z tkaniny vyztužené skleněným rovingem, tkanina má plátňovou vazbu, obsahuje 40 % fenolické pryskyřice PHG840N. Má výborné FST chování a vysokou životnost. Vytvrzovací teplota je v rozmezí 125 °C a 155 °C. Doba vytvrzování při 125 °C je 120 minut, při 135 °C 75 minut a za teploty 155 °C vytvrzuje 30 minut. [Příloha PIII]



Obr. 35: Prepreg PHG840N-G123-40

Tab. 6: Mechanické vlastnosti PHG840N-G123-40 za pokojové teploty

[Příloha PIII]

Vlastnost	Jednotka	Hodnota
Pevnost v ohybu	MPa	400
Ohybový modul	GPa	20
Pevnost ve smyku	MPa	20
Teplota skelného přechodu	°C	> 80 °C

5.3 Epoxidový prepreg TV 45 EMT 125 Plus

Prepreg je složen z tkaniny vyztužené skleněným rovingem, tkanina má plátňovou vazbu, obsahuje 42 % předimpregnované epoxidové pryskyřice EMT 125 Plus. Tloušťka tkaniny je 190 μm . [Příloha PIV]

EMT 125 Plus je epoxidová pryskyřice vhodná k proycení uhlíkatých, skelných a aramidových tkanin. Široký rozsah vytvrzovacích teplot umožňuje její zpracování běžnými postupy: lisováním za horka, vakuováním, autoklávem. Pryskyřice při teplotě 80 °C vytvrzuje 12 hodin, při 125 °C 45 minut a za teploty 140 °C 15 minut. Pryskyřice EMT 125 Plus se svými dobrými mechanickými vlastnostmi, vysokou průhledností a zvýšenou odolností proti působení UV záření nalezne uplatnění v oblastech, kde se vyžaduje zachování uhlíkového vzhledu kompozitního materiálu: průmysl výroby automobilových dílů, námořního a sportovního vybavení. [Příloha PV]

5.4 Vysokotlaký laminát HPL

HPL jsou dekorativní silným tlakem slisované desky odpovídající EN 438 s krycí vrstvou melaminové pryskyřice. Jsou dodávány ve velkém počtu rozměrů, tloušťek a povrchového provedení. Vrstvený materiál se skládá především z papíru, narůstající suroviny a z umělé, za tepla tvrditelné pryskyřice, přičemž podíl papíru činí více jak 60 hmot. %. Zbývajících 30 až 40 hmot. % se skládá z tvrzené fenolické pryskyřice pro jádro a melaminové pryskyřice pro dekorativní krycí vrstvu. Obě pryskyřice patří k duroplastům. Jsou chemicky zesíťované a tvoří výrobní materiál s vysokou molekulární hmotností. Při působení silného tlaku a žáru vzniká nereagující, stabilní materiál, jehož vlastnosti se od jiných technických surovin zásadně liší. [Příloha PVI]

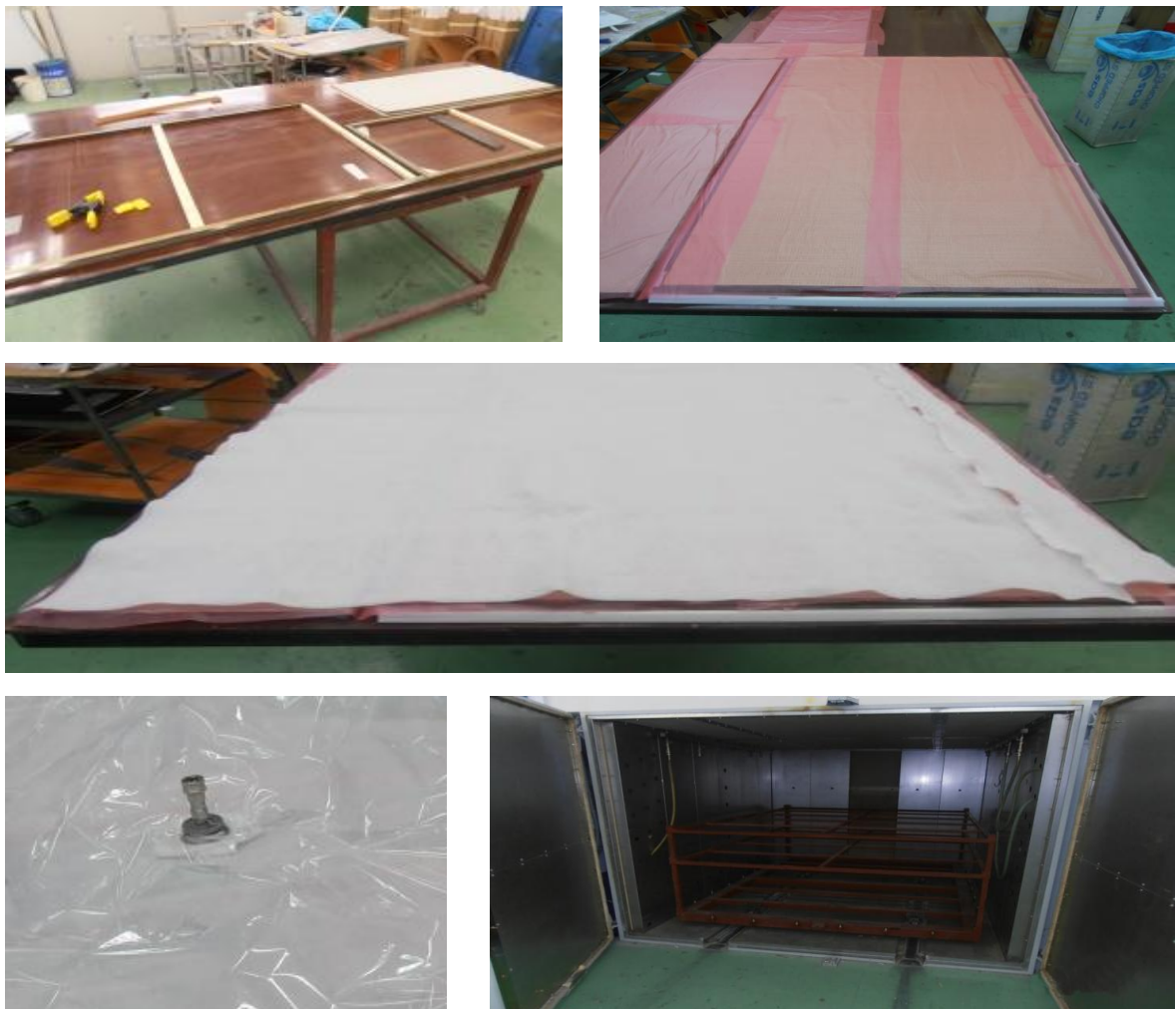
Tab. 7: Fyzikální vlastnosti HPL [Příloha PVI]

Vlastnost	Jednotka	Hodnota
Tloušťka	mm	0.8
Hustota	g/cm ³	1.4
Teplota vznícení	°C	400
Výhřevnost	MJ/Kg	18 - 20

5.5 Pomocné komponenty

V této podkapitole jsou uvedeny veškeré další komponenty, které jsou nutné pro výrobu vzorků:

- Forma ve tvaru rovné desky, odtrhová tkanina, separační fólie, odsávací rohož, vakuová fólie, vakuová pumpa (vývěva), vakuové ventily, vakuometr, hadice a vytvrzovací pec

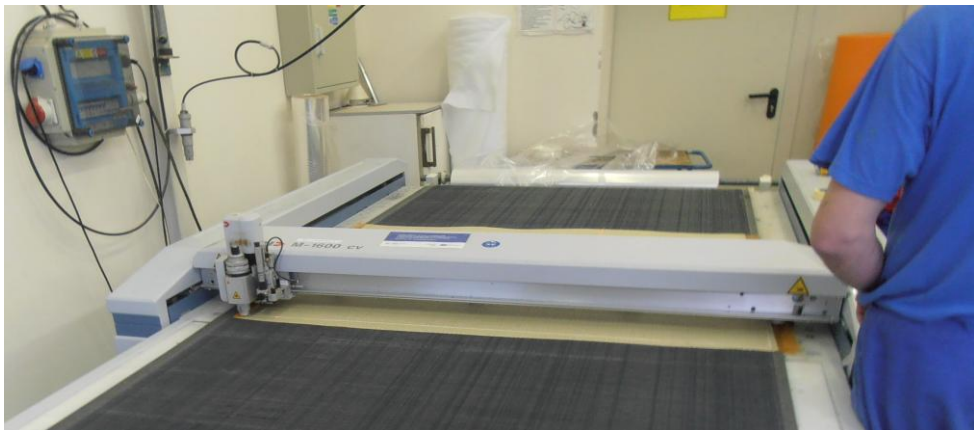


Obr. 36: Pomocné komponenty

6 VÝROBA VZORKŮ

6.1 Postup výroby

Pro všechny vzorky byla zvolena technologie lisování prepregů pomocí vakua (viz podkapitola 3.6). V první řadě bylo potřeba si připravit a neseparovat formu. Dále byly ještě před samotnou výrobou nařezány prepregy pomocí plotru Zünd M-1600 na stanovené rozměry. Voština byla řezána na potřebné rozměry ručně.

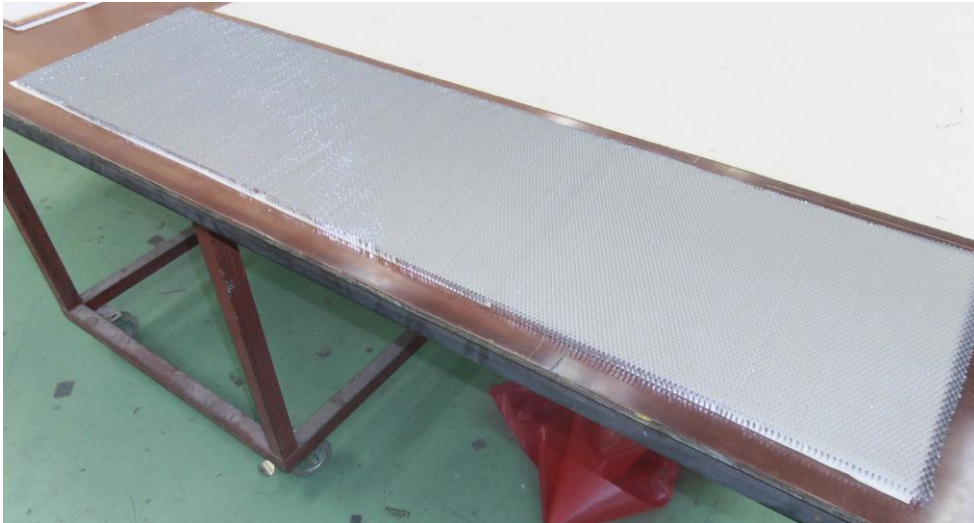


Obr. 37: Příprava prepregu



Obr. 38: Příprava voštiny

Jakmile byly veškeré materiály přichystány, začaly se pokládat na formu v předem určených pořadích. U vzorku č. 1 byla nejprve položena na formu jedna vrstva fenolického prepregu PHG840N-F300-47, na niž se umístilo jádro hliníkové voštiny o tloušťce 9 mm.



Obr. 39: Jádru hliníkové voštiny umístěné na jedné vrstvě prepregu

Poté se na jádro z vnější strany položily dvě vrstvy fenolického prepregu PHG840N-F300-47. V dalším kroku byla na předešlé vrstvy pokládána odtrhová tkanina. Po odtrhové tkaničce následovala separační fólie a odsávací rohož. Separací fólie zabezpečovala oddělení výrobku a ostatních pomocných materiálů. Odsávací rohož zde byla použita za účelem aplikace vakua a jeho rovnoměrného tlaku na výztuže.



Obr. 40: Odsávací rohož s ventily

Na odsávací rohož byly umístěny dva ventily z důvodu pozdějšího vytvoření vakua. Na takto všechny připravené vrstvy byla položena vakuovací fólie, kterou bylo nutno po obvodu zafixovat lepicí páskou. Samotné ventily byly spojeny s vakuovými hadicemi a následně došlo k tvorbě vakua, jehož hodnota se kontrolovala vakuometrem.



Obr. 41: Pokládání vakuové fólie

Pomocí vakuové pumpy (vývěvy) bylo na formě vytvořeno vakuum o podtlaku 0.8 bar.



Obr. 42: Pohled na vytvořené vakuum

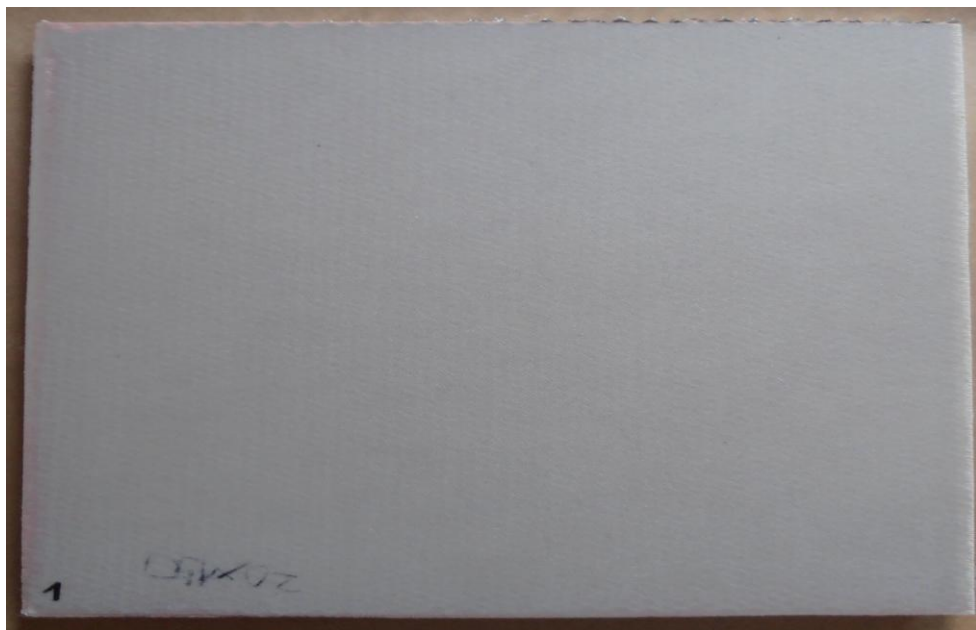
V posledním kroku byla forma přemístěna do vytvrzovací pece, ve které daný vzorek vytvrzoval. Postup u ostatních vzorků je identický, liší se jen v počtu a druhu pokládaných prepregů, ale také v teplotách a dobách vytvrzování.

6.1.1 Vzorek č. 1

Jak je v postupu výroby popsáno, vzorek č. 1 se skládal na jedné straně ze dvou vrstev prepregu PHG840N-F300-47 a na druhé straně jenom z jedné vrstvy téhož prepregu. Jádro sendviče tvořila hliníková voština o tloušťce 9 mm. Rozměry vyrobeného sendviče byly 354x286 mm. Složení vzorku je uvedeno v následující tabulce.

Tab. 8: Sendvičová konstrukce vzorku č. 1

Vzorek č. 1	
Skladba	2 jádro 1
Počet vyztužujících vrstev	3
Horní vnější strana	2x fenolický prepreg PHG840N-F300-47
Jádro	Hliníková voština ECM 6.4-82, tl. 9 mm
Dolní vnější strana	Fenolický prepreg PHG840N-F300-47



Obr. 43: Pohledová strana vzorku č. 1

6.1.2 Vzorek č. 2

Vzorek č. 2 se od vzorku č. 1 lišil pouze tím, že na obou stranách byly položeny dvě vrstvy prepregu PHG840N-F300-47. Voština měla taktéž tloušťku 9 mm. Rozměry vyrobeného sendviče byly 397x210 mm. Složení vzorku je uvedeno v následující tabulce.

Tab. 9: Sendvičová konstrukce vzorku č. 2

Vzorek č. 2	
Skladba	2 jádro 2
Počet vyztužujících vrstev	4
Horní vnější strana	2x fenolický prepreg PHG840N-F300-47
Jádro	Hliníková voština ECM 6.4-82, tl. 9 mm
Dolní vnější strana	2x fenolický prepreg PHG840N-F300-47

6.1.3 Vzorek č. 3

U vzorku č. 3 byly použity oba typy fenolických prepregů. Nejprve se na formu umístila vrstva PHG840N-G123-40, poté vrstva PHG840N-F300-47. Následovalo jádro hliníkové voštiny, které mělo na rozdíl od předešlých dvou vzorků tloušťku 16 mm. Z druhé strany na jádro poté byla položena nejprve vrstva PHG840N-F300-47 a pak PHG840N-G123-40. Rozměry vyrobeného sendviče byly 678x232 mm. Složení vzorku je uvedeno v následující tabulce.

Tab. 10: Sendvičová konstrukce vzorku č. 3

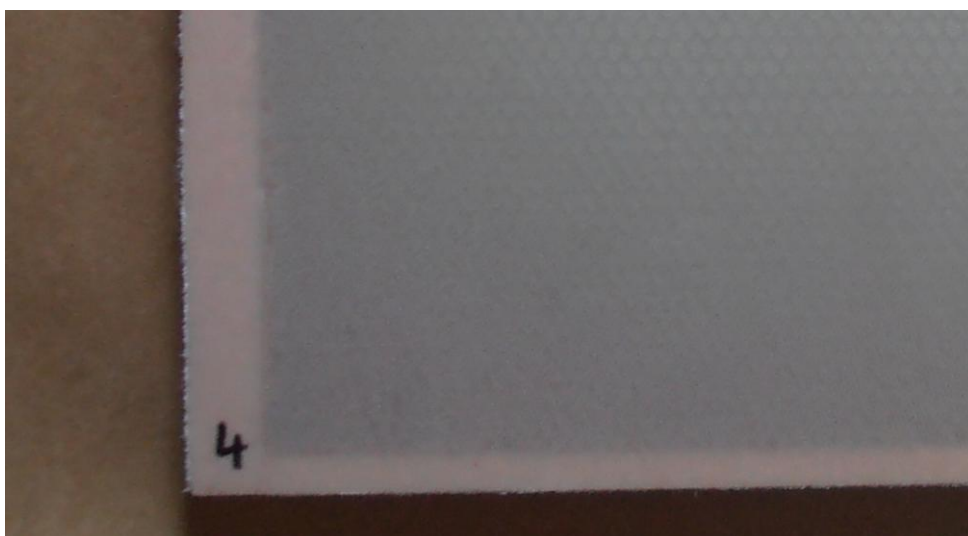
Vzorek č. 3	
Skladba	2 jádro 2
Počet vyztužujících vrstev	4
Horní vnější strana	Fenolický prepreg PHG840N-F300-47 Fenolický prepreg PHG840N-G123-40
Jádro	Hliníková voština ECM 6.4-82, tl. 16 mm
Dolní vnější strana	Fenolický prepreg PHG840N-G123-40 Fenolický prepreg PHG840N-F300-47

6.1.4 Vzorek č. 4

Vzorek č. 4 měl stejný počet vrstev tkanin i tloušťku jádra jako vzorek č. 1. Jen zde byly na krajích vzorku ještě použity lisovací dorazy z PET pěny o tloušťce 10 mm. Rozměry vyrobeného sendviče byly 362x346 mm. Složení vzorku je uvedeno v následující tabulce.

Tab. 11: Sendvičová konstrukce vzorku č. 4

Vzorek č. 4	
Skladba	2 jádro 1
Počet vyztužujících vrstev	3
Horní vnější strana	2x fenolický prepreg PHG840N-F300-47
Jádro	Hliníková voština ECM 6.4-82, tl. 9 mm
Dolní vnější strana	Fenolický prepreg PHG840N-F300-47



Obr. 44: Nalisované dorazy u vzorku č. 4

6.1.5 Vzorek č. 5

Vzorek č. 5 měl stejný počet vyztužujících vrstev na obou stranách jako vzorek č. 3. Hliníková voština zde ale měla tloušťku 9 mm. Rozměry vyrobeného sendviče byly 492x352 mm. Složení vzorku je uvedeno v následující tabulce.

Tab. 12: Sendvičová konstrukce vzorku č. 5

Vzorek č. 5	
Skladba	2 jádro 2
Počet vyztužujících vrstev	4
Horní vnější strana	Fenolický prepreg PHG840N-G123-40 Fenolický prepreg PHG840N-F300-47
Jádro	Hliníková voština ECM 6.4-82, tl. 9 mm
Dolní vnější strana	Fenolický prepreg PHG840N-G123-40 Fenolický prepreg PHG840N-F300-47

6.1.6 Vzorek č. 6

U tohoto vzorku už nebyly použity prepregy s fenolickou pryskyřicí, zde se využilo třech vrstev prepregu TV 45 EMT 125 Plus. Na formu byly nejprve položeny dvě vrstvy zmiňovaného prepregu, poté jádro hliníkové voštiny o tloušťce 9 mm a nakonec jedna vrstva epoxidového prepregu. Rozměry vyrobeného sendviče byly 538x397 mm. Složení vzorku je uvedeno v následující tabulce.

Tab. 13: Sendvičová konstrukce vzorku č. 6

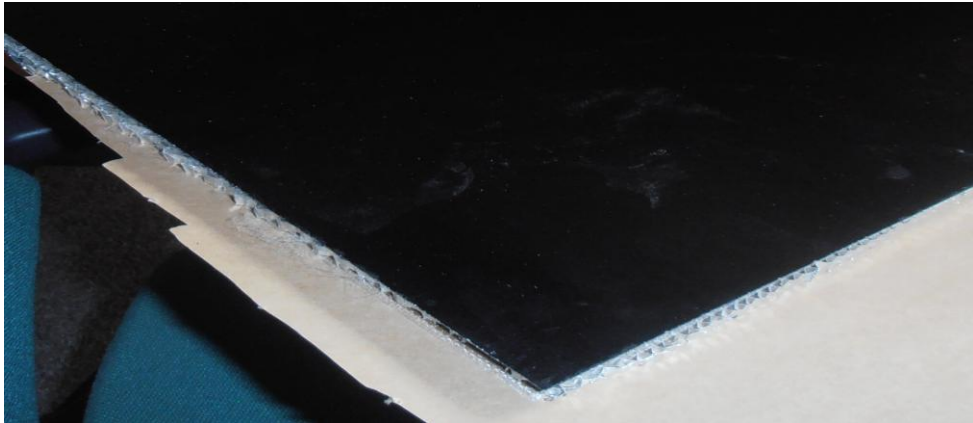
Vzorek č. 6	
Skladba	2 jádro 1
Počet vyztužujících vrstev	3
Horní vnější strana	2x epoxidový prepreg TV 45 EMT 125 Plus
Jádro	Hliníková voština ECM 6.4-82, tl. 9 mm
Dolní vnější strana	Epoxidový prepreg TV 45 EMT 125 Plus

6.1.7 Vzorek č. 7

Vzorek se skládal z jádra hliníkové voštiny o tloušťce 9 mm, na němž byla položena jedna vrstva epoxidového prepregu TV 45 EMT 125 Plus a jedna vrstva HPL na obou stranách. Rozměry vyrobeného sendviče byly 496x434 mm. Složení vzorku je uvedeno v následující tabulce.

Tab. 14: Sendvičová konstrukce vzorku č. 7

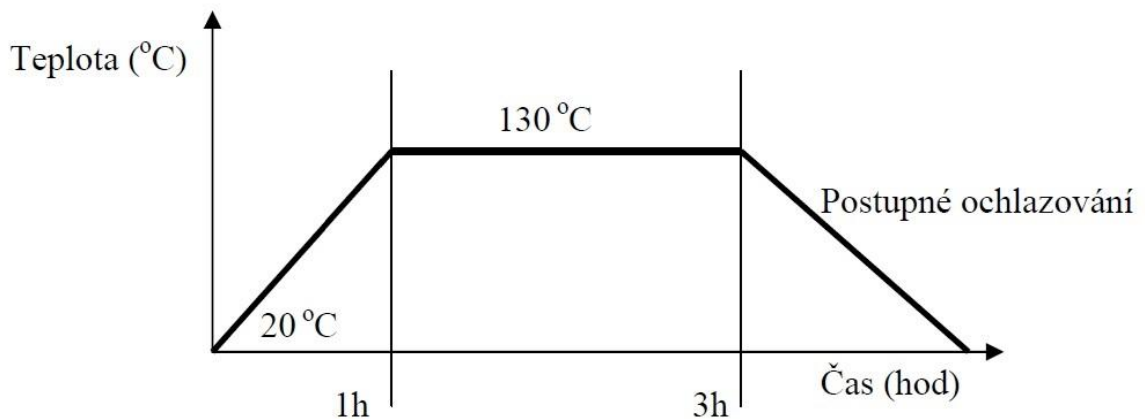
Vzorek č. 7	
Skladba	2 jádro 2
Počet vyztužujících vrstev	4
Horní vnější strana	HPL Epoxidový prepreg TV 45 EMT 125 Plus
Jádro	Hliníková voština ECM 6.4-82, tl. 9 mm
Dolní vnější strana	Epoxidový prepreg TV 45 EMT 125 Plus HPL



Obr. 45: Vyrobený vzorek č. 7

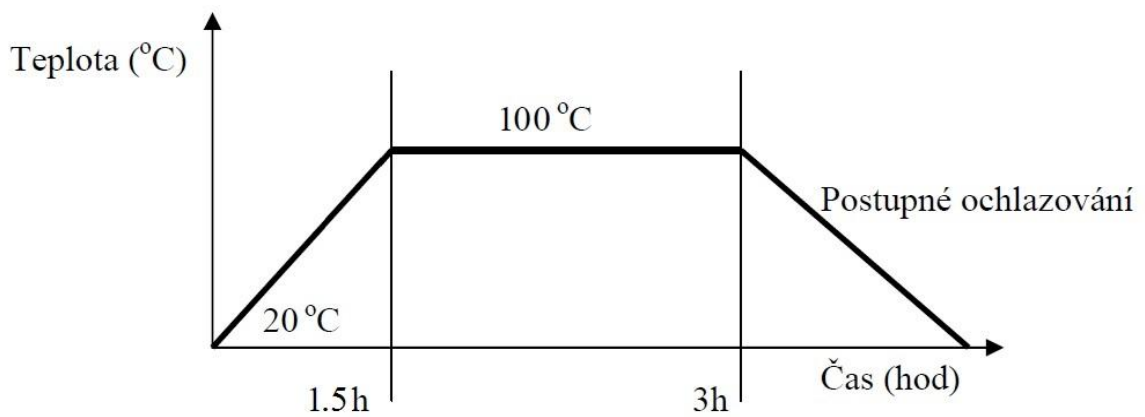
6.2 Vytvrzování vzorků

Vytvrzování vzorků probíhalo ve 2 režimech. Vzorky č. 1 - 5 se nejdříve ohřály na teplotu 130 °C za 1 hodinu, pak při této teplotě byly vytvrzovány po dobu 2 hodin. Po 2 hodinách se ochladily a následně vyjmuly z vytvrzovací pece. Tento vytvrzovací proces lze vidět na Obr. 46.



Obr. 46: Vytvrzovací režim pro vzorky č. 1 - 5

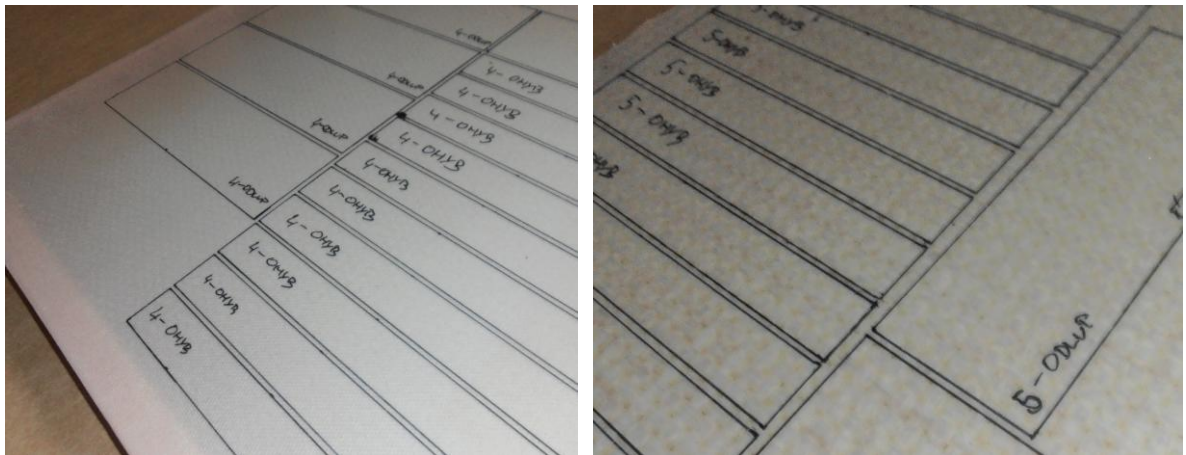
Vzorky č. 6 a 7 byly vytvrzovány při nižší teplotě a to 100 °C 1.5 hodiny. Zároveň ale také byly na tuto teplotu ohřívány 1.5 hodin, jak je patrné z Obr. 47.



Obr. 47: Vytvrzovací režim pro vzorky č. 6 a 7

6.3 Příprava vzorků

Po úplném vytvrzení a vyjmutí vzorků z vytvrzovací pece bylo potřeba dané vzorky před zkoumáním jejich mechanických vlastností orýsovat a nařezat na určité rozměry. Pro řezání vzorků byla použita úhlová bruska s řezacím kotoučem. Rozměry zkušebních vzorků jsou uvedeny v pozdějších podkapitolách 7.1 až 7.3 pro jednotlivé zkoušky.



Obr. 48: Orýsované sendvičové desky vzorku č. 4 a 5

7 TESTOVÁNÍ VZORKŮ

Zkušební vzorky byly testovány v laboratoři ve Zlíně na Univerzitě Tomáše Bati, Fakulty technologické. Testování probíhalo na univerzálním zkušebním stroji ZWICK 1456. Ke stroji je připojen osobní počítač, jehož součástí je software TestXpert v2.1, který slouží k vyhodnocování dat o prováděných zkouškách. Na tomto zkušebním stroji byly vzorky testovány na tříbodový ohyb a odlup.



Obr. 49: Zkušební stroj ZWICK 1456

Technické specifikace přístroje ZWICK 1456

- **Maximální zkušební síla** 20 [kN]
- **Strojová výška** 1284 [mm]
- **Celková výška** 2012 [mm]
- **Celková šířka** 630 [mm]
- **Šířka pracovního prostoru** 420 [mm]
- **Hmotnost** 150 [kg]
- **Max. rychlost posuvu příčnicku** 800 [mm/min]

7.1 Zkouška třibodovým ohybem

Zkouška třibodovým ohybem byla realizována na zkušebním stroji ZWICK 1456 dle normy ČSN EN ISO 178. Testované vzorky byly jednotlivě pokládány na podpěry s rozpětím 120 mm, kde na ně později působil trn o konstantní rychlosti 10 mm/min, který vyvolával průhyb daných vzorků. Pro každý druh sendviče bylo provedeno 5 měření. Příslušný software vyhodnotil aritmetické průměry, směrodatné odchylky a variační koeficienty pro měřené veličiny. Dále byly ze softwaru získány patřičné grafy. Testované vzorky měly rozměry 20x150 mm. Měření probíhalo za pokojové teploty.



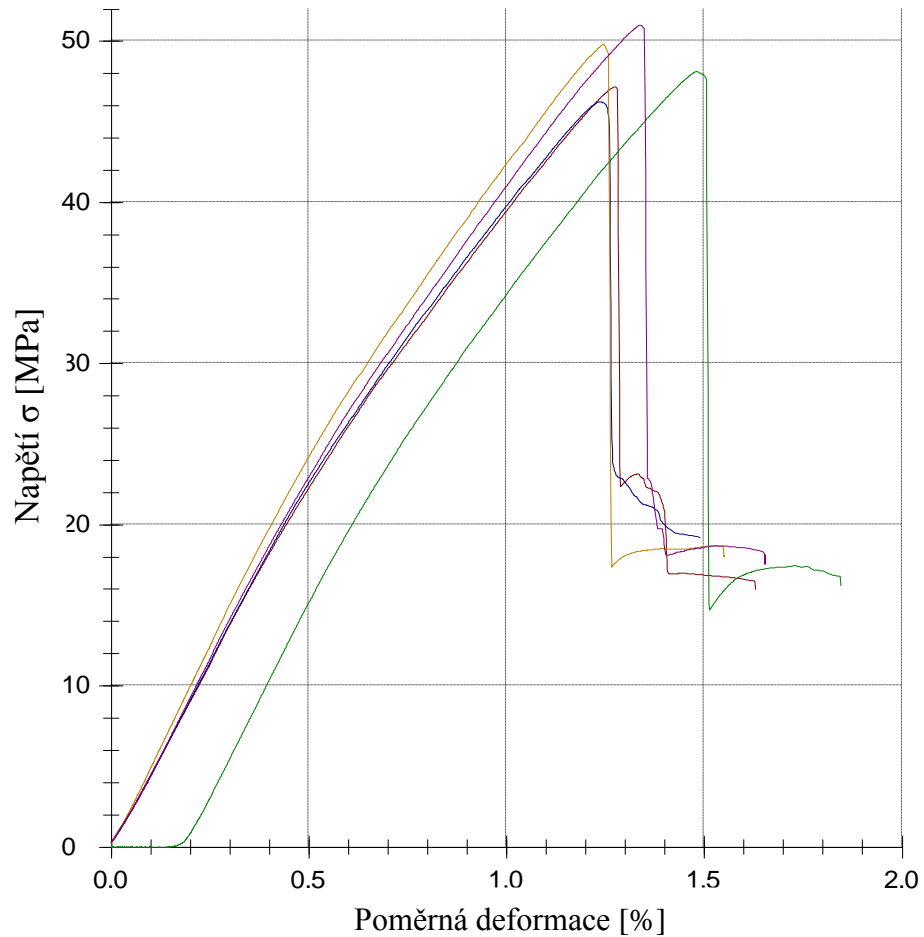
Obr. 50: Zkouška třibodovým ohybem

7.1.1 Naměřené výsledky při zkoušce třibodovým ohybem

Tab. 15: Naměřené hodnoty třibodovým ohybem u vzorku č. 1

n	a_0 [mm]	b_0 [mm]	E [MPa]	σ_{fM} [MPa]	ϵ [%]	W [J]
1	9.5	20.5	4570	47.2	1.3	0.86
2	9.5	20.5	4220*	48.1	1.5	0.91
3	9.5	20.5	4670	46.3	1.2	0.82
4	9.5	20.5	5070	49.8	1.2	0.89
5	9.5	20.5	4790	51.0	1.3	0.98
\bar{x}	9.5	20.5	4775	48.5	1.3	0.89
s	0	0	216	1.93	0.1	0.06
v	0	0	4.53	3.99	7.75	6.64

* Hodnota modulu E u měření $n = 2$ byla vyřazena z měření kvůli vysoké odchylce od ostatních naměřených hodnot.



Obr. 51: Průběh tříbodového ohybu pro 5 měření u vzorku č. 1

Tab. 16: Naměřené hodnoty tříbodovým ohybem u vzorku č. 2

n	a_0 [mm]	b_0 [mm]	E [MPa]	σ_{fM} [MPa]	ϵ [%]	W [J]
1	9.7	21	5610	34.6	0.6	0.31
2	9.7	21	5490	36.1	0.7	0.36
3	9.7	21	5020	34.8	0.7	0.35
4	9.7	21	5620	41.2	0.7	0.46
5	9.7	21	5410	37.8	0.8	0.41
\bar{x}	9.7	21	5430	36.9	0.7	0.38
s	0	0	244	2.75	0.1	0.06
v	0	0	4.49	7.46	7.71	15.68

Tab. 17: Naměřené hodnoty tříbodovým ohybem u vzorku č. 3

n	a_0 [mm]	b_0 [mm]	E [MPa]	σ_{fM} [MPa]	ε [%]	W [J]
1	17.6	20	2950	21.1	0.9	0.48
2	17.6	20	2940	23.8	0.9	0.56
3	17.6	20	3210	22.4	0.8	0.46
4	17.6	20	2790	21.4	0.8	0.44
5	17.6	20	3040	24.1	0.9	0.56
\bar{x}	17.6	20	2990	22.6	0.9	0.49
s	0	0	154	1.36	0	0.06
v	0	0	5.15	6.04	5.15	11.25

Tab. 18: Naměřené hodnoty tříbodovým ohybem u vzorku č. 4

n	a_0 [mm]	b_0 [mm]	E [MPa]	σ_{fM} [MPa]	ε [%]	W [J]
1	9.5	20	5290	57.7	1.3	0.99
2	9.5	20	5800	58.5	1.2	0.97
3	9.5	20	5390	50.0	1.1	0.74
4	9.5	20	4810	42.8	1.0	0.56
5	9.5	20	5010	51.3	1.1	0.81
\bar{x}	9.5	20	5260	52.0	1.1	0.81
s	0	0	380	6.4	0.1	0.18
v	0	0	7.22	12.29	10.07	21.74

Tab. 19: Naměřené hodnoty tříbodovým ohybem u vzorku č. 5

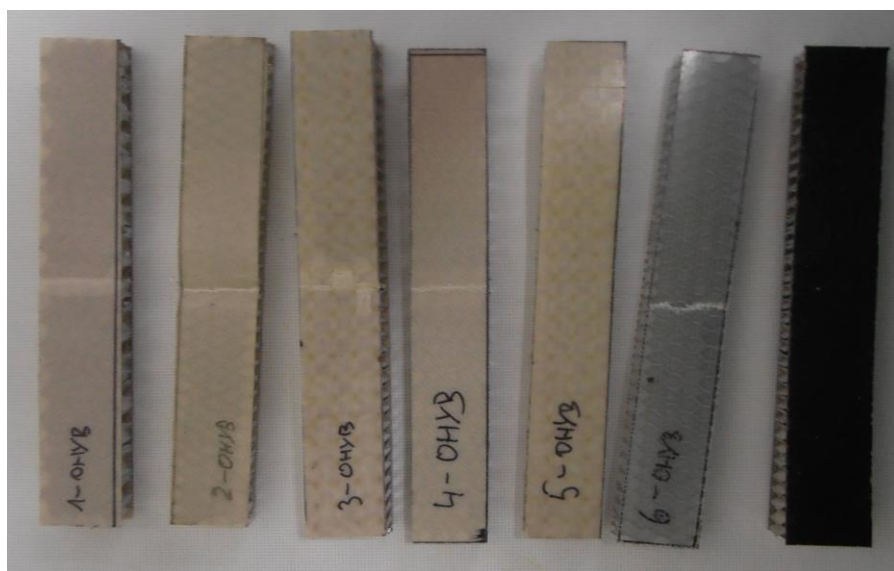
n	a_0 [mm]	b_0 [mm]	E [MPa]	σ_{fM} [MPa]	ε [%]	W [J]
1	10.6	20.3	7270	49.2	1.0	0.92
2	10.6	20.3	7760	47.0	0.7	0.54
3	10.6	20.3	7520	49.7	0.9	0.82
4	10.6	20.3	7650	49.8	0.8	0.66
5	10.6	20.3	7200	50.0	0.9	0.73
\bar{x}	10.6	20.3	7480	49.2	0.9	0.74
s	0	0	239	1.22	0.1	0.15
v	0	0	3.2	2.49	13.32	19.72

Tab. 20: Naměřené hodnoty tříbodovým ohybem u vzorku č. 6

n	a_0 [mm]	b_0 [mm]	E [MPa]	σ_{fm} [MPa]	ϵ [%]	W [J]
1	9.3	20.8	2220	35.5	1.8	0.90
2	9.3	20.8	2260	34.3	1.7	0.79
3	9.3	20.8	2130	34.1	1.8	0.86
4	9.3	20.8	2240	37.2	1.8	0.90
5	9.3	20.8	2310	35.0	1.7	0.80
\bar{x}	9.3	20.8	2230	35.2	1.8	0.85
s	0	0	64.6	1.21	0.1	0.05
v	0	0	2.9	3.45	4.48	6.32

Tab. 21: Naměřené hodnoty tříbodovým ohybem u vzorku č. 7

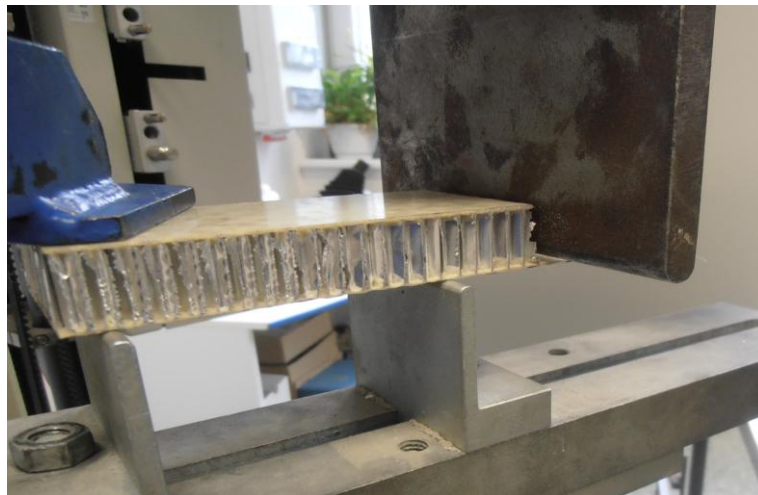
n	a_0 [mm]	b_0 [mm]	E [MPa]	σ_{fm} [MPa]	ϵ [%]	W [J]
1	10.6	20.8	4270	26.1	0.6	0.25
2	10.6	20.8	4310	31.6	0.7	0.34
3	10.6	20.8	4660	28.7	0.6	0.28
4	10.6	20.8	4210	27.3	0.7	0.28
5	10.6	20.8	4540	28.2	0.7	0.27
\bar{x}	10.6	20.8	4400	28.4	0.7	0.29
s	0	0	193	2.07	0	0.04
v	0	0	4.4	7.30	6.63	12.52



Obr. 52: Vzorky po zkoušce ohybem

7.2 Zkouška odlupem

Zkouška se prováděla modifikací zkoušky třibodovým ohybem opět na zkušebním stroji ZWICK 1456, ale tentokrát dle normy ISO 4578. Testované vzorky byly položeny na podpěry s rozpětím 70 mm, kdy na jednu vnější vrstvu o rozměrech 50x150 mm působil trn při konstantní rychlosti 10 mm/min. Byla zde měřena maximální síla, potřebná k porušení soudržnosti vnější vrstvy laminátu a jádra sendvičového materiálu. Samotná zkouška měla dvě modifikace – tlakovou a tahovou. Tlaková byla použita u vzorků č. 2, 3, 5 a 7, které měly tuhou vnější vrstvu. Tahová byla použita pro vzorky č. 1, 4 a 6 s ohebnou vnější vrstvou. Pro každý druh sendviče bylo provedeno 5 měření. Měření probíhalo za pokojové teploty.

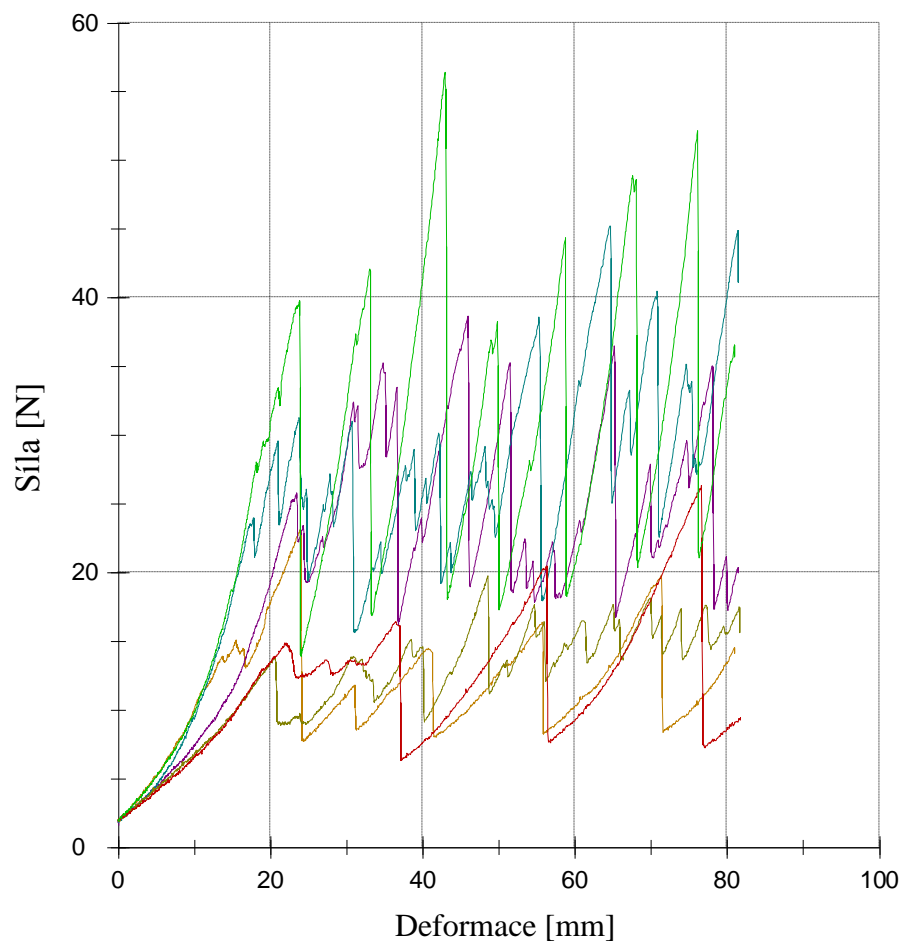


Obr. 53: Zkouška odlupem – tlaková modifikace

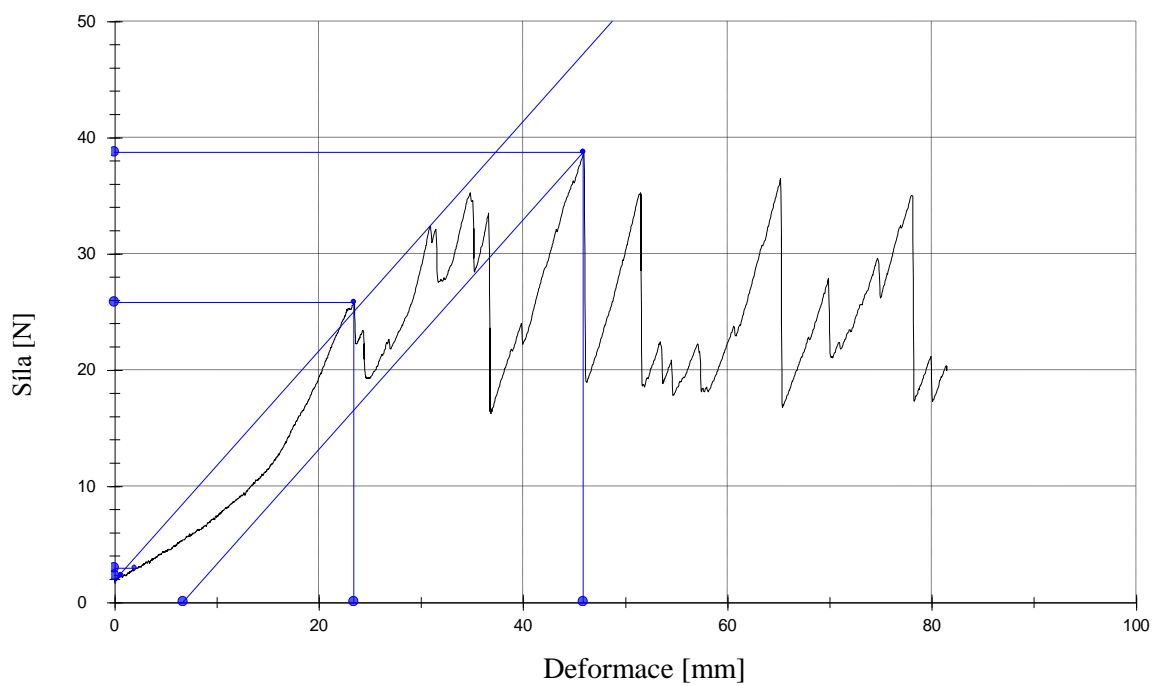
7.2.1 Naměřené výsledky při zkoušce odlupem

Tab. 22: Naměřené hodnoty při odlupu u vzorku č. 1

n	a_0 [mm]	b_0 [mm]	F_{\max} [N]	W_m [J]
1	50	50	23.1	0.04
2	50	50	38.7	0.14
3	50	50	45.2	0.23
4	50	50	19.8	0.08
5	50	50	26.4	0.15
\bar{x}	50	50	30.64	0.13
s	0	0	10.83	0.07
v	0	0	35.35	48.96



Obr. 54: Průběh odlupu pro 5 měření u vzorku č. 1



Obr. 55: Průběh odlupu pro 2. měření u vzorku č. 1

Tab. 23: Naměřené hodnoty při odlupu u vzorku č. 2

n	a_0 [mm]	b_0 [mm]	F_{\max} [N]	W_m [J]
1	30	50	39.8	0.039
2	30	50	69.8	0.052
3	30	50	62.9	0.034
4	30	50	78.1	0.044
5	30	50	73.4	0.026
\bar{x}	30	50	64.8	0.038
s	0	0	15.0	0.009
v	0	0	23.22	24.83

Tab. 24: Naměřené hodnoty při odlupu u vzorku č. 3

n	a_0 [mm]	b_0 [mm]	F_{\max} [N]	W_m [J]
1	30	50	97.9	0.03
2	30	50	92.4	0.02
3	30	50	102.0	0.08
4	30	50	131.0	0.05
5	30	50	133.0	0.09
\bar{x}	30	50	111.0	0.05
s	0	0	19.2	0.03
v	0	0	17.31	55.36

Tab. 25: Naměřené hodnoty při odlupu u vzorku č. 4

n	a_0 [mm]	b_0 [mm]	F_{\max} [N]	W_m [J]
1	50	50	49.5	0.15
2	50	50	38.6	0.30
3	50	50	45.2	0.12
4	50	50	38.0	0.17
5	50	50	40.8	0.25
\bar{x}	50	50	42.4	0.20
s	0	0	4.85	0.08
v	0	0	11.45	38.01

Tab. 26: Naměřené hodnoty při odlupu u vzorku č. 5

n	a_0 [mm]	b_0 [mm]	F_{\max} [N]	W_m [J]
1	30	50	230.0	0.10
2	30	50	177.0	0.15
3	30	50	199.0	0.15
4	30	50	160.0	0.06
5	30	50	179.0	0.07
\bar{x}	30	50	189.0	0.10
s	0	0	26.7	0.04
v	0	0	14.1	39.26

Tab. 27: Naměřené hodnoty při odlupu u vzorku č. 6

n	a_0 [mm]	b_0 [mm]	F_{\max} [N]	W_m [J]
1	50	50	50.5	0.26
2	50	50	46.3	0.23
3	50	50	49.0	0.29
4	50	50	51.7	0.32
5	50	50	41.5	0.32
\bar{x}	50	50	47.8	0.28
s	0	0	4.05	0.04
v	0	0	8.47	13.34

Tab. 28: Naměřené hodnoty při odlupu u vzorku č. 7

n	a_0 [mm]	b_0 [mm]	F_{\max} [N]	W_m [J]
1	30	50	34.5	0.223
2	30	50	17.9	0.075
3	30	50	37.0	0.010
4	30	50	12.0	0.009
5	30	50	25.5	0.004
\bar{x}	30	50	25.4	0.064
s	0	0	10.7	0.093
v	0	0	41.95	144.58

7.3 Rázová zkouška

Rázová zkouška patřila mezi poslední zkoušku, které byly testované vzorky podrobeny. Zkouška byla provedena na padostroji ZWICK ROELL HIT 230F v souladu s normou ČSN EN ISO 6603-1. Zkouška fungovala na principu padajícího tlouku, kdy na testovaný vzorek dopadalo těleso o hmotnosti 23.17 kg z výšky 600 mm. Byla zde měřena síla, které bylo potřeba k proražení vzorku sendviče. Z důvodu nedostatku vzorků se zkoušely jen vzorky č. 5, 6 a 7. K dispozici byl i vzorek č. 3. Avšak u tohoto vzorku nastal problém. S tloučkou voštinového jádra 16 mm byl moc velký pro daný padostroj, tudíž u něj zkouška nemohla být uskutečněna. Pro každý vzorek byly vykonány 3 měření. Rozměry testovaných vzorků byly 100x100 mm. Měření probíhalo za pokojové teploty.

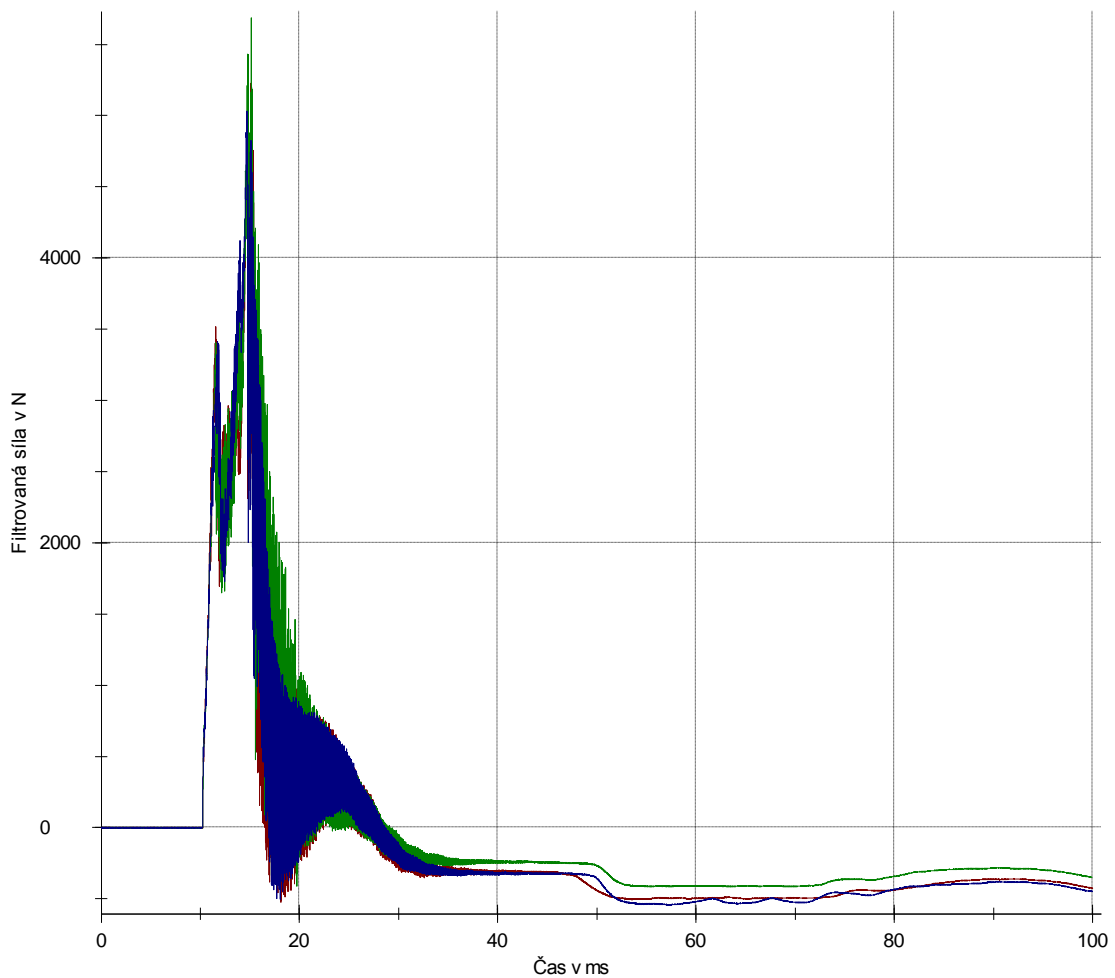


Obr. 56: Padostroj ZWICK ROELL HIT 230F

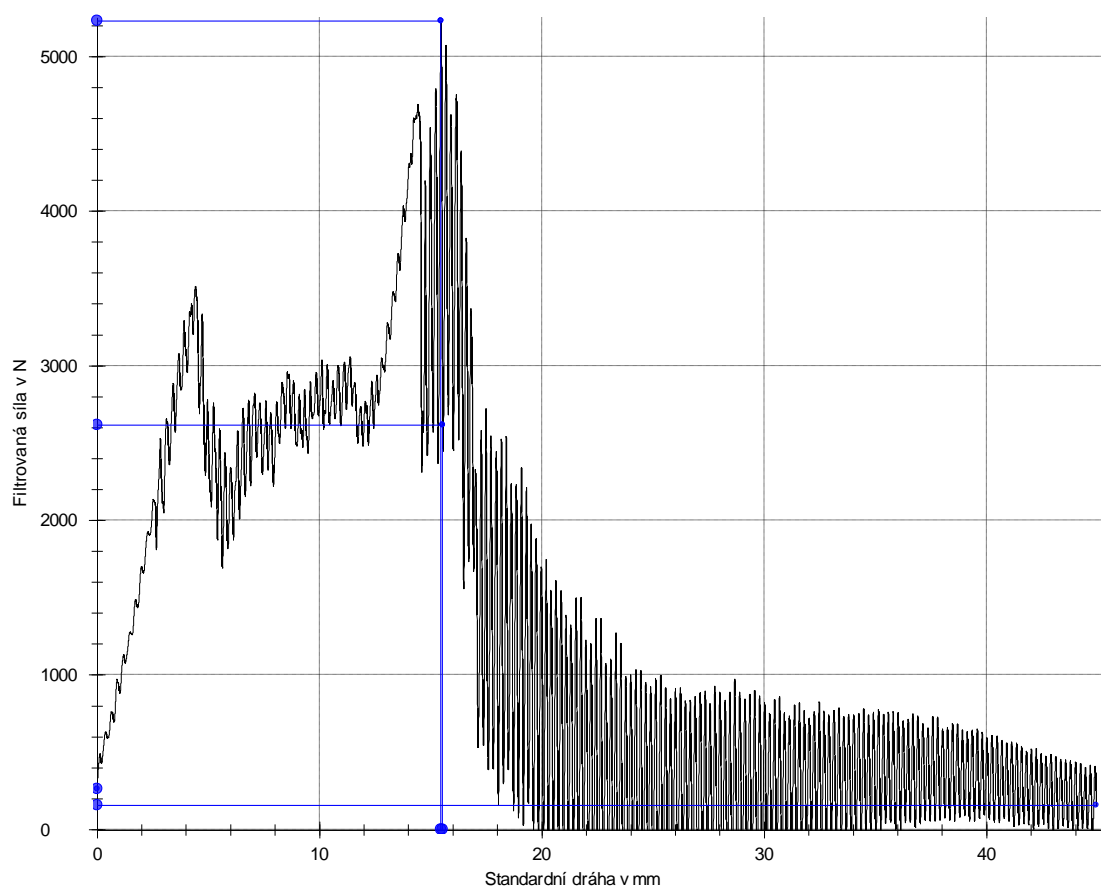
7.3.1 Naměřené výsledky při rázové zkoušce

Tab. 29: Naměřené hodnoty u rázové zkoušky pro vzorky č. 5, 6 a 7

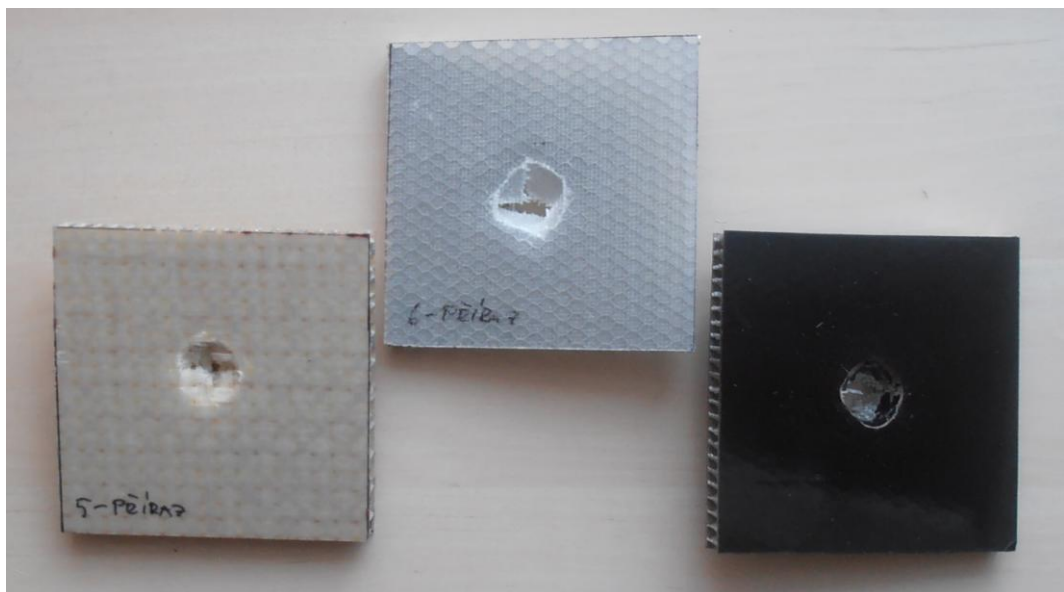
n	Vzorek č. 5			Vzorek č. 6			Vzorek č. 7		
	F_{\max} [N]	W_m [J]	W [J]	F_{\max} [N]	W_m [J]	W [J]	F_{\max} [N]	W_m [J]	W [J]
1	5227.48	39.92	57.22	2335.37	5.19	19.01	1815.60	5.18	17.86
2	5687.48	42.02	64.82	2690.17	6.72	18.48	1646.62	4.10	18.28
3	5032.67	37.42	60.39	2578.77	6.08	17.75	1710.52	6.27	17.27
\bar{x}	5315.88	39.79	60.81	2534.77	6.00	18.41	1724.24	5.18	17.80
s	336.24	2.30	3.82	181.45	0.77	0.64	85.32	1.09	0.51
v	6.33	5.79	6.28	7.16	12.79	3.45	4.95	2.93	2.86



Obr. 57: Průběh rázové zkoušky pro 3 měření u vzorku č. 5



Obr. 58: Průběh rázové zkoušky pro 1. měření u vzorku č. 5



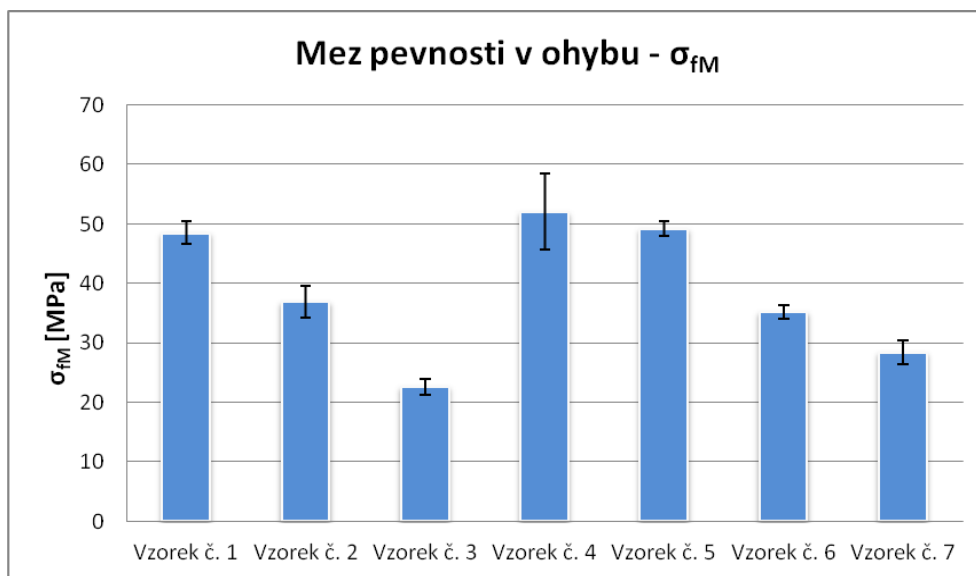
Obr. 59: Vzorky po rázové zkoušce

DISKUZE VÝSLEDKŮ

Pro zkoušku na tříbodový ohyb a odlup bylo provedeno pro každý vzorek 5 měření. Jen u rázové zkoušky z důvodu nedostatku vzorků a příliš velké tloušťky jádra u vzorku č. 3 byly testovány pouze 3 vzorky, kdy pro každý vzorek se provedly 3 měření (viz str. 66). Celkem bylo testováno 79 vzorků.

Zkouška tříbodovým ohybem

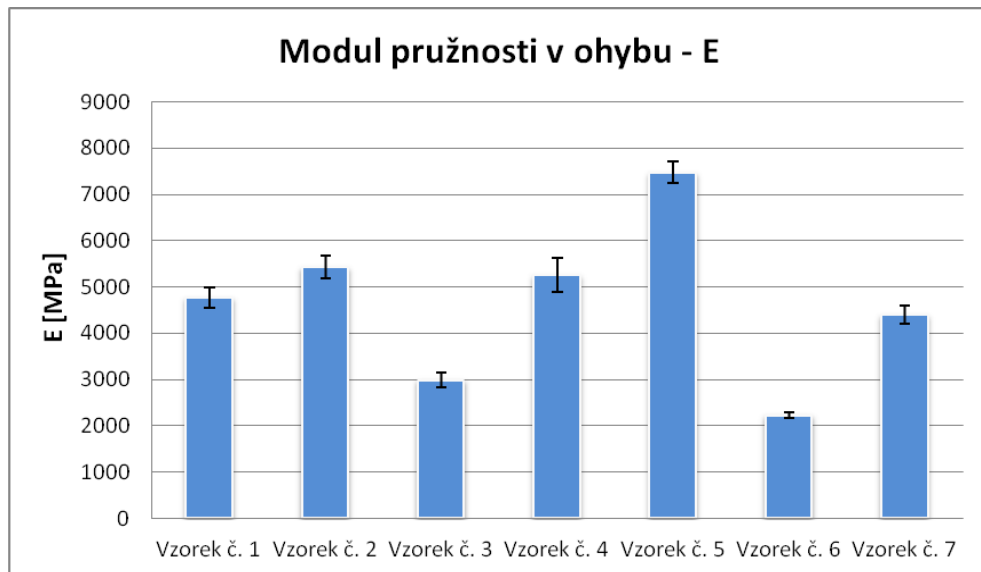
Při zkoušce na tříbodový ohyb byly zkoumány změny mechanických vlastností mezi jádrem a vnějšími vrstvami u daných vzorků. Tabulky 15-21 ukazují naměřené hodnoty pro všechny druhy vzorků včetně vyhodnocení aritmetických průměrů, směrodatných odchylek a variačních koeficientů. Nejvyšší průměrnou mez pevnosti v ohybu měl vzorek č. 4, jehož naměřena hodnota dosáhla 52 MPa. Jako druhý nejlépe dopadl vzorek č. 5 s hodnotou 49.2 MPa. Třetí nejvyšší hodnota byla naměřena 48.5 MPa u vzorku č. 1. Nejhorší výsledky měl vzorek č. 3, kde bylo naměřeno pouhých 22.6 MPa. Tento vzorek vykazoval o zhruba 56.5 % horší výsledek než vzorek č. 4. Porovnání jednotlivých výsledků je zobrazeno na obr. 60.



Obr. 60: Porovnání mezi pevnosti v ohybu u jednotlivých vzorků

Dále zde byl vyhodnocován modul pružnosti v ohybu, kde se zkoumalo, který vzorek má největší tuhost. Největší tuhost měl 7480 MPa vzorek č. 5. Druhá nejvyšší hodnota odpovídala 5430 MPa u vzorku č. 2. Za vzorkem č. 2 skončil vzorek č. 4, kde bylo naměřeno 5260 MPa. Rozdíl mezi daným vzorkem činí jen 170 MPa. Nejmenší tuhost 2230 MPa při-

padla vzorku č. 6. Přibližně se jednalo o 70.2 % méně než u vzorku č. 5. Porovnání výsledků je vidět na obr. 61.

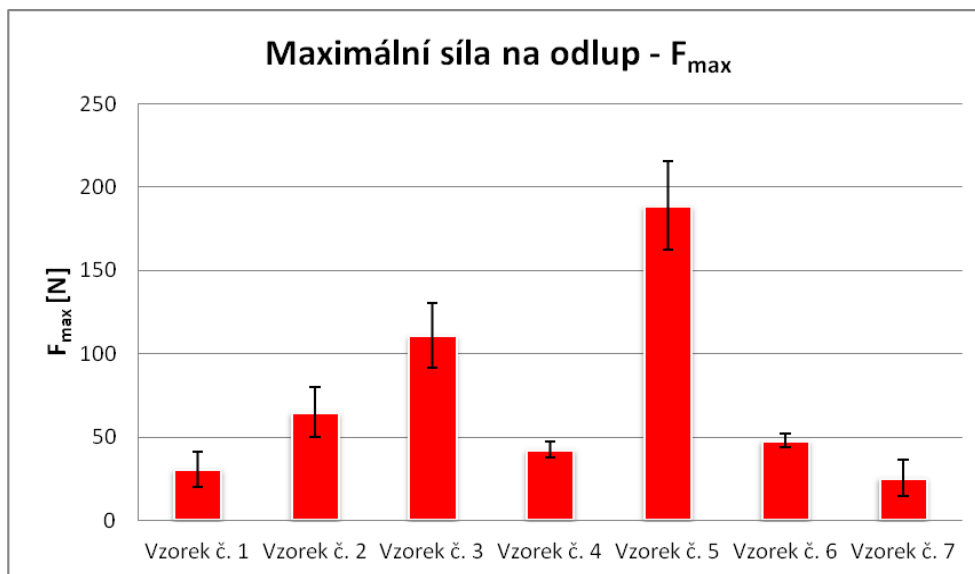


Obr. 61: Porovnání modulů pružnosti v ohybu u jednotlivých vzorků

Z výsledků vyplývá, že nejvyšší pevnost v ohybu má vzorek č. 4, zatímco nejvyšší modul pružnosti v ohybu patří vzorku č. 5, má totiž o 29.7 % lepší tuhost, a tím pádem lépe snese deformaci než předešlý vzorek.

Zkouška odlupem

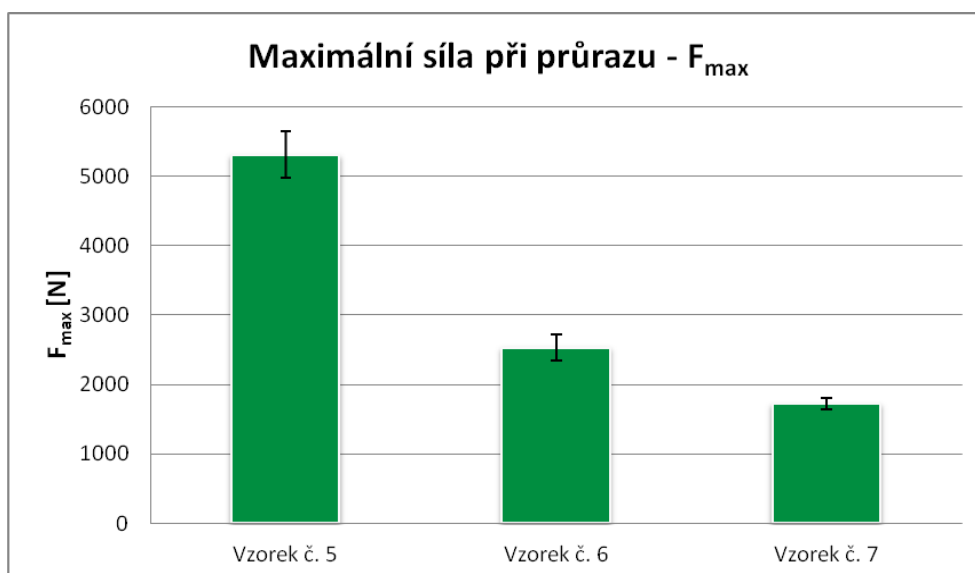
Při této zkoušce se měřila maximální síla na odlup. Tabulky 22-28 zobrazují naměřené hodnoty a také příslušné vyhodnocené parametry. Nejlépe při odlupu dopadl vzorek č. 5, který vykázal nejlepší soudržnost vnějších vrstev s jádrem. U tohoto vzorku byla naměřena průměrná hodnota maximální síly 189 N, potřebné k odlupu. Druhou nejvyšší hodnotu vykázal vzorek č. 3, u kterého se dosáhlo 111 N. Ostatní vzorky pak už měly mnohem nižší hodnoty v porovnání s těmito dvěma vzorky, přičemž nejhoršího výsledku 25.4 N bylo dosaženo u vzorku č. 7. Tento vzorek v porovnání se vzorkem č. 5 měl až o 86.6 % menší hodnotu. Následující obrázek mapuje jednotlivé vzorky v jejich vzájemném porovnání.



Obr. 62: Porovnání maximálních sil při odlupu u jednotlivých vzorků

Rázová zkouška

Při rázové zkoušce se zkoumala maximální síla, potřebná k průrazu vzorků. Jak je uvedeno na str. 66, byly testovány jen 3 vzorky, resp. vzorky č. 5, 6 a 7. U všech daných zkušebních vzorků došlo při testování k proražení (viz obr. 59). Při zjišťování velikosti této maximální síly, potřebné k proražení, se daná hodnota síly pohybovala v rozmezí 1.5 - 5.7 kN. Tabulka 29 shrnuje všechny naměřené a vyhodnocené hodnoty při této zkoušce.



Obr. 63: Porovnání maximálních sil při průrazu u jednotlivých vzorků

Z obr. 63 vyplývá, že nejlépe u této zkoušky dopadl vzorek č. 5, kdy byla naměřena průměrná maximální síla 5315.88 N. Měl o 52.3 % lepší výsledek než vzorek č. 6, který vyká-

zal 2534.77 N. Informaci o nejnižší síle 1724.24 N poskytla zkouška u vzorku č. 7, kde se jednalo o hodnotu o 67.6 % nižší než u vzorku č. 5.

Z výsledků získaných ze všech provedených zkoušek lze odvodit, že zde hraje velkou roli počet vyztužujících vrstev, ale také jakou pryskyřici daná výztuž obsahuje. Nejlepším vzorkem se jeví vzorek č. 5, jehož složení popisuje tabulka 12. Na obr. 60-62 je vidět, že vzorek č. 3 se stejným složením jako vzorek č. 5, pouze s větší tloušťkou jádra vykazuje oproti tomuto vzorku mnohem horší výsledky při zkoušce tříbodovým ohybem a odlupem, což vede k tomu, že i velikost tloušťky jádra může mít vliv na vlastnosti.

Nejlépe hodnocený vzorek by se mohl aplikovat například u konstrukcí dveří, podlah, přepážek a stropů u kolejových vozidel a letadel. Dále se může používat u předních i zadních nárazníků u automobilových vozidel. Ve stavebnictví by našel své místo při stavbách mostů, podchodů, tunelů, protihlukových stěn, ale také při výrobě dveří, stropů a výtahů v budovách. Ve sportovním odvětví může mít uplatnění při výrobě lyží, snowboardů, jachet a kajaků.

ZÁVĚR

Bakalářská práce se zabývá návrhem vhodného sendvičového kompozitního materiálu pro dopravní a stavební aplikace. Práce je rozdělena na dvě části.

V teoretické části jsou ze začátku popsány kompozitní materiály, jejich rozdělení a úloha matrice a výztuže. Dále je už práce zaměřena na sendvičové konstrukce, kde se nejvíce věnuje pozornost voštinovým jádrům. Na konci teoretické části jsou popsány jednotlivé výrobní technologie.

V praktické části jsou nejprve uvedeny jednotlivé vybrané materiály, které byly použity při výrobě jednotlivých vzorků. Dále se v této části zmiňuje výroba vzorků, jejich jednotlivá složení, testování zkušebních vzorků a jejich vzájemné porovnání.

Všechny vzorky byly vyráběny technologií lisování prepregů pomocí vakua neboli prepreg technologie. Výhody této výrobní technologie spočívají v tom, že pracovník může při výrobě dosáhnout velkého obsahu výztuže a také velmi vysoké kvality výrobků. Naopak mezi nevýhody patří cena materiálu a pomalý proces výroby, který vyžaduje velmi zručnou pracovní sílu. Firma Form s. r. o. má již s touto technologií hodně zkušeností.

Pro testování a zkoumání mechanických vlastností zkušebních vzorků byla zvolena zkouška třibodovým ohybem, její modifikace zkouška odlupem a metoda padajícího tlouku, rázová zkouška. Testované vzorky se lišily počtem vnějších vrstev a druhem použitých prepregů. Jádro hliníkové voštiny mělo u všech vzorků tloušťku 9 mm, avšak u vzorku č. 3, tloušťka jádra činila 16 mm. Všechny zkoušky se prováděly podle příslušných norem a naměřené hodnoty byly sepsány do tabulek. Dále jsou zde zobrazeny grafy, které popisují průběhy jednotlivých zkoušek, získané pomocí softwaru, který byl k dispozici při testování v laboratoři. Zbývající grafy jsou umístěny na CD, které je přiloženo k této práci.

Z výsledků měření je patrné, že pro získání co nejlepších mechanických vlastností u sendvičové konstrukce je nutné zvolit optimální počet vrstev výztuže, druh pryskyřice a také tloušťku jádra.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] DAŘOUREK, Karel. *Kompozitní materiály – druhy a jejich užití*. Liberec, Technická univerzita v Liberci, 2007, 114 s.
- [2] Ime.fme.vutbr.cz [online]. [cit. 2012-12-08]. *Kompozitní materiály*. Dostupné z WWW: <<http://ime.fme.vutbr.cz/Files/Vyuka/BUM/11-BUM.ppt>>
- [3] Ft.vslib.cz [online]. [cit. 2012-12-08]. *Netkané textilie a kompozitní materiály*. Dostupné z WWW:
<http://www.ft.vslib.cz/depart/knt/nove/dokumenty/studmaterialy/mint/I_2.ppt>
- [4] Kmt.tul.cz [online]. [cit. 2012-12-08]. *Kompozitní materiály, definice a rozdělení*. Dostupné z WWW:
<http://www.kmt.tul.cz/edu/podklady_kmt_magistri/KM/Kompozity%20Dad/02defrozdz.pdf>
- [5] Volny.cz [online]. [cit. 2012-12-11]. *Definice a historie kompozitů*. Dostupné z WWW: <<http://www.volny.cz/zkorinek/historie.pdf>>
- [6] Volny.cz [online]. [cit. 2012-12-11]. *Matrice*. Dostupné z WWW:
<<http://www.volny.cz/zkorinek/matrice.pdf>>
- [7] EHRENSTEIN, Gottfried W. *Polymerní kompozitní materiály*. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009, 351 s. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [8] Kme.zcu.cz [online]. [cit. 2012-12-12]. *Mechanika kompozitních materiálů - 1*. Dostupné z WWW: <<http://www.kme.zcu.cz/download/predmety/229-umm-6.pdf>>
- [9] Stefanmichna.com [online]. [cit. 2012-12-13]. *Kompozitní materiály*. Dostupné z WWW:
<http://www.stefanmichna.com/download/technicke-materialy_II/kompozitni_materialy.pdf>
- [10] Havel-composites.com [online]. [cit. 2012-12-13]. *Všeobecný a základní popis materiálů používaných při výrobě kompozitů*. Dostupné z WWW: <<http://www.havel-composites.com/clanky/0-/74-Vseobecny-a-zakladny-popis-materialov-pouzivanych-pri-vyrobe-kompozitov.html>>
- [11] Volny.cz [online]. [cit. 2012-12-17]. *Vlákna*. Dostupné z WWW:
<<http://www.volny.cz/zkorinek/vlakna.pdf>>

- [12] RUSNÁKOVÁ, Soňa. *Zpracovatelské inženýrství kompozitů*. Přednášky 2012
- [13] Gurit.com [online]. [cit. 2012-12-18]. *Guide to Composites*. Dostupné z WWW: <[http://www.gurit.com/files/documents/Gurit_Guide_to_Composites\(1\).pdf](http://www.gurit.com/files/documents/Gurit_Guide_to_Composites(1).pdf)>
- [14] FABRIGER, Daniel. *Technologie výroby sendvičových kompozitních struktur Vakuovou infuzí pod pružnou folii*. 2011. 124 s. Diplomová práce.
- [15] Mmspektrum.com [online]. [cit. 2013-01-05]. *Sendvičové konstrukce*. Dostupné z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/sendvicove-konstrukce.html>>
- [16] Netcomposites.com [online]. [cit. 2013-01-10]. *Wood Cores*. Dostupné z WWW: <<http://www.netcomposites.com/guide/wood-cores/47>>
- [17] Elbercomposites.com [online]. [cit. 2013-01-10]. *Balsa Core Advancement*. Dostupné z WWW: <<http://www.ebertcomposites.com/news2006.html>>
- [18] Wikipedia.com [online]. [cit. 2013-01-11]. *Voština*. Dostupné z WWW: <[http://cs.wikipedia.org/wiki/Voština_\(kompozit\)](http://cs.wikipedia.org/wiki/Voština_(kompozit))>
- [19] Ateam.zcu.cz [online]. [cit. 2013-01-11]. *Kompozitní materiály*. Dostupné z WWW: <http://www.ateam.zcu.cz/download/kompozity09_10.pdf>
- [20] Course1.winona.edu [online]. [cit. 2013-01-14]. *Honeycomb Selector Guide*. Dostupné z WWW: <<http://course1.winona.edu/kdennehy/ENGR390/Topics/sandwich/HEXWEBSELECTORGUIDE.pdf>>
- [21] Netcomposites.com [online]. [cit. 2013-01-14]. *Honeycomb Cores*. Dostupné z WWW: <<http://www.netcomposites.com/guide/honeycomb-cores/46>>
- [22] Alhoneycomb.cn [online]. [cit. 2013-01-16]. *Aluminium Honeycomb*. Dostupné z WWW: <http://www.form-composite.com/sortiment_zeleznice.htm>
- [23] Ecplaza.net [online]. [cit. 2013-01-16]. *Nomex Honeycomb*. Dostupné z WWW: <<http://www.ecplaza.net/product/nomex-honeycomb--259166-2000943.html>>
- [24] 339.vsb.cz [online]. [cit. 2013-01-18]. *Polymery*. Dostupné z WWW: <http://www.339.vsb.cz/nauka_o_materialu/Slide13_Polymery.pdf>
- [25] Frponline.com [online]. [cit. 2013-01-19]. *KAPEX C51 Industrial Foam Sandwich*. Dostupné z WWW: <http://www.frponline.com/sell/detail_263.html>

- [26] Directindustry.com [online]. [cit. 2013-01-21]. *PET foam core material for composites*. Dostupné z WWW: <<http://www.directindustry.com/prod/armacell-benelux-sa/pet-foam-core-materials-for-composites-51060-355060.html>>
- [27] Wikipedia.com [online]. [cit. 2013-01-21]. *Sendvič*. Dostupné z WWW: <[http://cs.wikipedia.org/wiki/Sendvič_\(laminát\)](http://cs.wikipedia.org/wiki/Sendvič_(laminát))>
- [28] Form-composite.com [online]. [cit. 2013-01-21]. *Železniční průmysl - konstrukční prvky pro kolejová vozidla*. Dostupné z WWW: <http://www.form-composite.com/sortiment_zeleznice.htm>
- [29] Reinforcedplastics.com [online]. [cit. 2013-01-21]. *Carbon fibre market poised for expansion*. Dostupné z WWW: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034361711702168>>
- [30] Havel-composites.com [online]. [cit. 2013-01-22]. *Technologie výroby kompozitů*. Dostupné z WWW: <<http://www.havel-composites.com/clanky/0-/76-Technologie-jejichpopis-%20%20a-schemata.html>>
- [31] Mendelu.cz [online]. [cit. 2013-01-22]. *Úvod do materiálového inženýrství polymerních kompozitů*. Dostupné z WWW: <http://wood.mendelu.cz/cz/sections/Props/files/verejny/MVD/Jancar%20-%20Uvod%20do%20materialoveho%20inzenyrstvi%20kompozitu/skripta_5.doc>
- [32] Volny.cz [online]. [cit. 2013-01-23]. *Technologie*. Dostupné z WWW: <<http://www.volny.cz/zkorinek/technologie.pdf>>
- [33] Tsrl.soton.ac.uk [online]. [cit. 2013-01-25]. *Zen and the art of vacuum infusion*. Dostupné z WWW: <<http://tsrl.soton.ac.uk/userinformation/docs/VacuumInfusionPoster.pdf>>
- [34] Directindustry.com [online]. [cit. 2013-01-25]. *Autoclave*. Dostupné z WWW: <<http://www.directindustry.com/prod/aeroform-france/autoclaves-37675-317866.html>>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

ε	Poměrná deformace	[%]
ν_m	Poissonova konstanta	[-]
ρ	Hustota	[kg/m ³]
ρ_s	Hustota polymeru v pevné fázi	[kg/m ³]
σ_{fL}	Pevnost v tahu	[MPa]
σ_{fM}	Pevnost v ohybu	[MPa]
a_0	Tloušťka	[mm]
ABS	Akrylonitrilbutadienstyren	[-]
b_0	Šířka	[mm]
E	Modul pružnosti	[MPa]
E_{fL}	Modul pružnosti v podélném směru	[MPa]
E_{fT}	Modul pružnosti v příčném směru	[MPa]
E_S	Modul pružnosti kompaktního polymeru	[MPa]
EP	Epoxidová pryskyřice	[-]
F_{max}	Maximální síla při odlupu, průrazu	[N]
FST	Fire-Smoke-Toxicity	[-]
G_{fL}	Modul pružnosti ve smyku	[MPa]
HS	High-Strength	[-]
HM	High-Modulus	[-]
l	Velikost buňky	[mm]
L-Dir.	L-Direction	[-]
n	Číslo měření	[-]
PA	Polyamid	[-]
PC	Polykarbonát	[-]

PE	Polyethylen	[-]
PET	Polyetylentereftalát	[-]
PP	Polypropylén	[-]
PS	Polystyren	[-]
PUR	Polyuretan	[-]
PVC	Polyvinylchlorid	[-]
RIP	Resin Injection Pultrusion	[-]
RTM	Resin Transfer Moulding	[-]
s	Směrodatná odchylka	[-]
SAN	Styrenakrylonitril	[-]
t	Tloušťka stěny	[mm]
T_{\max}	Maximální teplota	[°C]
UP	Polyesterová pryskyřice	[-]
USD	United States Dollar	[-]
UV	Ultrafialové záření	[-]
v	Variační koeficient	[%]
VE	Vinylesterová pryskyřice	[-]
W	Celková mechanická práce	[J]
W_m	Mechanická práce při dosažení maximální síly	[J]
W-Dir.	W-Direction	[-]
\bar{x}	Aritmetický průměr	[-]

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1: Příklady přírodních kompozitních materiálů [2]	12
Obr. 2: Synergický efekt kompozitu [4]	14
Obr. 3: Rozdělení kompozitních materiálů podle geometrie a orientace výztuže [5].....	14
Obr. 4: Aramidové, uhlíkové a skleněné vlákno [8].....	16
Obr. 5: a) Plátňová vazba, b) Košíková vazba, c) Keprová vazba, d) Atlasová vazba [13]	18
Obr. 6: Sendvičový panel (A - vnější vrstva, B - adhezni vrstva, C – voštinové jádro) [12]	19
Obr. 7: Zatížení sendvičové konstrukce na ohyb [13]	20
Obr. 8: Prepreg [12]	22
Obr. 9: Dřevěné jádro - překližka [2, 12].....	23
Obr. 10: Balzové jádro [17]	23
Obr. 11: Typy voštin [12]	24
Obr. 12: Skládaná voština [12]	24
Obr. 13: Postup výroby plechové voštiny [12]	25
Obr. 14: a) Šestihranná voština, b) OX-Core voština, c) Flex-Core voština, d) Double-Flex voština [20].....	26
Obr. 15: Způsoby zatěžování voštin [12].....	27
Obr. 16: Hliníková voština [22].....	27
Obr. 17: Nomex voština [23]	28
Obr. 18: Polymerní pěny [25]	29
Obr. 19: a) honeycomb, b) pěna s otevřenými buňkami, c) pěna s uzavřenými buňkami [12]	29
Obr. 20: a) Lineárně zesíťovaná PVC pěna, b) PET pěna, c) Sendvič s jádrem z PS pěny [12, 26, 27].....	31
Obr. 21: Kryt hlavního podvozku Aero Ae-270 [12]	32
Obr. 22: Kompozitní pancíř tanku M1A1 Adams tvořený sendvičovou strukturou oceli-plastu-keramiky-plastu-oceli [19]	32
Obr. 23: Sendvičová konstrukce střechy autobusů [12]	33
Obr. 24: Konstrukční díly pro kolejová vozidla [28].....	33
Obr. 25: Lyže od Audi s dřevěným jádrem a vrstvami hliníku a titanu [29]	33

Obr. 26: Ruční kladení [13]	34
Obr. 27: Nanášení sprayem [13]	35
Obr. 28: Lisování se vstříkem - RTM [12]	36
Obr. 29: Vakuová infúze pod pružnou fólií [33]	37
Obr. 30: Pultruze [32]	38
Obr. 31: Lisování prepregů pomocí vakua [13].....	40
Obr. 32: Autokláv [34].....	41
Obr. 33: Hliníková voština ECM 6.4-82.....	44
Obr. 34: Prepreg PHG840N-F300-47	45
Obr. 35: Prepreg PHG840N-G123-40	45
Obr. 36: Pomocné komponenty	47
Obr. 37: Příprava prepregu	48
Obr. 38: Příprava voštiny	48
Obr. 39: Jádru hliníkové voštiny umístěné na jedné vrstvě prepregu.....	49
Obr. 40: Odsávací rohož s ventily.....	49
Obr. 41: Pokládání vakuové fólie	50
Obr. 42: Pohled na vytvořené vakuum.....	50
Obr. 43: Pohledová strana vzorku č. 1	51
Obr. 44: Nalisované dorazy u vzorku č. 4.....	53
Obr. 45: Vyrobený vzorek č. 7.....	55
Obr. 46: Vytvrzovací režim pro vzorky č. 1 - 5	55
Obr. 47: Vytvrzovací režim pro vzorky č. 6 a 7.....	56
Obr. 48: Orýsované sendvičové desky vzorku č. 4 a 5	56
Obr. 49: Zkušební stroj ZWICK 1456	57
Obr. 50: Zkouška tříbodovým ohybem	58
Obr. 51: Průběh tříbodového ohybu pro 5 měření u vzorku č. 1	59
Obr. 52: Vzorky po zkoušce ohybem.....	61
Obr. 53: Zkouška odlupem – tlaková modifikace.....	62
Obr. 54: Průběh odlupu pro 5 měření u vzorku č. 1	63
Obr. 55: Průběh odlupu pro 2. měření u vzorku č. 1	63
Obr. 56: Padostroj ZWICK ROEL HIT 230F.....	66
Obr. 57: Průběh rázové zkoušky pro 3 měření u vzorku č. 5.....	67
Obr. 58: Průběh rázové zkoušky pro 1. měření u vzorku č. 5.....	68

Obr. 59: Vzorky po rázové zkoušce.....	68
Obr. 60: Porovnání mezí pevnosti v ohybu u jednotlivých vzorků	69
Obr. 61: Porovnání modulů pružnosti v ohybu u jednotlivých vzorků.....	70
Obr. 62: Porovnání maximálních sil při odlupu u jednotlivých vzorků	71
Obr. 63: Porovnání maximálních sil při průrazu u jednotlivých vzorků	71

SEZNAM TABULEK

Tab. 1: Vlastnosti různých druhů pryskyřic [8]	15
Tab. 2: Vlastnosti různých materiálů vláken [12].....	17
Tab. 3: Porovnání pevnosti v ohybu a tuhosti [12].....	21
Tab. 4: Mechanické vlastnosti voštiny ECM 6.4-82 [Příloha PI].....	44
Tab. 5: Mechanické vlastnosti PHG840N-F300-47 za pokojové teploty [Příloha PII]	45
Tab. 6: Mechanické vlastnosti PHG840N-G123-40 za pokojové teploty [Příloha PIII]	46
Tab. 7: Fyzikální vlastnosti HPL [Příloha PVI].....	47
Tab. 8: Sendvičová konstrukce vzorku č. 1	51
Tab. 9: Sendvičová konstrukce vzorku č. 2	52
Tab. 10: Sendvičová konstrukce vzorku č. 3	52
Tab. 11: Sendvičová konstrukce vzorku č. 4	53
Tab. 12: Sendvičová konstrukce vzorku č. 5	53
Tab. 13: Sendvičová konstrukce vzorku č. 6	54
Tab. 14: Sendvičová konstrukce vzorku č. 7	54
Tab. 15: Naměřené hodnoty tříbodovým ohybem u vzorku č. 1.....	58
Tab. 16: Naměřené hodnoty tříbodovým ohybem u vzorku č. 2.....	59
Tab. 17: Naměřené hodnoty tříbodovým ohybem u vzorku č. 3.....	60
Tab. 18: Naměřené hodnoty tříbodovým ohybem u vzorku č. 4.....	60
Tab. 19: Naměřené hodnoty tříbodovým ohybem u vzorku č. 5.....	60
Tab. 20: Naměřené hodnoty tříbodovým ohybem u vzorku č. 6.....	61
Tab. 21: Naměřené hodnoty tříbodovým ohybem u vzorku č. 7.....	61
Tab. 22: Naměřené hodnoty při odlupu u vzorku č. 1	62
Tab. 23: Naměřené hodnoty při odlupu u vzorku č. 2	64
Tab. 24: Naměřené hodnoty při odlupu u vzorku č. 3	64
Tab. 25: Naměřené hodnoty při odlupu u vzorku č. 4	64
Tab. 26: Naměřené hodnoty při odlupu u vzorku č. 5	65
Tab. 27: Naměřené hodnoty při odlupu u vzorku č. 6	65
Tab. 28: Naměřené hodnoty při odlupu u vzorku č. 7	65
Tab. 29: Naměřené hodnoty u rázové zkoušky pro vzorky č. 5, 6 a 7	67

SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha PI Technický list ECM 6.4-82
- Příloha PII Technický list PHG840N-F300-47
- Příloha PIII Technický list PHG840N-G123-40
- Příloha PIV Technický list TV 45 EMT 125 Plus
- Příloha PV Technický list Epoxy Resin EMT 125 Plus
- Příloha PVI Technický list HPL
- Příloha PVII CD-disk

PŘÍLOHA P I: TECHNICKÝ LIST ECM 6.4-82



EURO-COMPOSITES®

Aluminium honeycomb

Technical Data Sheet for ECM 6.4-82

Material: Alu-Alloy 3003 (AlMnCu)

Coating: Zirconium oxide

Mechanical Properties	Unit	Test	Typical values
Foil Thickness	µm	ECP 231-04	80
Cell Size, Nominal	mm	DIN 29970	6,4
Density, Nominal	kg/m ³	DIN 29970	82
Compression Strength Unstab.	N/mm ²	DIN 53291	4,25
Compression Strength Stab.	N/mm ²	DIN 53291	4,50
Crush strength	N/mm ²	NHTSATP-24-214D-02*	1,665
Plate Shear Strength/ L-Dir.	N/mm ²	DIN 53294	2,40
Plate Shear Modul/ L-Dir.	N/mm ²	DIN 53294	430
Plate Shear Strength/ W-Dir.	N/mm ²	DIN 53294	1,40
Plate Shear Modul/ W-Dir.	N/mm ²	DIN 53294	220
Service Temperature	°C	-	-55 °C bis +177 °C

All Honeycomb Core approved according to: DNV-Certificate MED-B-4912 as Non-combustible materials according to SOLAS 74, 2000 HSC Code, IMO FTP Code

All Honeycomb ECM core types can be delivered, if required, as microperforated. These Aluminum core types are called ECM-P.

*- Thickness of test sheet: 25,40 mm



PHG840N-F300-47

- Fiber reinforced thermosetting prepreg material for railway parts (e.g. fairings, window, ceiling and floor panels).
- Woven fabric of E-glass filament yarn, 300 g/m², 8H satin, prepregged with 47% phenolic resin PH840N.
- Long shelf and shop life
- Excellent FST behaviour
- Excellent mechanical behaviour
- Good surface finish
- Autoclave-free processes possible
- Short curing time 10 min at 160°C
- Special adhesive side for Alu bonding

Description

PHG840N-F300-47 is a halogenfree modified phenolic system, designed for laminate with bright colour and good surface quality.

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

The resin matrix PHG840N can be cured at a temperature range between 120°C and 160°C. Monolithic and sandwich structures can be easily manufactured with this prepreg. The curing can be performed by press, vacuum and autoclave moulding with a pressure of at least 0.07 N/mm².

Such composite structures can be exposed easily to temperatures in the range of -55°C up to +80°C.

Cured laminates fulfil the flame-retardant Rail specifications:

- BS 476-6 and 7 Class 1, BS 6853 R. 025, NF-F 16-101/102 (M1, F1)
- UNE 23-721 (M1), DIN 5510 S4, SR2, ST2, DIN EN 45545 under testing

The prepreg material is suitable for:

- Rail industries
- Machine industries
- Marine and automotive applications

Prepreg Properties

	Test method	Value
Resin		Phenolic
Prepreg Weight	EN 2329	560 +/-30 g/m ²
Volatile	EN 2330 (160°C/10min)	< 6.0 %
Resin Flow	EN 2332 (3 plies, 135°C, 8min, 4 bar)	> 10 %
Tackiness		T0, T1, T2
Fibre Material		E-glass
Fabric Weight	EN 2331	296 g/m ² +/-5 %
Weave Style		8H satin
Service Temperature (Cured State)		-55°C to +80°C
Resin Content	EN 2331	47.0 +/-3%

Delivery Form and Storage

Prepreg sizes	Roll length / Roll width	50 / 1.0 + 1.27m
Storage Life (from delivery date)	Days at RT / Month at -18°C	30 / 24

Curing Conditions

	Crush Core	Standard Cycle
Temperature	120°C/140°C/160°C	120/130/140/160°C
Cure Time	50 min/20 min/10 min	90/60/30/10 min
Spec. Pressure	1.25 Mpa	0.07- 0.4 MPa
Heat-up	None (hot-in)	2 to 5 K/min
Cool-down	None (hot-out)	2 to 5 K/min
Remove material at	120°C/140°C/160°C	< 80°C
Recommended curing process	Press, Autoclave, Vacuum-bag	Vacuum bag / Oven, Press, Autoclave

Mechanical Properties (Typical Values)

	Temp. [°C]	Standard	Results	
Flexural Strength (warp)	RT 80	ISO 178	450 300	MPa
Flexural Modulus (warp)	RT 80	ISO 178	22 19	GPa
Tensile Strength (warp)		ISO 527-4		MPa
Tensile Modulus (warp)		ISO 527-4		GPa
Compressive Strength (warp)		EN 2850	-- --	MPa
Compressive Modulus (warp)		EN 2850		GPa
Interlaminar Tensile Shear Strength (warp)	RT 80	AITM 1.0019/1B	18 16	MPa
Interlaminar Shear Strength				
Bearing strength				
Climbing Drum Peel ¹	RT	EN 2243-3	110	N/75 mm
Bending Load (4-P.) ¹	RT 80	AITM 1.0018 Fig.2	1500 --	N
Tg		TMA	> 80	°C

1) Sandwich structure (6,4mm Alu honeycomp 126.5 kg/m³ MIL-C-7438)

Burning Behaviour

		Test method	Max. mean values	
Flammability vertical, 60s flaming	burn length	AITM 2.0002A	60	mm
	after flame time		5	s
	after flame time of drips		--	s
Flammability vertical, 12s flaming				
Max. specific optical smoke density within 4 min	flaming mode	AITM 2.0007A	5	Ds
Heat release		AITM 2.0006	25	kW m ²
Heat release rate		AITM 2.0006	25	kW*min m ²

Disclaimer

The materials, products and services of the Gurit Group sold by the respective legal entity (the "Company") of the Gurit Group are subject to the Standard Conditions of Sale of the Company which are available on request or may be viewed at the website: www.gurit.com. Nothing in this document or any data sheet, brochure, prospectus, etc. (hereinafter referred to as "Documents"), nor any instruction or advice given as referred to in the Documents shall be deemed to alter, vary, supersede or waive any provision of Company's Standard Conditions of Sale or this Disclaimer, unless any such modification is specially agreed to in writing and signed by Company.

Although any information, instruction or advice contained or referred to in the Documents is given in good faith, no warranty or guarantee, express or implied, is made(i) that the results described herein will be obtained, or (ii) that the information, instruction or advice (whether written or oral) is complete, accurate and useful. Nothing contained in the Documents constitutes a representation or warranty, whether expressed or implied, as to any matter whatsoever.

The user should make test panels and conduct appropriate testing of any goods or materials supplied by the Company to ensure that they are suitable for the user's planned application. Such testing should include testing under conditions as close as possible to those which the final component may be subjected. Each user bears full responsibility from making its own determination as to the suitability of the recommendations and advice obtained by the Company for its own particular use.

To the extent of mandatory law, the Company and the Gurit Group expressly disclaim any liability, whether in contract, warranty, tort, negligence, strict liability or otherwise, for any and all damages, losses, injuries, costs or expenses resulting directly or indirectly from the reliance on any information contained in the Documents or from any advice (whether written or oral) given as referred to in the Documents.

The Company reserves the right to change specifications and prices without notice and users should satisfy themselves that the information used is that which is currently published by the Company or the Gurit Group on the website. Any queries may be addressed to the Technical Services Department.

The Gurit Group is continuously reviewing and updating the Documents. Please ensure that you have the current version, by contacting Gurit Marketing Communications or your sales contact and quoting the revision number in the bottom middle of this page.

Gurit (Zullwil) AG

Fabrikweg 54
CH-4234 Zullwil
Switzerland

T +41 (0) 61 795 06 01
F +41 (0) 61 795 06 04

Gurit (Kassel) GmbH

Otto-Hahn-Str. 5
D-34123 Kassel
Germany

T +49 (0) 561 99 85 63 0
F +49 (0) 561 99 85 63 22

E info@gurit.com
W www.gurit.com

PŘÍLOHA P III: TECHNICKÝ LIST PHG840N-G123-40



Provisional

PHG840N-G213-40

- Fiber reinforced thermosetting prepreg material.
- Woven fabric of E-glass roving, US Style 590, plain weave prepreg with 40 % phenolic resin PHG840N
- Excellent FST behaviour
- Easy process ability and handling
- Long shelf and shop life
- Cure Temperature between 125°C and 155°C

Description

PHG840N-G213-40 consists of an E-glass fabric, impregnated with the phenolic resin PHG840N.

This resin is a halogen-free and self-adhesive phenolic system designed for wide variety of manufacturing processes, retarded flow during curing, excellent heat-release and smoke-density properties.

Composite structures are self-extinguishing under fire conditions. Monolithic structures can be easily manufactured with this prepreg. The curing can be performed by press,

vacuum and autoclave moulding with a pressure of at least 0.07 MPa.

The prepreg material is suitable for:

- Aviation and aerospace industries
- Railway transport and machine industries systems
- Marine and automotive applications

Prepreg Properties

	Test method	Value
Resin		Phenolic
Prepreg Weight	EN 2329	1367 +-50 g/m ²
Volatile	EN 2330	< 8.0 %
Resin Flow	EN 2332	> 10 %
Tackiness		low to medium
Fibre Material		E-glass
Fabric Weight	EN 2331	820 g/m ² +-5 %
Weave Style		plain weave
Service Temperature (Cured State)		-55°C to +90°C
Resin Content	EN 2331	40 +-3%

Delivery Form and Storage

Prepreg sizes	Roll length / Roll width	25 / 1.0 - 1.27 m
Storage Life (from delivery date)	Days at RT / Month at -18°C	30 / 24

Curing Conditions

	Crush Core	Standard Cycle
Temperature	120°C/140°C/160°C	125/135/155°C
Cure Time	50 min/20 min/10 min	120/75/30min
Spec. Pressure	1.25 Mpa	0.4 MPa
Heat-up	None (hot-in)	3K/min from 60°C (max)
Cool-down	None (hot-out)	4K/min to 60°C
Remove material at	120°C/140°C/160°C	at least 60°C
Recommended curing process	Press, Autoclave, Vacuum-bag	Press, Autoclave, Vacuum-bag

Mechanical Properties (Provisional)

	Temp. [°C]	Standard	Results	
Flexural Strength (warp)	RT	ISO 178	400	MPa
Flexural Modulus (warp)	RT	ISO 178	20	GPa
	80		--	
Tensile Strength (warp)		ISO 527-4		MPa
Tensile Modulus (warp)		ISO 527-4		GPa
Compressive Strength (warp)		EN 2850	--	MPa
			--	
Compressive Modulus (warp)		EN 2850		GPa
Interlaminar Tensile Shear Strength (warp)	RT	AITM 1.0019/1B	20	MPa
	80		--	
Interlaminar Shear Strength				
Bearing strength				
Climbing Drum Peel ¹		EN 2243-3		N/75 mm
Bending Load (4-P.) ¹	RT	AITM 1.0018 Fig.2	--	N
	80		--	
Tg		TMA	>80	°C

1)Sandwich structure

Burning Behaviour

		Test method	Max. mean values	
Flammability vertical, 60s flaming	burn length after flame time after flame time of drips	AITM 2.0002A	60 5 --	mm s s
Flammability vertical, 12s flaming				
Max. specific optical smoke density within 4 min	flaming mode	AITM 2.0007A	5	Ds
Heat release		AITIM 2.0006	25	kW m ²
Heat release rate		AITIM 2.0006	25	kW ² min m ²

Disclaimer

The materials, products and services of the Gurit Group sold by the respective legal entity (the "Company") of the Gurit Group are subject to the Standard Conditions of Sale of the Company which are available on request or may be viewed at the website: www.gurit.com. Nothing in this document or any data sheet, brochure, prospectus, etc. (hereinafter referred to as "Documents"), nor any instruction or advice given as referred to in the Documents shall be deemed to alter, vary, supersede or waive any provision of Company's Standard Conditions of Sale or this Disclaimer, unless any such modification is specially agreed to in writing and signed by Company.

Although any information, instruction or advice contained or referred to in the Documents is given in good faith, no warranty or guarantee, express or implied, is made(i) that the results described herein will be obtained, or (ii) that the information, instruction or advice (whether written or oral) is complete, accurate and useful. Nothing contained in the Documents constitutes a representation or warranty, whether expressed or implied, as to any matter whatsoever.

The user should make test panels and conduct appropriate testing of any goods or materials supplied by the Company to ensure that they are suitable for the user's planned application. Such testing should include testing under conditions as close as possible to those which the final component may be subjected. Each user bears full responsibility for making its own determination as to the suitability of the recommendations and advice obtained by the Company for its own particular use.

To the extent of mandatory law, the Company and the Gurit Group expressly disclaim any liability, whether in contract, warranty, tort, negligence, strict liability or otherwise, for any and all damages, losses, injuries, costs or expenses resulting directly or indirectly from the reliance on any information contained in the Documents or from any advice (whether written or oral) given as referred to in the Documents.

The Company reserves the right to change specifications and prices without notice and users should satisfy themselves that the information used is that which is currently published by the Company or the Gurit Group on the website. Any queries may be addressed to the Technical Services Department.

The Gurit Group is continuously reviewing and updating the Documents. Please ensure that you have the current version, by contacting Gurit Marketing Communications or your sales contact and quoting the revision number in the bottom middle of this page.

Gurit (Zullwil) AG

Fabrikweg 54
CH-4234 Zullwil
Switzerland

T +41 (0) 61 795 06 01
F +41 (0) 61 795 06 04

Gurit (Kassel) GmbH

Otto-Hahn-Str. 5
D-34123 Kassel
Germany

T +49 (0) 561 99 85 63 0
F +49 (0) 561 99 85 63 22

E info@gurit.com
W www.gurit.com

PŘÍLOHA PIV: TECHNICKÝ LIST TV 45 EMT 125 PLUS



DATA SHEET

TV 45 EMT 125 Plus 42%

Description

GLASS FABRIC PREPREG WITH EPOXY RESIN

Fabric

Material	Glass EC 9 136 tex	ISO 4602:1997
Fabric construction (ends/picks per cm)	7,3 x 7,3 ± 0,3	ISO 4602:1997
Areal weight	200 g/m ² ± 5%	ISO 4605:2000
Fabric thickness	190 µm ± 15%	ISO 4603:1993
Weave	PLAIN	ISO 2113:1996

Resin

Type	Epoxy EMT 125 Plus
Resin content	42 ± 3% by weight dry/dry
Resin weight	145 g/m ² ± 5%

Prepreg

Total weight prepreg	345 g/m ² ± 5%
Volatile content	< 1 %
Shelf life	1 year at -18°C

This information is indicative of our present standard production: it might be changed and doesn't confirm contractual liabilities

PRO-SYSTEMS SPA

Rev.01 – April, 2012



PRO-SYSTEMS SPA

UFFICI COMMERCIALI E AMMINISTRATIVI VIA AL CORBÉ, 63/65 - 22076 MOZZATE (Co) • TEL +39 0331 576 887 R.A. - FAX +39 0331 576 295
SEDE LEGALE VIA MOTTA, 6 - 20144 MILANO • C.F. / P.IVA IT 03707330969 - CAP. SOC. € 450.000,00 INT. VERSATO - R.E.A. MI 1695996 - MECC. MI330437
E-MAIL pro-systems@pro-systems.it • WEB SITE www.pro-systems.it

PŘÍLOHA PV: TECHNICKÝ LIST EPOXY RESIN EMT 125 PLUS



SPECIFIKACE

EPOXIDOVÁ PRYSKYŘICE EMT 125 PLUS

POPIS VÝROBKU EMT 125 PLUS JE EPOXIDOVÁ PRYSKYŘICE VHODNÁ K PROSYCENÍ UHLÍKATÝCH, SKELNÝCH A ARAMIDOVÝCH TKANIN. ŠIROKÝ ROZSAH VYTVRZOVACÍCH TEPLOT UMOŽŇUJE JEJÍ ZPRACOVÁNÍ BĚŽNÝMI POSTUPY: LISOVÁNÍM ZA HORKA, VAKUOVÁNÍM, AUTOKLÁVEM.

POUŽITÍ PRYSKYŘICE EMT 125 PLUS SE SVÝMI DOBRÝMI MECHANICKÝMI VLASTNOSTMI, VYSOKOU PRŮHLEDNOSTÍ A ZVÝŠENOU ODOLNOSTÍ PROTI PŮSOBENÍ UV ZÁŘENÍ NALEZNE UPLATNĚNÍ V OBLASTECH, KDE SE VYŽADUJE ZACHOVÁNÍ UHLÍKOVÉHO VZHLEDU KOMPOZITNÍHO MATERIÁLU:
PRŮMYSL VÝROBY AUTOMOBILOVÝCH DÍLŮ, NÁMOŘNÍHO A SPORTOVNÍHO VYBAVENÍ.

VLASTNOSTI PRYSKYŘICE	TYP	EPOXIDOVÁ
	TRVANLIVOST VE VENKOVNÍM PROSTŘEDÍ PŘI 23 °C	5 TÝDNŮ
	DOBA SKLADOVÁNÍ PŘI -18 °C	1 ROK
	REAKČNÍ TEPLOTA T _g	125-130 °C dle dsc (diferenční kompenzační kalorimetrie)
	DOBA MĚKNUTÍ	4-6 min při 125 °C 20-16 min při 105 °C
	OBSAH TĚKAVÝCH LÁTEK PŘI POČÁTEČNÍ IMPREGNACI	<1 %
	HUSTOTA PRYSKYŘICE PO VYTVRZENÍ	1,15-1,25 g/cm ³ (1 150-1 250 kg/m ³)
	PŘILNAVOST	VYSOKÁ AŽ NÍZKÁ, DLE POŽADAVKU

TYPICKÉ PODMÍNKY VYTVRZOVACÍHO CYKLU

VYTVRZOVACÍ TEPLOTA	ČAS	TG
80 °C	12 hodin	100-105 °C
125 °C	45 minut	125-130 °C
140 °C	15 minut	120-125 °C

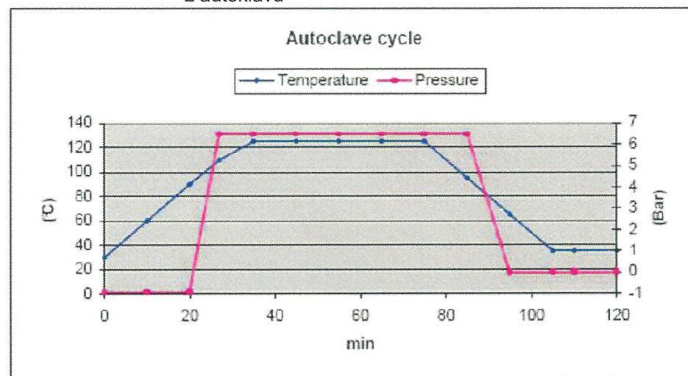
* Výše popsané vytvrzovací cykly byly provedeny na laminátové desce o rozměrech 40 × 40 lisováním za horka, hodnota T_g se měřila metodou DSC (20 °C/min)

** V rozsahu teplot 80-140 °C jsou možné různé vytvrzovací cykly.

POPIS ZPRACOVÁNÍ

AUTOKLÁV:

- 1) Po vytvoření vrstvy vložte díl do autoklávu a aplikujte podtlak 0,9-1 bar [90-100 kPa]
- 2) Ohřejte na teplotu 120 °C, zahřívajte rychlostí 1-3 °C/min (malé díly je možné zahřívát rychlostí 3-5 °C/min)
- 3) Při dosažení teploty 105-110 °C nastavte tlak na 2-7 bar [200-700 kPa]
- 4) Po dosažení teploty 125 °C udržujte stejnomy tlak a teplotu po dobu 45 minut
- 5) Při zachování tlaku snižte teplotu na 60 °C, pak uvolněte tlak
- 6) Po vychladnutí na teplotu prostředí vyjměte díl z autoklávu



LISOVÁNÍ ZA HORKA

- 1) Materiál po počáteční impregnaci vložte při teplotě okolí do formy a formu uzavřete s tlakem 1 bar [100 kPa]
- 2) Ohřejte na teplotu 125 °C, zahřívajte rychlostí 1-3 °C/min (malé díly je možné zahřívát rychlostí 3-5 °C/min)
- 3) Při dosažení teploty 105-110 °C nastavte tlak na 2-3 bar [200-300 kPa], pokud je možné kontrolovat tok
- 4) Po dosažení teploty 125 °C udržujte stejnomy tlak a teplotu po dobu 45 minut
- 5) Díl nechejte vychladnout na teplotu alespoň 40-50 °C při zachování tlaku, pak jej vyjměte z formy

EMT 125 je reaktanční epoxidová pryskyřice. Příliš rychlý nárůst teploty nebo příliš vysoká vytvrzovací teplota mohou vyvolat nekontrolovaný nárůst teploty uvnitř vrstev v případě zpracování laminovaných materiálů větších tloušťek (>1 cm)

TYPICKÉ MECHANICKÉ VLASTNOSTI

Mechanické údaje uvedené níže platí pro počáteční impregnaci uhlíkového materiálu použitím NN200* EMT 125 PLUS (obsah pryskyřice 40 % hmotnosti), vytvrzení tlakem za horka při 125 °C po dobu 45 minut

*NN200 (uhlíková tkanina 200 g/m², 4,8 osnova-4,8 útek, 3K uhlíkové vlákno s vysokou pevností)

ilss	69	MPa	ASTM D 2344
Modul ohybu	62	GPa	ASTM D 790
Síla v ohybu	900	MPa	ASTM D 790
Modul tahu	67	GPa	ASTM D 3039
Síla v tahu	850	MPa	ASTM D 3039

BALENÍ A DODÁVKA

Tkanina s počáteční impregnací pryskyřicí EMT 125 PLUS se dodává v rolích na kartonových jádrech s polyetylenovou oddělovací fólií. Role jsou uzavřeny v plastovém obalu a umístěny v kartonové krabici.

MANIPULACE A SKLADOVÁNÍ

Role skladujte v původním balení při teplotě -18 °C
Před použitím vyjměte roli z mrazáku a ponechtejte zteplat na teplotu prostředí v původním obalu, aby na materiálu nedošlo ke kondenzaci vody.

BEZPEČNOST A OCHRANA ZDRAVÍ

Výrobek obsahuje epoxidovou pryskyřici, která může při dlouhodobém působení způsobovat alergické reakce na pokožce.
Doporučuje se používat ochranné pracovní rukavice a pracovní oděv.
Při styku materiálu s pokožkou omyjte zasažené místo důkladně vodou a mýdlem, nebo krémem určeným k odstranění pryskyřic.

Při manipulaci s materiálem se doporučuje pracovat v dobře větraných prostorách.

Společnost Pro-Systems S.p.A. si vyhrazuje právo budoucích úprav těchto specifikací.

Kontaktní údaje

PRO-SYSTEMS S.p.A
Via Al Corbè, 63/65
22076 Mozzate (CO) - ITALY
Tel. +39 0331 576887
Fax +39 0331 576295
e-mail pro-systems@pro-systems.it

PŘÍLOHA PVI: TECHNICKÝ LIST HPL



Produktdatenblatt FUNDERMAX Schichtstoffplatten

Diese Information beschreibt die Zusammensetzung von FUNDERMAX Schichtstoffplatten und gibt Hinweise für deren Behandlung, Verarbeitung, Gebrauch und Entsorgung. Fundermax GmbH ist Mitglied des ICDLI.

1. Materialbeschreibung/Zusammensetzung

FUNDERMAX Schichtstoffplatten sind dekorative Hochdruck-Schichtpreßstoffplatten entsprechend EN 438 mit einer Melaminharzdeckschicht.

Sie werden in einer Vielzahl von Abmessungen, Dicken und Oberflächenausführungen geliefert. Schichtstoffe bestehen vor allem aus Papier, einem nachwachsenden Rohstoff, und unter Wärme aushärtenden Kunstharzen, wobei der Papieranteil mehr als 60 Gewichtsprozent ausmacht.

Die übrigen 30 bis 40 Gewichtsprozent bestehen aus ausgehärtetem Phenol-Harz für den Kern und Melamin-Harz für die dekorative Deckschicht. Beide Harze gehören zu den Duroplasten. Sie sind irreversibel chemisch vernetzt und bilden einen Werkstoff mit hohem Molekulargewicht. Unter der Einwirkung von hohem Druck und Hitze entsteht ein nicht reagierendes, stabiles Material, dessen Eigenschaften von denen der Ausgangsrohstoffe grundlegend verschieden sind.

2. Transport und Lagerung

Transport und Lagerung sollen nach den Allgemeinen Verarbeitungsempfehlungen für Schichtstoffplatten erfolgen; besondere Vorsichtsmaßnahmen sind nicht erforderlich. Im Sinne der Transportbestimmungen sind FUNDERMAX Schichtstoffplatten nicht als Gefahrstoffe eingestuft; eine Kennzeichnung ist daher nicht notwendig.

3. Bearbeitung und Handhabung von FUNDERMAX Schichtstoffplatten

Die üblichen Sicherheitsvorschriften hinsichtlich

- Staubabscheidung,
- Staubabsaugung,
- Brandverhütung usw.

müssen bei der Ver- und Bearbeitung von FUNDERMAX Schichtstoffplatten eingehalten werden.

Der Kontakt mit FUNDERMAX Schichtstoffplatten-Staub verursacht keine besonderen Probleme; es gibt aber eine kleinere Zahl von Menschen, die auf Stäube aller Art allergisch reagieren.

Wegen möglicher scharfer Kanten sollten beim Hantieren mit FUNDERMAX Schichtstoffplatten stets Schutzhandschuhe getragen werden.

4. Umweltaspekt bei der Anwendung

FUNDERMAX Schichtstoffplatten sind ein ausgehärtetes, duroplastisches Material. Im täglichen Gebrauch sind FUNDERMAX Schichtstoffplatten für den Kontakt mit Lebensmitteln zugelassen. Auf Grund ihrer äußerst geringen Durchlässigkeit eignen sich FUNDERMAX Schichtstoffplatten gut als Sperre gegen Emissionen (z.B. Formaldehyd) aus dem Trägermaterial. Die dekorativen Oberflächen sind weitgehend beständig gegen alle haushaltsüblichen Lösemittel und Chemikalien; das Material wird deshalb seit vielen Jahren in Anwendungsbereichen eingesetzt, in denen Sauberkeit und Hygiene unabdingbar sind. Die geschlossene FUNDERMAX Schichtstoffplatten-Oberfläche kann auf einfache Weise mit Hilfe von heißem Wasser, Dampf oder allen Desinfektionsmitteln, wie sie in Krankenhäusern und gewerblichen Anwendungsbereichen eingesetzt werden, desinfiziert werden.

5. Wartung

Da FUNDERMAX Schichtstoffplatten eine fertige Oberfläche haben und durch Korrosion nicht angegriffen werden, erübrigt sich ein gesonderter Oberflächenschutz. Die Schichtstoffplatten brauchen keine Pflege, nur Reinigung.

6. FUNDERMAX Schichtstoffplatten im Brandfall

FUNDERMAX Schichtstoffplatten sind nur schwer in Brand zu setzen und haben die Eigenschaft, die Ausbreitung von Flammen zu verzögern, so daß sich die Fluchtzeit verlängert. Bei unvollständiger Verbrennung können - wie bei jedem anderen organischen Material auch toxische Substanzen im Rauch enthalten sein.

Auf Kundenwunsch sind FUNDERMAX Schichtstoffplatten in F-Qualität erhältlich.
FUNDERMAX Schichtstoffplatten in F-Qualität enthalten halogenfreie Flammschutzmittel.

Bei Bränden, an denen auch FUNDERMAX Schichtstoffplatten beteiligt sind, können dieselben Brandbekämpfungstechniken angewendet werden wie bei anderen holzhaltigen Baustoffen.

7. Energierückgewinnung

Auf Grund ihres hohen Heizwerts (18-20 MJ/kg) eignen sich FUNDERMAX Schichtstoffplatten besonders gut für das thermische Recycling. Sie verbrennen bei vollständigem Ausbrand (bei 700 °C) zu Wasser, Kohlendioxid und Stickoxiden. FUNDERMAX Schichtstoffplatten erfüllen deshalb die Anforderung des Kreislaufwirtschaftsgesetzes (§ 6). Solche Bedingungen sind durch moderne, behördlich genehmigt Industriefeuerungsanlagen gewährleistet. Die Asche aus diesen Verbrennungsprozessen kann auf kontrollierte Deponien verbracht werden.

8. Deponie

Ist die Verbrennung nicht möglich, können FUNDERMAX Schichtstoffplatten auf geordnete Mülldeponien gebracht werden.

FUNDERMAX Schichtstoffplatten gehören der Eluatklasse IIIa gem. ÖNORM S2072 an und haben den Abfallschlüssel 57101 Phenol- und Melaminharz gem. ÖN S2100. Sie sind als 'hausmüllähnlich' eingestuft. Diese Schlüsselnummer ist dem örtlichen befugten Abfallsammler bzw. dem Deponiebetreiber zu nennen. Eine Liste der gem. § 15 Abfallwirtschaftsgesetz befugten Abfallsammler und -entsorger ist bei Bedarf bei den jeweiligen Landesregierungen

erhältlich. Alle die Gruppe '57 Kunststoff und Gummiabfälle' oder '571 ausgehärtete Kunststoffe' oder '57101 Phenol- und Melaminharz' entsorgenden Betriebe sind zuständig. In den nachstehenden Referaten der Landesregierungen kann das jeweils gültige Verzeichnis der lokalen Abfallsammler erfragt werden.

Amt der Burgenländischen Landesregierung
Abt. XIII/3, Gewässeraufsicht Wulkawiese
7041 Wulkaprodersdorf
Tel.: 02687/621 22 -29

Amt der Kärntner Landesregierung
Abt. XV/U, Umweltschutz
Flatschacher Straße 70
9020 Klagenfurt
Tel.: 0463/331 90 -246, 252

Amt der Niederösterreichischen
Landesregierung
Landhausplatz 1
3109 St. Pölten
Abt. RU4 - 02742/200 5299
Abt. WA1 - 02742/200 4375

Amt der Oberösterreichischen Landesregierung
Abt. für Umweltschutz und Abfallwirtschaft 40
4020 Linz
Tel.: 0732(997)/584 -3398, 3106

Amt der Salzburger Landesregierung
Abt. XVI, Umweltschutz und Naturschutz
Hellbrunner Straße 30
5020 Salzburg
Tel.: 0662/8042 -4158

Amt der Steiermärkischen Landesregierung
Rechtsabteilung 3
Landhausstraße 7
8010 Graz
Tel.: 0316/877 -3821

Amt der Tiroler Landesregierung
Abt. für Umweltschutz
Wilhelm-Greil-Straße
6020 Innsbruck
Tel.: 0512/508 -650, 647

Amt der Vorarlberger Landesregierung
Abt. VIIa, Raumplanung und Baurecht
Römerstraße 15
6901 Bregenz
Tel.: 05574/511 - 2713

Amt der Wiener Landesregierung
MA 22
Ebendorferstraße 4
1010 Wien
Tel.: 1/4000 - 88248, 88238, 88237

9. Technische Angaben

9.1 Physikalische Daten

- 9.1.1 Dichte: ca. 1,40 g/cm³
9.1.2 Löslichkeit in Wasser: keine
9.1.3 Heizwert: 18-20 MJ/kg
9.1.4 Zündtemperatur: ca. 400 °C
9.1.5 Thermische Zersetzung ist oberhalb 250 °C möglich. Toxische Gase können je nach Brandbedingungen (Temperatur, Sauerstoffgehalt) entstehen. FUNDERMAX Schichtstoffplatten schmelzen nicht.
9.1.6 Gefährliche Reaktionen: keine
9.1.7 Schwermetalle: keine, entsprechend den europäischen Vorschriften.
9.1.8 Weitere Angaben: FUNDERMAX Schichtstoffplatten sind kein gefährlicher Stoff im Sinne der Gefahrenstoffverordnung.

9.2 Lagerung, Handhabung und Transport

- FUNDERMAX Schichtstoffplatten zählen nicht zu den gefährlichen Transportgütern.
9.2.1 Schutzausrüstung Handschuhe (scharfe Kanten). Besondere arbeitshygienische Vorkehrungen sind nicht erforderlich.
9.2.2 Brand- und Explosionsschutz: Nicht erforderlich, wie für andere Baustoffe auf Holzbasis.

9.3 Bearbeitung von FUNDERMAX Schichtstoffplatten

- 9.3.1 Arbeitsplätze: Staubgrenzwert 2 mg/m³
9.3.2 Explosionsgrenze: Staubgrenzwert 60 mg/m³

9.4 Feuerlöschmaßnahmen Alle üblichen Löschmittel sind anwendbar

9.5 Toxische Wirkungen beim Gebrauch: keine.

FUNDERMAX Schichtstoffplattenoberflächen sind physiologisch unbedenklich und für den Kontakt mit Lebensmitteln zugelassen.

9.6 Formaldehydabgabe

- Typische Werte für eine nicht aufgeklebte 1-mm-FUNDERMAX Platte:
< 0,4 mg/h m² bei Prüfung nach ON EN 717-2
< 0,05 ppm bei Prüfung mit der WKI-Prüfkammer

Alle in diesem Merkblatt enthaltenen Angaben basieren auf dem aktuellen technischen Wissensstand, stellen jedoch keine Garantie dar. Es liegt in der persönlichen Verantwortung des einzelnen Anwenders der in diesem Merkblatt beschriebenen Produkte, die bestehenden Gesetze und Vorschriften zu beachten.

Wenn Sie Fragen zum Thema haben, wenden Sie sich bitte an unsere Anwendungstechnik – Fundermax GmbH +43 5 9494 0.