

Návrh a testování sendvičových kompozitních materiálů pro dopravní aplikace

Bc. Lukáš Hasala

Diplomová práce
2012



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2011/2012

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Lukáš HASALA**
Osobní číslo: **T10960**
Studijní program: **N 3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Řízení jakosti**

Téma práce: **Návrh a testování sendvičových kompozitních materiálů pro dopravní aplikace**

Zásady pro vypracování:

1. Kompozitní materiály, vlastnosti a jejich rozdělení
2. Sendvičový kompozitní materiál a jeho využití v dopravním průmyslu, rozbor aktuální situace
3. Jádrové materiály, vlastnosti, výroba a možnosti využití pro konkrétní aplikace
4. Sendvičové kompozitní materiály, jejich testování dle požadovaných norem pro danou aplikaci (přední modul tramvaje)
5. Rozbor a diskuse výsledku
6. Závěr

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

- [1] Jančář, J.: Úvod do materiálového inženýrství kompozitu. Brno, 1999.
- [2] Reinhart, T. J.: Engineered materials handbook. Composites. Vol. 1., ASM
- [3] Kořínek, Z.: Kompozity. dostupné na: www.volny.cz/korinek
- [4] Ehrenstein, G. W.: Polymérní kompozitní materiály. Scientia Praha, 2009.
- [5] Bareš, R. A.: Kompozitní materiály. SNTL Praha, 1988.
- [6] www.hexcel.com
- [7] www.airtech.lu

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Soňa Rusnáková, Ph.D.**

Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce: **13. února 2012**

Termín odevzdání diplomové práce: **18. května 2012**

Ve Zlíně dne 2. února 2012


doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.
děkan




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

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby ¹⁾;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3 ²⁾;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ 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

.....

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 nevýdělečně 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

Tato diplomová práce se zabývá návrhem a testováním vhodné sendvičové struktury použitelné při výrobě sendvičových dílů pro přední a zadní čelo tramvaje Škoda T15. Práce je rozdělena na teoretickou část, kde popisujeme jednotlivé komponenty a přehled testů sendvičových konstrukcí.

Praktická část je zaměřena na návrh, výrobu a testování sendvičových konstrukcí.

Klíčová slova:

Sendvičová konstrukce, laminát, prepreg, PET pěna, SAN, 3-bodový ohyb, 4-bodový ohyb, odlup.

ABSTRACT

This thesis examines the design and testing of sandwich structures suitable in the manufacturing of sandwich parts for front and rear ends of a Skoda T15 tram. The thesis is divided into two parts - the theoretical part describes the individual components and tests of sandwich structures, and the practical part focuses on the manufacture and testing of sandwich structures.

Keywords:

Sandwich structures, fibreglass, prepreg, PET foam, SAN, 3-point bending, 4-point bending, flaking off.

Poděkování:

Tímto chci na tomto místě poděkovat vedoucímu práce, paní doc. Ing. Soňi Rusnákové, Ph.D. za odborné vedení a poskytnuté rady při zpracování diplomové práce.

Dále bych rád poděkoval za rady a věnovaný čas panu Ing. Vladimírovi Rusnákov, panu Ing. Milanovi Žaludkovi, Ph. D. a panu Ing. Františku Volkovi CSc. za rady a čas věnovaný při konzultacích.

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

OBSAH

ÚVOD	10
I TEORETICKÁ ČÁST	11
1 DEFINICE KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ	12
1.1 PODMÍNKY KOMPOZITNÍHO MATERIÁLU	12
1.2 SYNERGISMUS	13
1.3 ROZDĚLENÍ KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ	15
1.3.1 Matrice	15
1.3.2 Výztuž	16
1.4 VYZTUŽUJÍCÍ VLÁKNA	16
1.4.1 Skleněná vlákna.....	16
1.4.2 Aramidová vlákna	16
1.4.3 Uhlíková vlákna	17
1.4.4 Přírodní vlákna	18
1.5 RECYKLACE	19
1.5.1 Opakované zpracování materiálu	19
1.5.2 Spalování.....	19
1.5.3 Chemické zpracování	20
1.6 PŘEHLED PRACOVNÍCH POSTUPŮ	20
2 SENDVIČOVÉ KONSTRUKCE	21
2.1 SLOŽENÍ SENDVIČOVÉ KONSTRUKCE	22
2.1.1 Vnější vrstvy sendvičové konstrukce	22
2.1.2 Jádra	24
2.2 PŘÍKLADY SPOJOVÁNÍ SENDVIČOVÝCH KONSTRUKCÍ.....	34
2.2.1 Závitové vložky	36
3 ZKOUŠKY SENDVIČOVÝCH MATERIÁLŮ	38
3.1 ZKOUŠKA OHYBEM	38
3.2 PEEL TEST.....	40
3.2.1 Climbing drum peel test	40
3.2.2 DCB-Type peel test	41
3.2.3 Peel test – Air pressure.....	42
II PRAKTICKÁ ČÁST	43
4 CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE	44
5 ČELNÍ MODUL	45
5.1 PŘEHLED POUŽITÝCH MATERIÁLŮ	46
5.1.1 Jádro	47
5.1.2 Tkaniny, rohože, prepreg.....	48
5.1.3 Prskyřice	50
5.1.4 Gelcoat	50
5.1.5 Lepidla.....	50

6	VÝROBA ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ.....	51
6.1	VZOREK Č.1.....	51
6.1.1	Postup výroby.....	52
6.2	VZOREK Č. 2, Č. 3.....	55
6.2.1	Postup výroby.....	55
6.3	VZOREK Č. 4.....	58
6.4	VZOREK Č. 5, Č. 6.....	59
6.5	PEVNOSTNÍ POŽADAVKY.....	60
7	TESTOVÁNÍ VZORKŮ	63
7.1	VZOREK Č. 1.....	63
7.2	VZOREK Č. 2.....	65
7.3	VZOREK Č. 3.....	66
7.4	VZOREK Č. 4.....	67
7.5	TEST ZÁVITOVÉ VLOŽKY – VZOREK Č. 5	68
7.6	ODLUP.....	70
7.6.1	Prepreg - PET.....	70
7.6.2	Laminát - PET.....	71
7.6.3	Laminát - SAN.....	71
7.7	SOUČINITEL PROSTUPU TEPLA.....	72
7.7.1	Postup měření.....	72
7.8	DISKUSE VÝSLEDKŮ	75
	ZÁVĚR	76
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	77
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	79
	SEZNAM OBRÁZKŮ	81
	SEZNAM TABULEK.....	84
	SEZNAM PŘÍLOH.....	85

ÚVOD

Průkopníkem ve vývoji nových materiálů v 2. pol. 20. století je především kosmický a letecký průmysl. Za svou poměrně krátkou historii výroby prošly materiály dynamickým vývojem. Své uplatnění našly nové materiály jak v dopravním a leteckém průmyslu, tak i chemickém a stavebním průmyslu. Celosvětově se kompozitních materiálů v současné době vyrobí na 13 mil. tun. Jeho výroba se v průměru zvyšuje o 10% ročně.

Prudký vývoj využitím kompozitních materiálů zaznamenala také dopravní technika. Trendem v dnešní dopravní technice je především tlak na snižování provozních nákladů, s čímž úzce souvisí snižování hmotnosti použitím moderních materiálů. Použitím kompozitních materiálů se snižuje jak ekologická zátěž, tak provozní náklady a náklady na údržbu, kdy materiály mají dobrou odolnost vůči korozi a dlouhou životnost. Při konstrukci železničních vagónů, tramvají, autobusů najdeme velké množství dílů z kompozitních materiálů. Jedná se především o různé krycí panely, které nahradily dříve používané dřevěné, plechové obklady. Sendvičové materiály nalézají uplatnění v dílech střech, nosné části, podlahy, stěny. Využívá se vysoké tuhosti společně s nízkou hmotností.

Použití kompozitních materiálů v technické praxi má své opodstatnění a předpokladem je, že jejich využití bude i nadále růst.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 DEFINICE KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ

Kompozit lze definovat jako heterogenní materiál skládající se ze dvou nebo více materiálových složek či fází. [1]

Hlavním předpokladem pro vznik kompozitního materiálu je vzájemná rozdílnost jednotlivých složek a fází v něm obsažených. Spočívá v různorodosti fyzikálních, chemických, popř. mechanických vlastností. Složený materiál tak cíleně získá vlastnosti mnohem výhodnější a hodnotnější, než-li jsou vlastnosti klasického materiálu. [1]

Vlastní vznik kompozitu je uskutečňován vložením jedné nebo více nespojitých fází do fáze spojitě. Nespojitou fází představuje výztuž, zatímco spojitá fáze je známa pod pojmem matrice. Jelikož účelem výztuže je vyztužení, bývá zpravidla pevnějšího a tužšího charakteru. Naproti tomu matrice slouží jako pojivo výztuže, měla by být tedy především poddajná a plastická. [1], [2]

1.1 Podmínky kompozitního materiálu

Složený materiál lze klasifikovat jako kompozit pouze v případě, splňuje-li určité podmínky. Dostupná literatura se shoduje na těchto pravidlech: [1], [2]

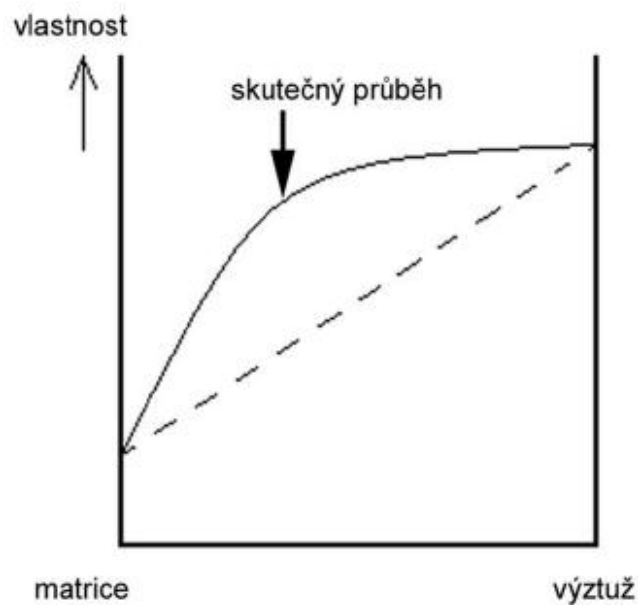
- vlastnosti složek se výrazně liší
- složky jsou oddělitelné rozhraním
- výroba kompozitního materiálu spočívá v mechanickém mísení komponent
- podíl výztuže v kompozitním materiálu je větší než 5%
- výztuž je pevnější a tužší než matrice
- kombinací složek vznikají podstatně lepší vlastnosti v porovnání s vlastnostmi samostatných složek, včetně součtu všech vlastností jednotlivých složek

Slitiny kovů ani plasty se jako kompozitní materiály neuvádějí, v tomto případě není splněna podmínka mísení jednotlivých složek, jelikož během zpracování kovů dochází k vyloučení tvrdé fáze. [1]

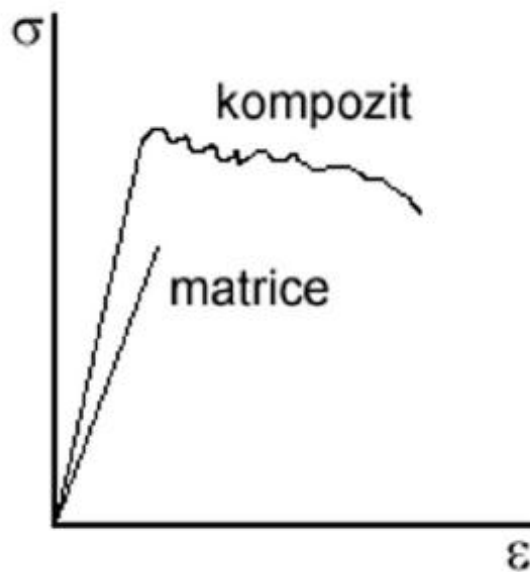
1.2 Synergismus

Kompozity jsou složené materiály, u nichž se po smíšení materiálů se zcela odlišnými vlastnostmi vytvoří jediná struktura. Jestliže se tyto vlastnosti doplňují, vzniká kompozitní materiál s přídavnými, nebo lepšími vlastnostmi, než mají jednotlivé složky samy. [2]

Typickým příkladem synergického chování je kompozit složený z keramické matrice vyztužené keramickými vlákny. I když jsou jak matrice, tak vlákna samostatně velmi křehké, výsledný kompozit je charakteristický určitou mírou houževnatosti, tzn. odolností proti náhlému křehkému porušení. Existence synergismu je velmi významná, neboť vede k získávání materiálů kvalitativně zcela nových vlastností. [6]

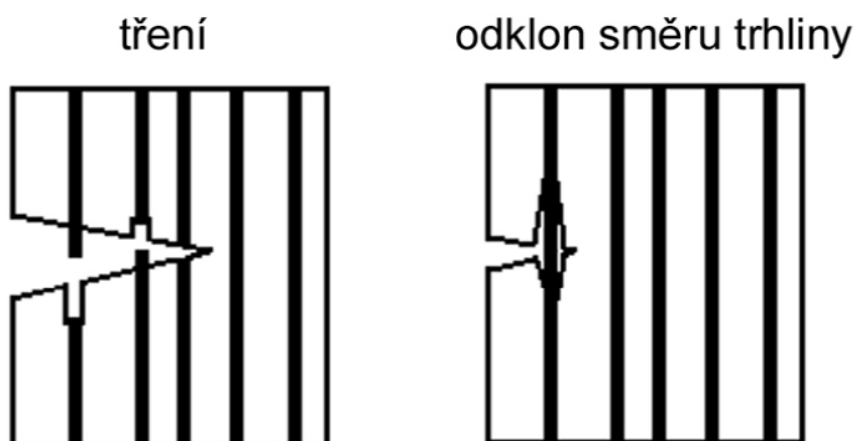


Obr. 1: Synergické chování složek kompozitu [6]



Obr. 2: Tahový diagram křehké matrice
a kompozitu [6]

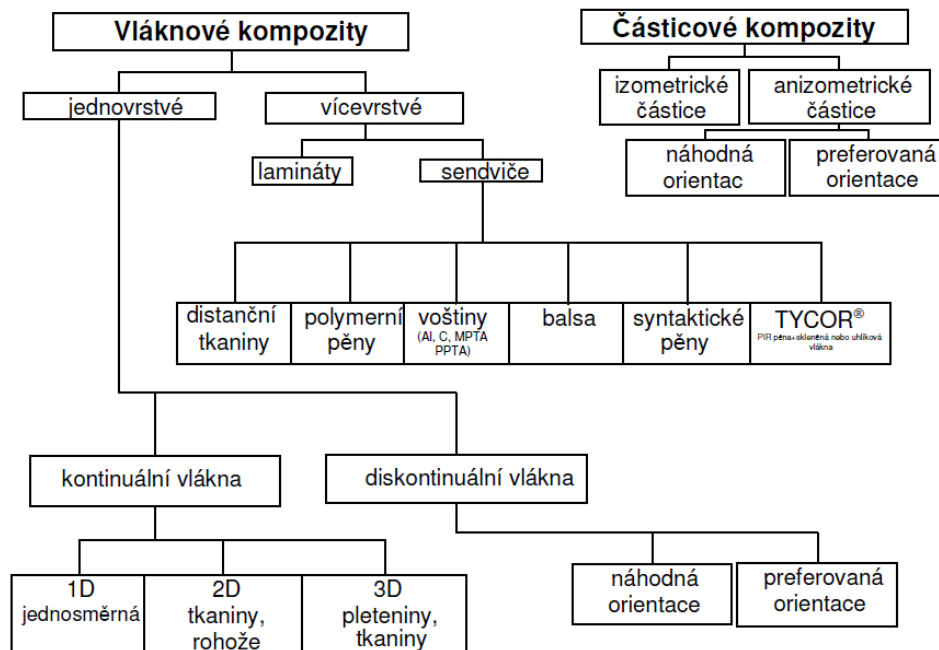
Uvedené chování kompozitu je způsobeno tím, že šířící se lomová trhlinka je brzděna na rozhraní matrice a vláken. Dochází zde jednak k odklánění směru šíření trhliny, jednak k intenzivnímu vzájemnému tření mezi matricí a vytažujícími se vlákny (viz. Obr. 3). Kvalita rozhraní mezi matricí a výztuhou má tedy zásadní vliv na vlastnosti výsledného kompozitu.



Obr. 3: Jevy na rozhraní matrice a výztuhy [6]

1.3 Rozdělení kompozitních materiálů

Hlavním hlediskem rozdělení podle povahy výztuže je její struktura, tzn. geometrie a orientace. Rozdělení vychází ze způsobu zpevnění kompozitního materiálu, které může být uskutečněno vlákny nebo částicemi. Odtud pramení pojem vláknový či částicový kompozit. [3], [4]



Obr. 4: rozdělení kompozitních materiálů podle geometrie a orientace výztuže [3]

1.3.1 Matrice

Matrice představuje složku spojitou, jejíž funkcí je spojení jednotlivých částic výztuže. Matrice se podílí na tvaru a rozměrech kompozitu, chrání výztuž před vnějšími vlivy a působí proti vzniku trhlin. Jelikož pomáhá při přenosu vnějšího zatížení na výztužnou část, důležitým požadavkem je také schopnost snadné deformace pod působícím zatížením. Další podmínkou je nízká hmotnost, obzvláště velký důraz je kladen na dobrou soudržnost matrice s výztuží. [5]

Existuje několik typů matic. Při volbě konkrétní matrice je přihlíženo na cílené výsledné vlastnosti kompozitu. Nejčastěji uplatňované matrice bývají zhotovovány z kovových (houževnatost, pevnost), polymerních (odolnost vůči korozi, houževnatost) či keramických materiálů (pevnost, odolnost proti vysokým teplotám). [5]

1.3.2 Výztuž

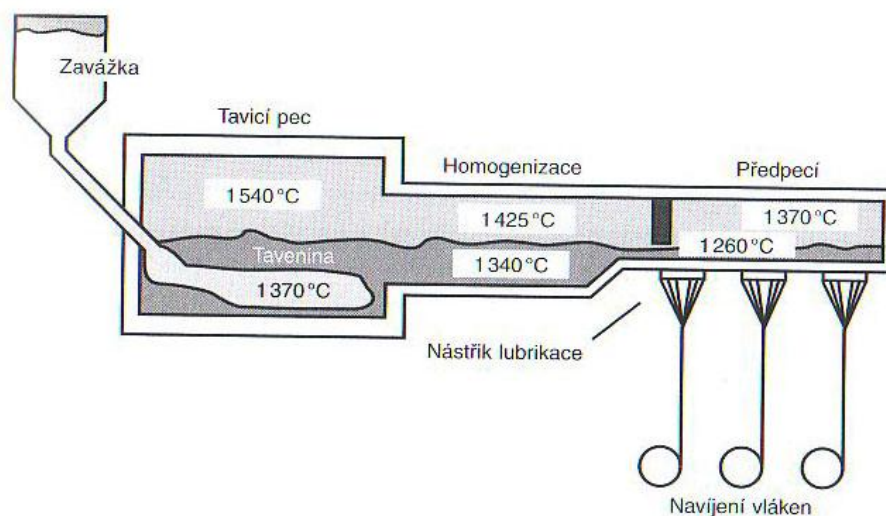
Výztuž nebo-li diskontinuální nebo také nespojitá fáze je pevnější, tužší a tvrdší než fáze spojitá. Zpravidla bývá v matrici rozptýlena a její funkce spočívá ve vyztužení, tzn. ve zlepšení mechanických vlastností materiálu. Především pak pevnosti, pružnosti a tvrdosti. [1]

1.4 Vyztužující vlákna

1.4.1 Skleněná vlákna

Textilní skleněná vlákna (GF – Glass Fiber) je společný název pro tenká vlákna (Ø 3,5 až 24 μm) s pravidelným kruhovým průřezem, tažená z roztavené skloviny a používaná pro textilní účely.

Skleněná vlákna jsou vynikajícím elektrickým izolantem s vysokou propustností pro záření, proto se označují jako E-vlákna (elektrická) a jejich sklovina jako E-sklovina. [7]

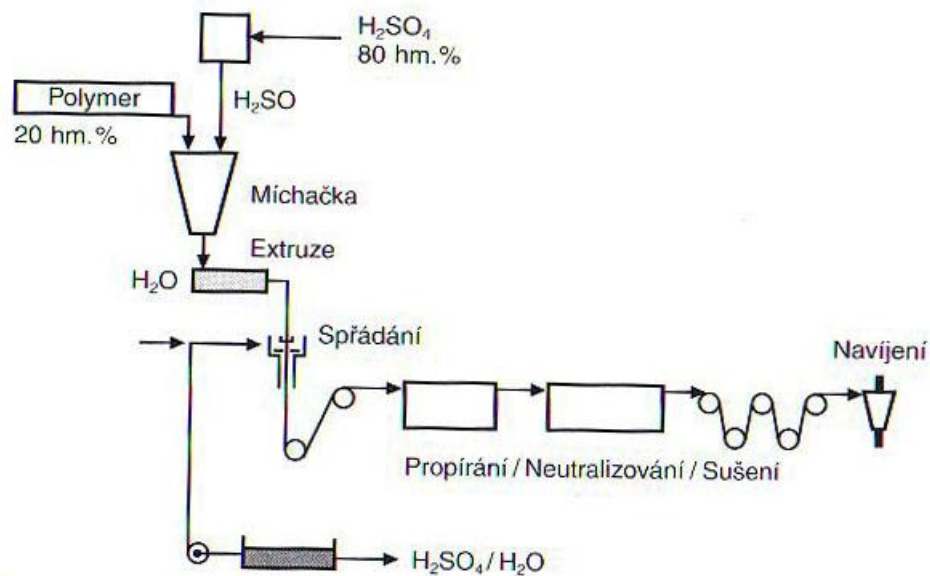


Obr. 5 Schéma výroba textilních skleněných vláken tažením z trysek [7]

1.4.2 Aramidová vlákna

Aramidová vlákna (AF – Aramid Fiber) jsou vlákna na bázi lineárních organických polymerů, jejichž kovalentní vazby jsou orientovány podle osy vlákna. Předností těchto vláken je vysoká pevnost a tuhost.

Aramidová vlákna se mohou zpracovávat se všemi běžnými reaktivními pryskyřicemi i termoplasty. V laminátu lze využít až 70% jejich skutečné pevnosti. [7]

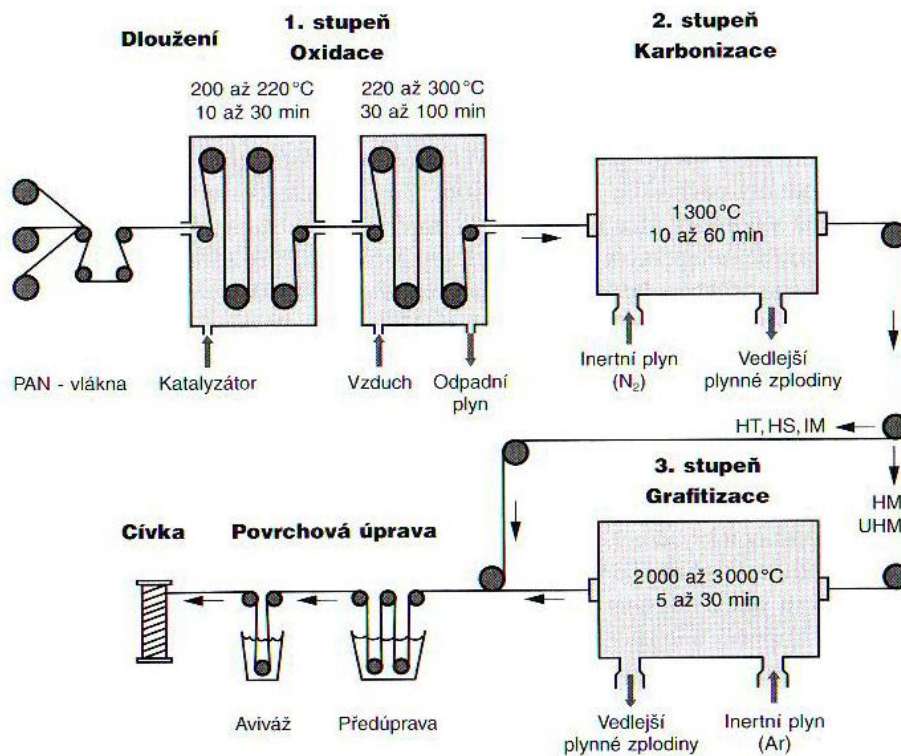


Obr. 6 Schéma výroba aramidových vláken [7]

1.4.3 Uhlíková vlákna

Uhlíková vlákna (CF – Carbon Fiber) jsou technická vlákna s extrémně vysokou pevností a tuhostí, ale s nízkou tažností. Výchozí organické suroviny ve vláknitém stavu jsou nejprve karbonizovány. Přitom se odštěpí téměř všechny prvky až na uhlík. Se stoupající teplotou, a tím se zvyšující grafitizací, zlepšují se mechanické vlastnosti.

Uhlíková vlákna se skládají z více než 90 % z uhlíku, < 7 %, < 1 % kyslíku a < 0.3 % vodíku. Mají průměr mezi 5 až 10 μm. [7]



Obr. 7 Schéma výroby uhlíkových PAN-vláken [7]

1.4.4 Přírodní vlákna

Pro vyztužování plastů jsou ze všech přírodních vláken vhodná pouze vlákna rostlinná, která mají jako základ celulózu. Mezi ně patří len, konopí, sisal, juta, ramie a bavlna. Jejich výhodou je odolnost proti stárnutí a čichová nezávadnost při měnících se klimatických podmínkách. Pozoruhodné jsou i pevnosti v tahu. Vzhledem k nízké měrné hmotnosti jsou tato přírodní rostlinná vlákna surovinou pro lehké konstrukce. [7]

Tab. 1 Porovnání mechanických vlastností přírodních a skleněných vláken [7]

Vlastnosti / Vlákno	Sklo	Konopí	Len	Juta	Sisal
E-modul ($\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$)	75 000	70 000	30 000	55 000	20 000
Mez pevnosti v tahu ($\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$)	3 500	600	750	550	600
Tažnost (%)	4	1,6	2,0	2,0	2,0
Hustota ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	2,54	1,45	1,48	1,4	1,45

1.5 Recyklace

Je velmi obtížné najít účelnou kombinaci recyklovatelného materiálu a z hlediska recyklovatelnosti vhodnou konstrukci. Výběr materiálů, které jsou vhodné pro recyklaci, je nutno posoudit z hlediska jejich další využitelnosti.

Kritéria pro jejich využití jsou odlišná od kritérií, jako jsou pevnost, modul pružnosti, odolnost proti stárnutí, chemická odolnost, barva a kvalita povrchu. [7]

1.5.1 Opakované zpracování materiálu

Pro opakované zpracování kompozitních materiálů platí, že ani po rozřídění a sběru čistých starých dílů nemůže být znovu získán materiál, který by odpovídal původnímu. Je proto nutné buď snížit požadavky na materiál pro určité aplikace, nebo najít nové aplikace tak, aby velká množství recyklovaného materiálu našla odbyt na trhu. Každé nové použití recyklátu zhoršuje vlastnosti, takže je nutno najít stupňovitou škálu aplikací se stále nižšími požadavky, na jejímž konci by bylo využito pouze energetické zhodnocení výrobou tepla. [7]

1.5.2 Spalování

Spalovny vybavené odpovídajícími ohništi a zařízeními pro čištění spalin umožňují při současném stavu techniky ekologicky přijatelné spalování plastů a získávání energie.

Tab. 2 Výhřevnost různých druhů plastů a paliv

Palivo	Výhřevnost (MJ/kg)
Topný olej	42
Domovní odpad	10
PP	43,3
PP – GM 30	30,3
Prepreg – R30	10

Tvrzení, že spalování cenných surovin je plýtváním, není odůvodněné, protože 90 % nafty se spotřebuje na výrobu topného oleje a benzínu a pouze 5 % se spotřebuje na výrobu plastů. S ohledem na skutečnost, že při výrobě plastů se spotřebuje pouze část energie,

která je nutná na výrobu tradičních konstrukčních materiálů, jako je ocel nebo hliník, se bude využití plastů právě s ohledem na životní prostředí dále zvyšovat.

1.5.3 Chemické zpracování

Chemické zpracování kompozitů pomocí hydrolyzy (tj. rozkladu materiálu matrice v prostředí vodní páry), pomoc hydrogenace (tj. rozkladu ve vodíkové atmosféře) a pomocí pyrolýzy (tj. čistě tepelného rozkladu matrice) je možné, ale nevhodné. [7]

Výrobních postupů u kompozitních materiálů je velké množství. Pro názornost uvádíme stručný přehled. V praktické části DP se zabývám ručním kladením pod vakuovou folií, kterou popíši detailněji.

1.6 Přehled pracovních postupů

Základní rozdělení technologií lze provést podle formy. Je to jednak forma otevřená (jednodílná), jednak uzavřená forma. [3]

Otevřená forma

- Ruční kladení za mokra, kontaktní laminování
- Ruční, strojní kladení prepregů
- Navíjení
- Pultruze

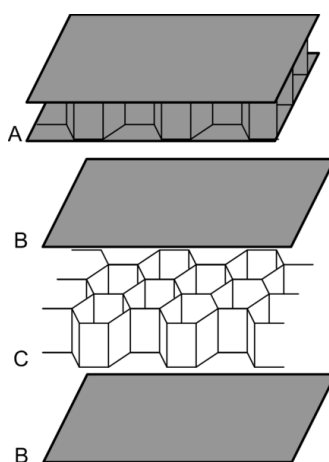
Uzavřená forma

- RTM
- RIM

2 SENDVIČOVÉ KONSTRUKCE

Snahy o snižování spotřeby pohonných hmot a energií vůbec či použití materiálů odolných proti korozi snižující ztráty vzniklé korozi jsou prioritou ve vývoji. Snižování hmotnosti kolejových i silničních vozidel je samo o sobě schopno se podílet na snižování spotřeby pohonných hmot až šedesáti procenty, zvyšovat efektivnost nákladní dopravy a snižovat emise spalin vzniklé provozem dopravních prostředků. Použití materiálů s velkou antikorozi odolností ve speciálním a ekologickém stavebnictví je schopno prodloužit životnost konstrukcí i ve velmi agresivních prostředích a snížit tak náklady na jejich údržbu na minimum. Nové materiály zahrnující ve struktuře již možnost snadné recyklace snižují potenciální ekologickou zátěž životního prostředí po skončení užitého cyklu výrobku. Plasty, které mají většinu těchto atributů, byly v důsledku svých omezených mechanických vlastností dosud použitelné pouze tam, kde tvořily nosnou část konstrukce. Polymerní kompozity se svým spektrem vlastností vyrovnají tradičním materiálům a jsou tedy použitelné i při výrobě nosných prvků konstrukcí a jsou tedy nejnadějnějšími kandidáty pro náhradu kovů a jiných tradičních materiálů v konstrukčních aplikacích. Největšího rozšíření dosáhly kompozity, ve kterých jsou pojivem organické pryskyřice a výztužemi jsou různé typy keramických/anorganických vláken. [16]

Sendvičové konstrukce řadíme k vrstevnatým konstrukcím. 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. [11]



Obr. 8 A – Sendvičový panel,

B – vnější vrstvy, A – jádro [12]

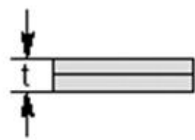
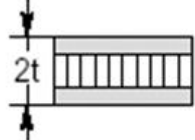
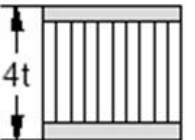
Efektivní struktura sendviče je taková, která je tvořena dvěma tuhými a pevnými potahy zatěžovanými tahovými a tlakovými silami a jádrem o relativně nízké hustotě přenášejícím smykové síly mezi potahy.

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. [11]

K dalším výhodám se řadí odolnost proti rázům, schopnost tlumení, izolace.

Tab. 3 znázorňuje mechanické vlastnosti sendviče v závislosti na tloušťce použitého jádra.

Tab. 3 Vlastnosti sendvičové konstrukce [5]

	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

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 37-krát, a pevnost v ohybu okolo 9-násobku. [9]

2.1 Složení sendvičové konstrukce

2.1.1 Vnější vrstvy sendvičové konstrukce

Relativně tenké, pevné materiály se používají jako krycí vrstvy sendvičových konstrukcí. Ty musí zároveň splňovat požadavky na výrobu s ohledem na profilování a ohýbání, funkční požadavky týkající se větru, vody a těstnosti vůči páře, jakož i jejich schopnost

odolávat zatížení, korozi a ohni. Mohou být použity krycí vrstvy např. z hliníku, oceli, laminátu, dřeva.

Ocelové, hliníkové plechy

Tenkých ocelových plechů se často používá jako obkladový materiál jádra sendviče. Obvykle se používají za stedená válcované plechy s ochranou proti korozi. Jako ochrana proti korozi se používá žárové zinkování nebo zinkové, hliníkové plechy. [18]

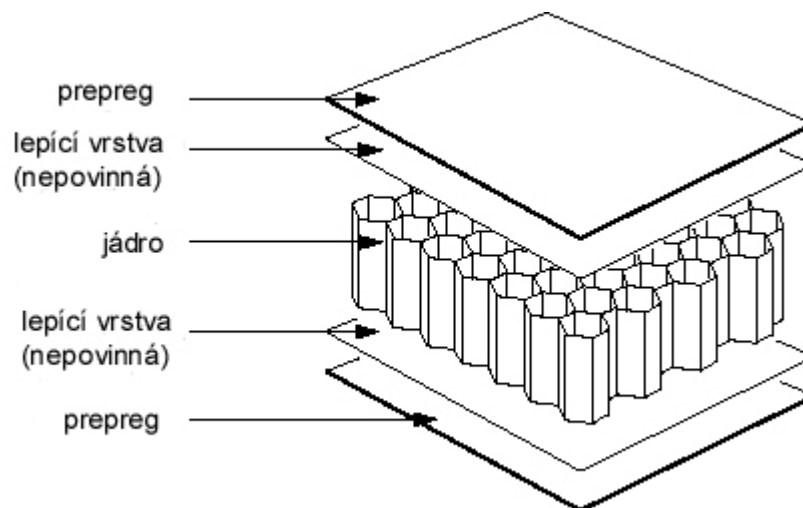
Sendvičové panely s obklady z hliníku se používají v aplikacích, kde jsou speciální požadavky na odolnost proti korozi nebo hygienu, např. ve výrobě nebo skladování potravin. Tloušťka hliníkového plechu je obvykle 0,7-1,2mm. [18]

Prepregy

Prepreg je výraz pro tkaninu nasycenou pryskyřicí již od výrobce. Samolepící prepreg nevyžaduje dodatečnou lepicí vrstvu a umožňuje výrobu lehké konstrukce při snížených nákladech výroby. K výhodám prepregu patří velmi nízká hmotnost, vysoká tuhost, trvanlivost, volnost při návrhu, snížení nákladů výroby. [19]

Prepregy je nutné pro jeho malou životnost skladovat v chladících zařízeních a vytvrzují se při teplotách cca. 120 °C.

Použití prepregu se řadí do kategorie suché technologie (čisté).



Obr. 9 Prepregová sendvičová konstrukce [19]

Zpracování prepregu je kontrolovaný proces, který se nejčastěji zpracovává technologií vakuového lisování. Tato technologie zaručuje lepší kvalitativní a mechanické vlastnosti

produktu. Vhodná pro velkorozměrné výrobky. K nevýhodám se řadí vyšší náklady na pomocný materiál.

Lamináty

Používají se lamináty vyztužené skleněnými nebo uhlíkovými vlákny. Na vnější vrstvu kompozitu (např. laminát ze skleněných vláken) se nanáší pryskyřice, na kterou se pokládá a přitlačí jádro sendviče. Po několika sekundách se pryskyřice rozpustí a následuje napojení horní vnější vrstvy. Aby se dosáhlo optimálního spojení jednotlivých vrstev, prochází kompozit zařízením s vakuovým vakem, hydraulickým lisem nebo autoklávem. Sériově se vyrábí kompozity s tloušťkou mezi 1 a cca. 100 mm, hmotnost může být až pod 40 g/m². [13]

2.1.2 Jádra

Jádra jako výplňový materiál pro sendvičové materiály musí mít vhodné vlastnosti s ohledem na mechanickou pevnost a tuhost. S přihlédnutím ke způsobu využití také na hořlavost, teplotní vodivost.

Balsa

Balsa („Ochroma pyramidale“) 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. Po vysušení buňky obsahují vlákna 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. [8]



Obr. 10 Balsa [17]

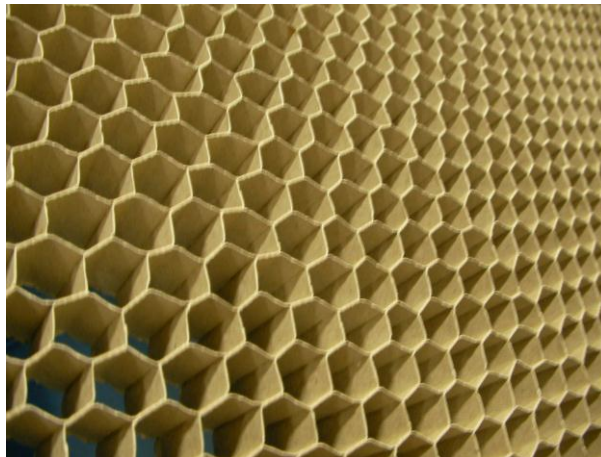


Obr. 11 Balsové jádro [9]

Voštiny

Voština je materiál, který se používá jako jádro s různou výškou, velikostí a tvarem buněk v sendvičových kompozitech. Voštinová jádra mají lepší mechanické vlastnosti než pěnová jádra při stejné hustotě.

Koncept vynalezl Norman de Buoyne 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 plástů včelího medu. [14]

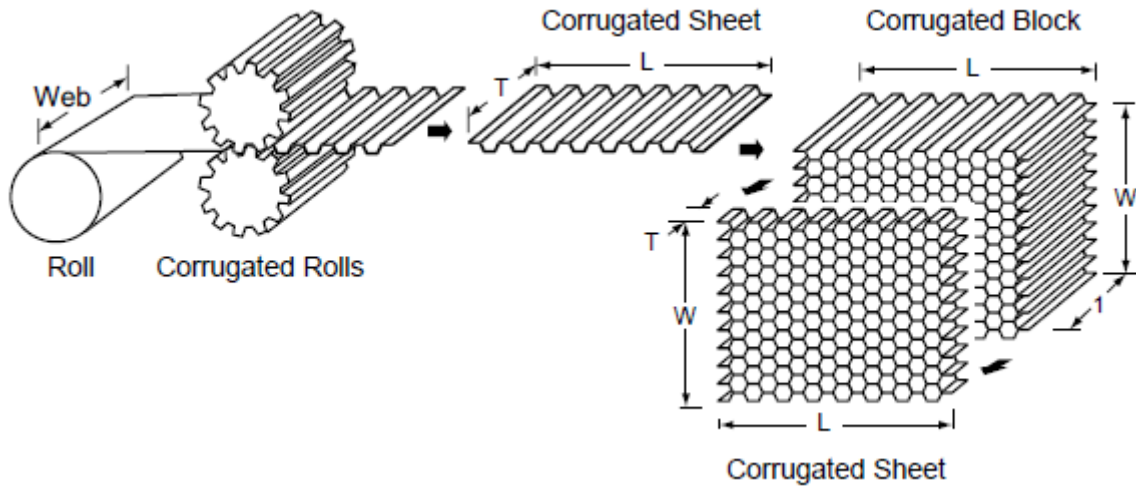


Obr. 12 Papírová voština [15]

Výroba voštin

Voštiny se formují z plošného materiálu několika různými technologiemi. Jako výchozí materiál se používají papírová, skleněná, aramidová, nebo uhlíková fólie, nebo textilie a hliníkový plech. [14]

Jeden z moderních výrobních postupů sestává z vrapování folie (příčné vlny) – stříhání fólie – spojováním dvou listů vzniká panel s šestihránnými dutinami v příčném směru – nanášení pryskyřice a sušení – řezáním panelu v podélném směru se tvoří voštinové pláty s určitou tloušťkou. [14]

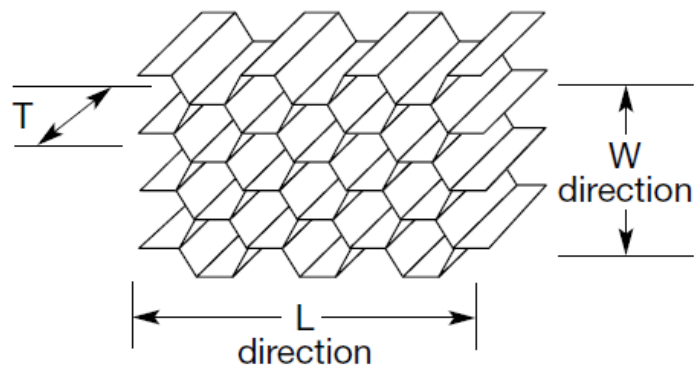


Obr. 13 Postup výroby plechové voštiny [5]

Typy voštinových buněk

Šestihránná voština

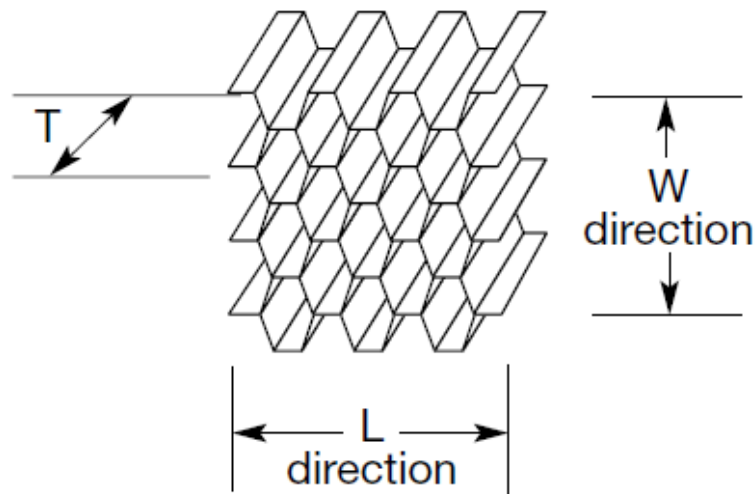
Standardní šestihránná plástev je základní a nejčastěji používaná. Je běžně k dispozici z kovových i nekovových materiálů. [20]



Obr. 14 Šestihránná voština [20]

OX-Core

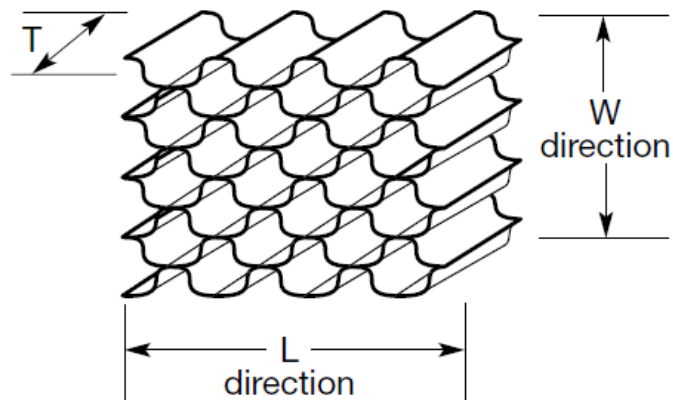
Konfigurace plástve je šestihranná, která je ve směru W prodloužena a v tomto směru poskytuje obdélníkovou konfiguraci, která umožňuje zakřivení nebo formování ve směru L. Tento typ plástve zvyšuje smykové vlastnosti ve směru W smykové vlastnosti a snižuje ve směru L v porovnání s šestihranným typem plástvem. [20]



Obr. 15 OX-Core voština [20]

Flex-Core

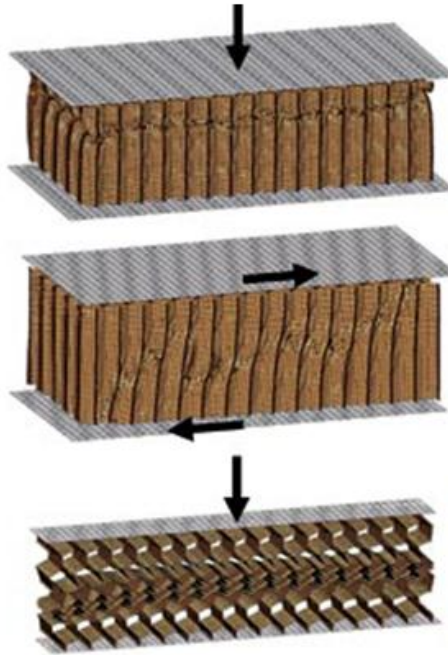
Konfigurace Flex-Core poskytuje vyjimečné vlastnosti v oblasti tvárnosti, ve složitých zakřivení. Flex jádro poskytuje vyšší pevnost ve smyku než srovnatelné hexagonální jádro stejné hustoty. [20]



Obr. 16 Flex jádro [20]

Způsoby zatěžování voštin

Při zatížení výrobků z voštin je zásadní způsob přilepení pláště k voštině. Jestliže dojde při zatížení k odlepení pláště od voštiny dochází zároveň k destrukci části nebo celého sendvičového dílu.



Obr. 17 Způsoby zatěžování voštin [5]

Buňková tělesa (pěnové materiály, pěny)

Pevné buňkové těleso obecně představuje těleso, u kterého je měrná hmotnost (hustota) výrazně snížena oproti plnému tělesu přítomností dutin ve struktuře hmoty, které vytváří tzv. buňky. Dutiny buněk jsou vyplněné plynem nebo kapalinou. Charakter tekutiny v buňkách je podmíněný způsobem výroby a materiálem, z kterého je takové těleso vyráběné. V dnešní době je možné zpracovat do buňkové struktury téměř každý materiál – kovy, keramické materiály, sklo a většinu polymerů. [21]



Obr. 18 Pěny [10]

Výroba pěn

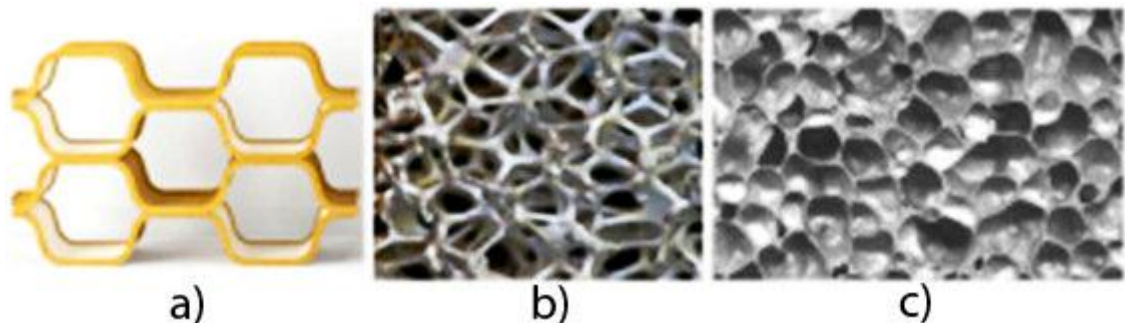
Polymery jsou zpěňované přidáváním plynových bublin do tekutého monomeru nebo horkého polymeru. Tyto bubliny se nechají expandovat, stabilizovat a potom se těleso ochladí aby ztuhlo.

Bubliny se přidávají mechanickým mícháním anebo přimícháváním zpěňovacího materiálu (zpěňovadla) do polymeru.

Zpěňovadlo může být na bázi fyzikální anebo chemické.

Fyzikální zpěňovadla jsou inertní plyny nebo uhlík, vodík a dusík. Tyto plyny se vhánějí do horkého polymeru pod vysokým tlakem a jejich růst v materiálu je řízený redukcí tlaku.

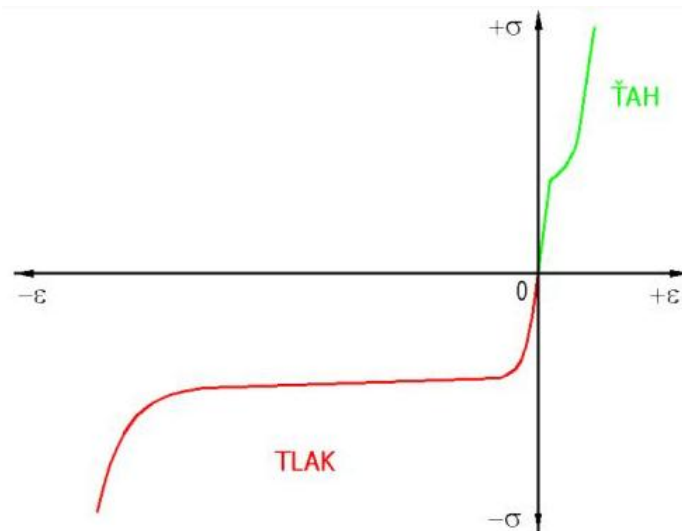
Chemické zpěňovadla jsou přísady, které se teplem rozkládají, anebo které vzájemnou chemickou reakcí uvolňují plyny. Struktura polymerních pěn je tvořena buď uzavřenými, nebo otevřenými buňkami. [22]



Obr. 19 a) Honeycomb b) pěna s otevř. buňkami c) pěna s uzavř. buňkami [21]

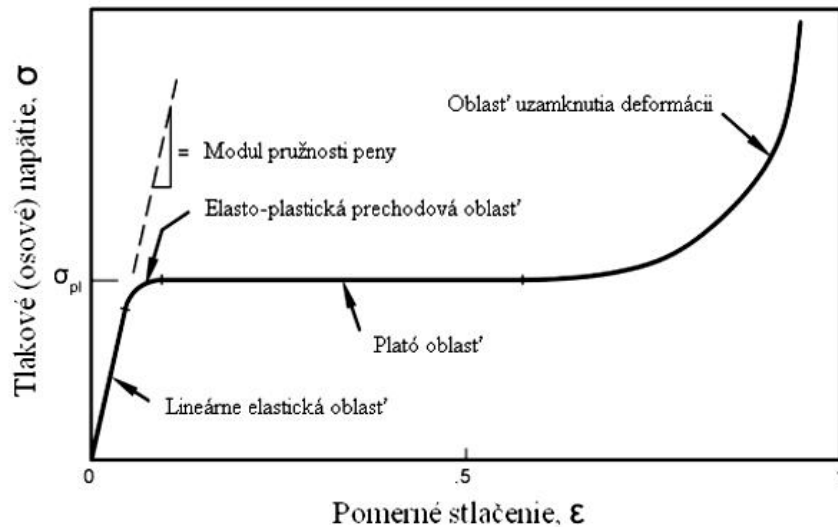
Mechanické vlastnosti pěn

Podle pracovních diagramů je chování pěn v tahu a tlaku rozdílné. V tlaku je výrazná tzv. plató oblast, kde deformace rozsáhle narůstají při minimální změně napětí, čímž se zvyšuje jejich schopnost pohlcovat energii. V tahu je tato oblast velmi slabě výrazná. [23]



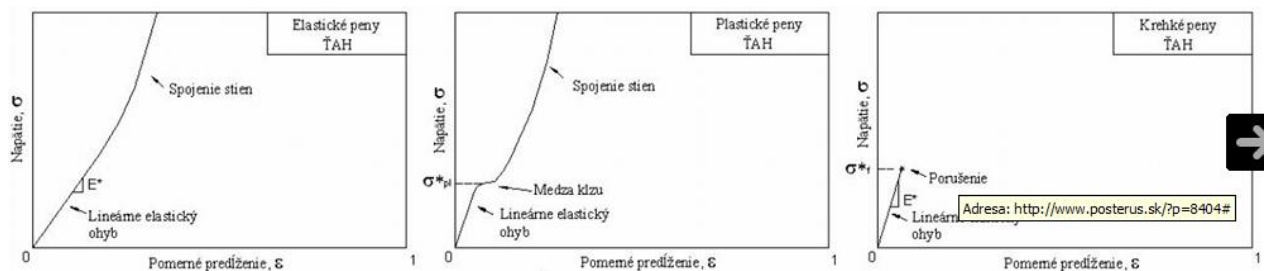
Obr. 20 Pracovní diagram pěn TĀH – TLAK [23]

Na Obr. 21 je znázorněný typický pracovní diagram pěn při tlakovém zatížení, který se skládá z třech oblastí. Na začátku, při nízkých napětích, se pěny chovají lineárně elasticky, poté přecházejí do dlouhé oblasti plató, kde dochází k nevratné deformaci jejich buněk (kromě elastických pěn), a nakonec je možné sledovat oblast s prudkým nárůstem napětí (oblast uzamknutých deformací). [23]



Obr. 21 Charakteristický tvar tlakové křivky pěn [23]

V tahu je počáteční lineární elastická oblast doprovázená ohybem hran a natahováním stěn buněk. U elastických pěn se hrany buněk natáčejí k ose tahání, což zvyšuje tuhost struktury. Hrany buněk plastických pěn se také natáčejí k ose tahání, dochází k plastickému ohybu a po překročení meze kluzu daného materiálu stoupá křivka tahového diagramu až do bodu, kde dochází k porušení celistvosti materiálu. [23]



Obr. 22 Tahové diagramy pěn [23]

Materiály pěn

Pěny jsou jednou z nejčastějších forem nosného materiálu. Mohou být vyrobeny z různých syntetických polymerů: z polyvinylchloridu (PVC), polystyrenu (PS), polyuretanu (PUR), polyetherimidu (PEI) a styreneacrylonitrilu (SAN).

PVC

Pěny z polyvinylchloridu jsou jedny z nejpoužívanějších pěn pro jádra. Jsou výhodné pro vyváženou kombinaci statických a dynamických vlastností a dobrou odolností proti absorpci vody.

Existují dva hlavní typy pěnového PVC:

- Síťované (*Príčne a Lineárne*)
- Nesíťované

PET

Recyklovatelný termoplast, tvarovatelný za tepla. Má velmi dobré mechanické vlastnosti, nehořlavý, dobře obrobiteľný.

PUR

Je to lehký materiál, který v podstatě nahrazuje překližku. Má velmi dobrou opracovatelnost. Své uplatnění v současné době nalézají jako tepelná, zvuková izolace.

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 tak výrazně nemění.

PS

Přestože se polystyrénové pěny hojně využívají ve výrobě plachetnic, surfových prken, kde uplatňují svou výhodu nízké hmotnosti (40kg/m^3), nízké ceny, nejsou používány ve vysoce pevnostních konstrukčních aplikacích. Nemohou být použity v systému, kde použijeme jako matici polyesterovou pryskyřici.

Vlastnosti pěn

Poměr tlakové pevnosti k hmotnosti je nejvýznamnější vlastnost, její výborný poměr tlakové pevnosti k hmotnosti, který je kombinací buněčné struktury s převážně plynovými dutinami a mechanických vlastností materiálu, ze kterého je buněčné těleso vyrobené. [8]

Schopnost absorbovat rázovou energii a tlumení kmitu. Tato vlastnost vyplývá z testu osového tlakového zatížení. Tlaková křivka má nelineární tvar. Stlačení při relativně konstantním zatížení je závislé na materiálu a hustotě buněk. Dosahuje poměrně vysokých hodnot 60-80%.

Hodnoty Modulu pružnosti se pohybují v rozmezí 0,5 až 500 MPa.

Vlastnosti polymerních pěn jsou kromě vlastností základní strukturní fáze polymeru ovlivněny objemovým podílem plynu a základní strukturní charakteristikou, podílem tloušťky stěny „t“ a velikosti buňky „l“, tj. podíl t/l . Pěnovky jednoho a téhož polymeru se mohou vyrábět v několika strukturních modifikacích. [3]

- u polymerních pěn s otevřenými buňkami platí:

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

t ... tloušťka stěny

l ... velikost buňky

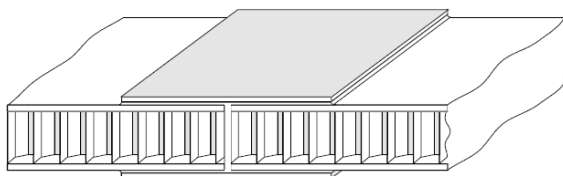
ρ ... hustota pěny

ρ_s ... hustota polymeru v pevné fázi

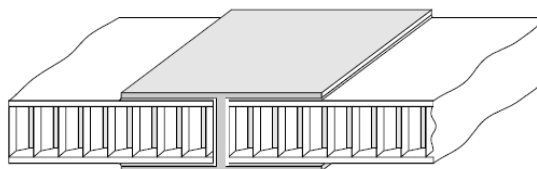
2.2 Příklady spojování sendvičových konstrukcí

Sendvičové panely lze spojovat různými způsoby, z nichž některé jsou znázorněny na následujících ilustracích.

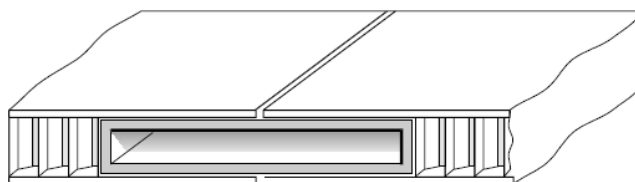
Plochá spojení



Obr. 23 Čelní lepení s podporou [25]

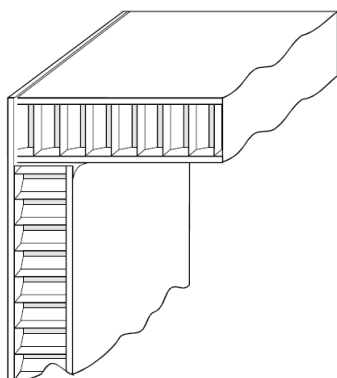


Obr. 24 Lepený tupý spoj H [25]

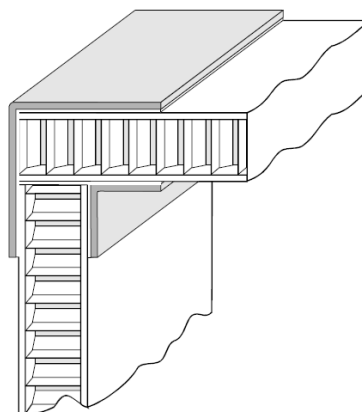


Obr. 25 Čelní lepený spoj s interní podporou [25]

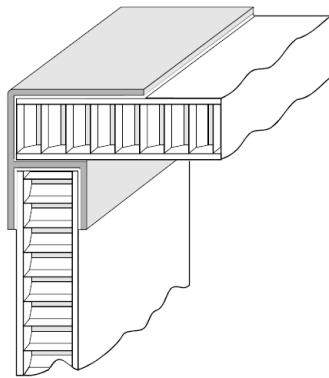
Rohová spojení



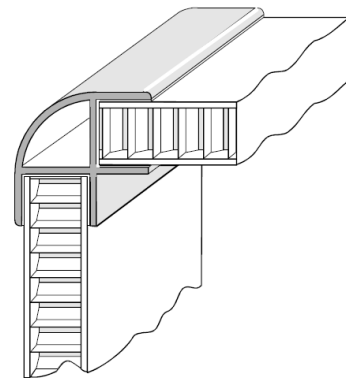
Obr. 26 Rohové spojení
polodrážkou [25]



Obr. 27 Rohové spojení
s podporou L lišt [25]

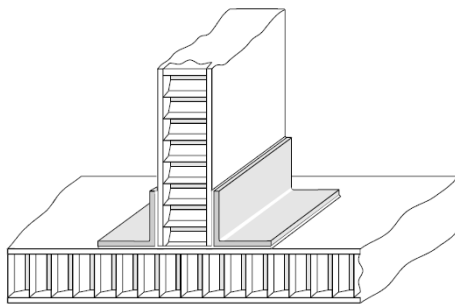


Obr. 28 Rohové spojení – ostrý roh [25]

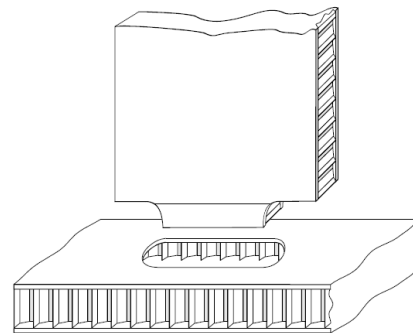


Obr. 29 Rohové spojení - zaoblený roh [25]

T – spojení



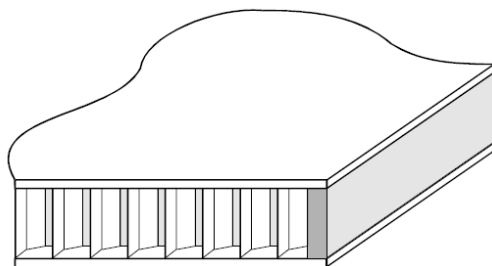
Obr. 30 T – spojení L lištami [25]



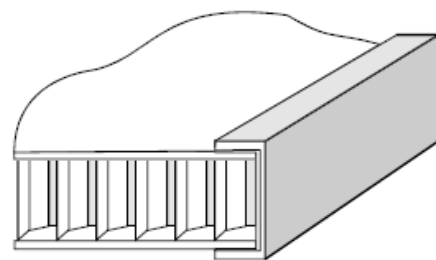
Obr. 31 T – spojení pero – drážka [25]

Metody uzavírání sendvičů

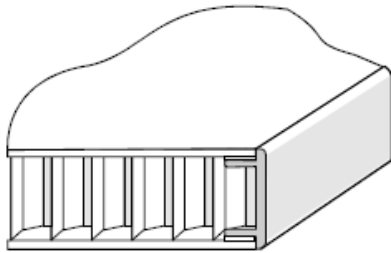
Otevřené hrany u sendvičových materiálů mohou být uzavřeny z důvodu zabránění vniknutí vlhkosti, zlepšení vzhledu nebo umožnění následného upevnění. [25]



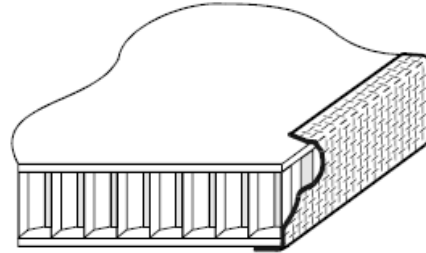
Obr. 32 Výplňová hrana [25]



Obr. 33 U-hrana [25]



Obr. 34 Vlepená hrana vhodná pro silnější panely [25]



Obr. 35 Uzavření hrany páskou [25]

2.2.1 Závítové vložky

Mechanické upevnění závitových vložek na sendvičových panelech je dosaženo různými způsoby. Výběr metody závisí na požadované síle, požadované konečné úpravě, množství a způsobu výroby. [25]

Zatížení a reakce na sendvičovém panelu může být obecně aplikováno jak po okrajích, tak i v ploše. Kraje jsou obvykle podepřené a zatížení je rozneseno po ploše. Jakékoliv zatížení aplikované přímo na panel způsobí deformaci spíše, než na u silných ocelí nebo u hliníkových panelů. [25]

Oblast působení

Nejprve zvažte případ koncentrace zatížení na ploše panelu. V každém uzavřeném úseku kolem zatížení musí být splněna podmínka rovnováhy. Uzavřená cesta je označena Π a koncentrované zatížení je v tomto případě kolmá síla Q , znázorněno na Obr. 36.



Obr. 36 Rovnováha úseku defonovaný uzavřenou cestou kolem síly Q

Koncentrované zatížení zastoupené silou Q [N], působící kolmo na plochu a T [N/mm] jsou reakce vedená v opačném směru působící v každém bodě po uzavřené cestě Π . [25]

Délka cesty Π se zvětšuje s poloměrem r , ale reakce T musí s poloměrem r zmenšovat. V případě koncentrované síly a koncentrovaného momentu na ploše, je závislost následující:



Obr. 37 Koncentrovaná síla a moment na ploše

Síla T :
$$T \approx \frac{1}{r} \quad (2)$$

Moment M :
$$T \approx \frac{1}{r^2} \quad (3)$$

3 ZKOUŠKY SENDVIČOVÝCH MATERIÁLŮ

Mechanické vlastnosti jsou finální vlastností daného materiálu, které podmiňují jeho vhodnost pro určenou funkci a použití v praxi. Poznání a zlepšování mechanických vlastností konstrukčních materiálů je motivované jejich optimálním využitím při výrobě strojů a zatížení. [25]

Z hlediska působení síly na zkušební těleso je možné rozdělit mechanické zkoušky do několika skupin:

- Zkoušky statické
 - za normálních teplot
 - za zvýšených nebo snížených teplot
- Zkoušky dynamické
 - rázové
 - cyklické

Měření mechanických vlastností může sledovat různé cíle. Prvním a nejstarším je získávání dat pro konstruktéry. Za druhé se mechanické vlastnosti používají jako důkaz kvality materiálu. Mohou být kritériem pro výstupní kontrolu nebo pro přejímku materiálů. Za třetí v materiálovém výzkumu, který usiluje o pochopení a strukturální vysvětlení mechanického chování a konkrétních mechanických vlastností. [27]

3.1 Zkouška ohybem

Pro houževnaté materiály má zkouška ohybem menší význam než ostatní mechanické zkoušky, protože tělesa se deformují, aniž by bylo možno stanovit výslednou pevnost, jelikož nedojde k lomu. Z tohoto důvodu má zkouška ohybem význam pro křehké materiály, kde lze z průhybu určit deformační schopnost, což při zkoušce tahem není možné, neboť se napětím vyvolá pouze nepatrné a těžko měřitelné prodloužení.

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

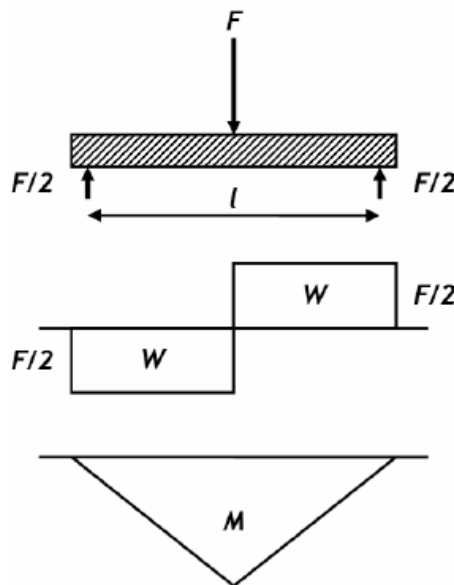
$$M_{o \max} = \frac{F \cdot l}{4} \quad (4)$$

Největší napětí se stanoví ze vztahu:

$$\sigma_{o \max} = \frac{M_{o \max}}{W_o} \quad (5)$$

Tříbodová zkouška ohybem

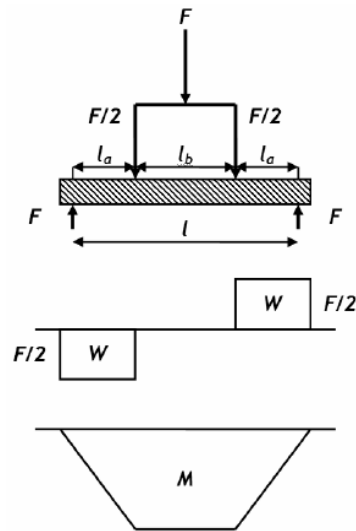
Při tříbodové zkoušce je zkušební těleso podepřeno jako nosník dvěma podporami a konstantní rychlostí prohýbáno trnem působícím uprostřed rozpětí podpěr tak dlouho, dokud se těleso nezlomí nebo dokud deformace nedosáhne předem stanovené hodnoty. [27]



Obr. 38 Průběh ohybového momentu u nosníku na dvou podporách [27]

Čtyřbodová zkouška ohybem

Při čtyřbodové zkoušce je zkušební těleso prohýbáno dvěma trny v jedné třetině nebo jedné polovině vzdálenosti podpěrných trnů. Hodnoty pevností v ohybu jsou nižší než u tříbodového systému a jak ukazuje obr. 39, je i jiné rozložení ohybového momentu. Jeho rovnoměrnější působení v celé délce zkušebního tělesa vedlo k tomu, že se modul pružnosti stanovuje tímto způsobem.



Obr. 39 Průběh ohybového momentu u čtyřbodové zkoušky ohybem [27]

Ohybový moment vyvolává v horních vláknech tah, v dolních tlak. Je-li průřez symetrický, je neutrální vrstva v ose zkušebního tělesa. To však platí pouze v případě, že materiál má stejné vlastnosti v tahu i tlaku. [27]

3.2 Peel test

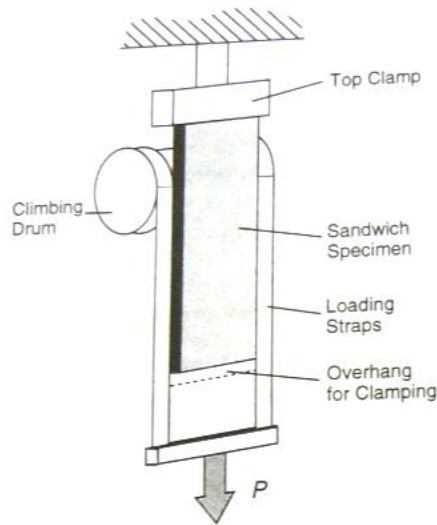
Tato metoda testu srovnává odolnosti lepených spojů mezi vnější vrstvou a jádrem sendvičového materiálu, za stanovených zkušebních podmínek. Jeden způsob, Climbing drum, je použitelná zejména v případech, kdy vnější vrstvy jsou relativně tenké. Kroutící moment odlupování se vypočítává jak ze síly potřebné k oddělení jádra a vnější plochy, tak z ohybu vnější plochy. Další metody testování nevyžadují velmi tenké vnější plochy. Jednou z nich je test DCB, podobný testu Climbing drum a také test s využitím tlakového vzduchu k delaminaci vnější vrstvy od jádra. [25]

Tyto testy popisuje norma ASTM D 1781-93 Test method for Climbing Drum Peel for Adhesives.

3.2.1 Climbing drum peel test

Climbing drum test musí odpovídat obecné podobě, jak je ukázáno na Obr. 40. Doporučené rozměry vzorku je šířka 76 mm a délka nejméně 305 mm, včetně 25 mm přesahu vnější

plochy na každém konci. Tloušťka jádra není důležitá, s tou výjimkou, že testovaný vzorek se nesmí ohýbat, zatímco se vnější vrstva odlupuje. [25]



Obr. 40 Climbing drum test [25]

Postup testování

Vnější plocha je na spodním konci bezpečně upnuta k bubnu, horní konec je upnut v kleštině.

Aplikuje se zatížení tahem při konstantní rychlosti a ze zkušební sestavy se stanoví odolnost proti odlupování po délce alespoň 150 mm.

Výpočet průměrného odlupovacího momentu dle vzorce:

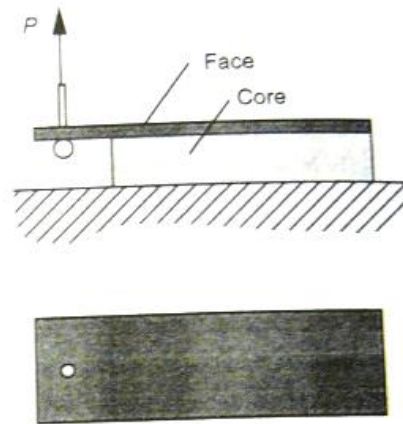
$$T = \frac{(r_o - r_i)(F_p - F_o)}{W} \quad (6)$$

kde r_o je rádius obruby pásků (vč. jedné poloviny tloušťky zatížených pásků, r_i je poloměr bubnu (vč. jedné poloviny vnější odloupené vrstvy), $F_p - F_o$ je průměrné zatížení potřebné k odloupení a ohnutí vnější vrstvy, F_o je zatížení vyžadující překonání kroučící moment, W je šířka vzorku. [25]

3.2.2 DCB-Type peel test

Jádro testovacího vzorku je vyfrézováno a upnuto směrem dolů. Tzn. vnější vrstva vytváří převis, na kterém působí zatížení. Také u této metody nerozhoduje tloušťka jádra, ikdyž

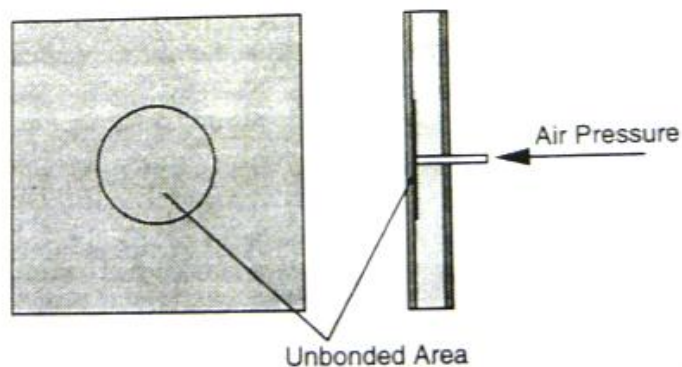
testovací vzorek je vázán k tuhé ocelové desce, aby se zabránilo sendvičový vzorek ohýbat, zatímco dochází o odlupu vnější vrstvy. [25]



Obr. 41 DCB peel test [25]

3.2.3 Peel test – Air pressure

Test je prováděn na vzorku s kruhovou počáteční delaminací ve středu. Na jádru je vytvořena tenká teflonová vrstva, která vytvoří počáteční delaminaci. K tenké vrstvě je přivedena trubička, pomocí níž je dovnitř sendviče přiváděn tlakový vzduch. Tlak je řízen redukčním ventilem. V okamžiku, kdy se začne vnější plocha odlupovat od jádra, hodnota tlaku je zaznamenána. [25]



Obr. 42 Peel test – Air pressure [25]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

4 CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE

Cílem praktické části této diplomové práce je návrh sendvičového materiálu použitého v čelníku předního modulu tramvaje. Návrh skladby sendvičového materiálu by měl odpovídat dnes používaným materiálům v moderní dopravní technice a daným specifickým podmínkám.

Návrh materiálu byl proveden tak, aby sendvičový materiál čelníku odolal předpokládané síle zatěžování s tím, že celá sestava čelního modulu bude dále řešena metodou konečných prvků.

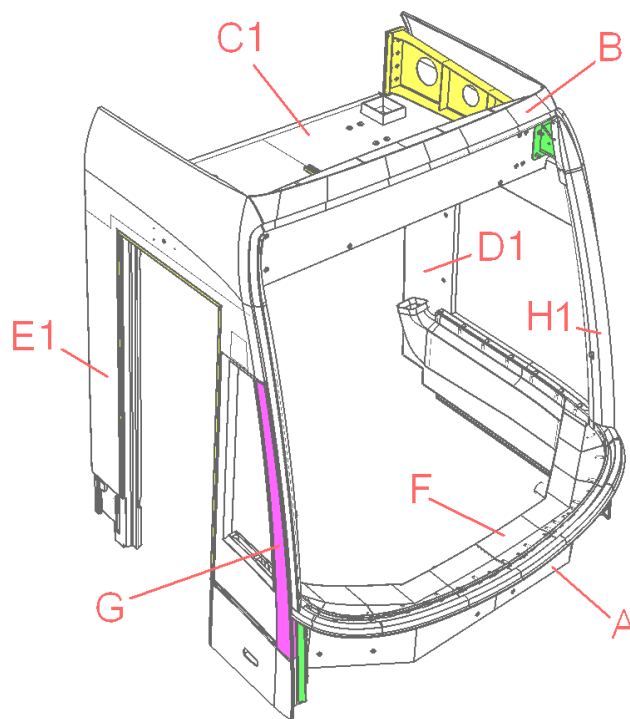
Postup v praktické části diplomové práce byl následující:

- Návrh materiálů
 - Jádro
 - Tkaniny, rohože, prepreg
- Výroba sendvičových materiálů
 - Ruční lamina pod pružnou fólií
 - Ruční kladení prepregů pod pružnou fólií
- Testování sendvičových materiálů a vyhodnocení
 - 3 – bodový ohyb
 - 4 – bodový ohyb
 - Odlup
 - Součinitel prostupu tepla

Samotná výroba vzorků byla provedena ve firmě Form spol. s r.o., která má dlouhodobé zkušenosti s výrobou laminátových výrobků všech rozměrů v jednoduché nebo sendvičové struktuře. Produkce je především zaměřena na železniční, tramvajový a automobilový průmysl.

5 ČELNÍ MODUL

Při volbě materiálů a jeho skladbě je nutno klást důraz na minimalizaci výsledné hmotnosti a ceny výrobku. Při návrhu čelního modulu se musí také přihlížet ke splnění požadavků na nehořlavost, kdy materiály musí vyhovět normě DIN 5510, stupeň 3, kde se jedná o drážní vozidlo pro povrchový provoz, případně v tunelech se zastávkami ve vzdálenosti max. 2 000 m.

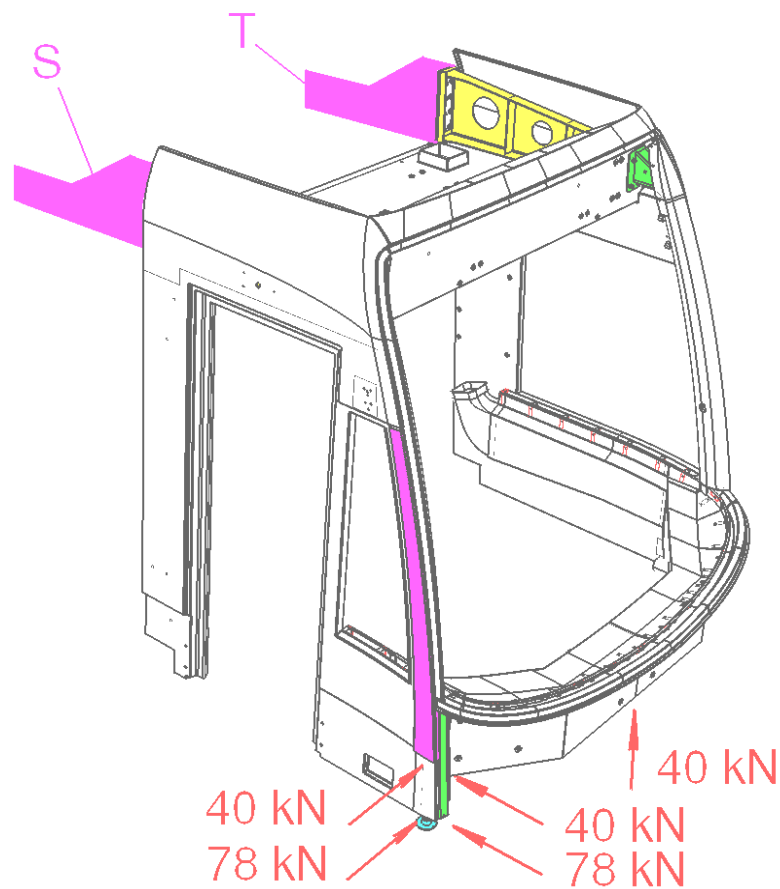


Obr. 43 Popis čelního modulu

A – čelník, B - čelní nadokenní část, C1 – střecha, D1 – bočnice, E1 – bočnice,
F - kanál pro rozvod vzduchu, H1 - A sloupek, G - A sloupek

Na čelní modul budou použity materiály jak ocelové, tak kompozitové. Nosné díly čel A, B, C, D a E jsou kompozitové sendvičové. Díly sloupků G, H a rozvod vzduchu F jsou kompozitové.

Na Obr. 44 jsou znázorněny možné zatěžující síly působící na čelní modul. Čelní modul musí odolat síle, vzniklé jako důsledek zvedání vozu za čelní partii spodku. Předpoklad je působení síly o velikosti 40 kN ve středu podokenní části a její přenesení do místa spoju čelního modulu s vaznicemi (S, T) skříně vozidla.



Obr. 44 Pevnostní požadavky čelního modulu
S, T – vaznice skříně vozidla

Skladba sendviče musí také zajistit tepelnou a hlukovou izolaci vnitřních prostorů kabiny řidiče. Součinitel prostupu tepla $U \max 2 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$.

V čelníku jsou umístěny závitové prvky, požadovaná pevnost proti vytržení závitového prvku ze struktury sendvičového dílu v ose šroubu je 800N.

5.1 Přehled použitých materiálů

Čelník bude vyroben ze sendvičového materiálu a jeho tvar a průřez je dán zadáním. Postup návrhu byl zvolen tak, že nejprve byly vybrány vhodné materiály pro sendvičovou skladbu, byly vyrobeny vzorky, které byly následně otestovány a porovnány s požadovanými vlastnostmi.

5.1.1 Jádno

Protože byl kladen vysoký důraz na nízkou hořlavost použitých materiálů, bylo voleno jádro sendviče z PET pěny a pro srovnání jádro ze SAN.

- PET

Byla vybrána pěna Airex T90.100 firmy Airex AG. Je to recyklovatelná polymerní pěna s uzavřenými buňkami s dobrou odolností proti ohni, kouři (FST). Její použití je vhodné ke všem typům zpracování a vhodná ke všem pryskyřicím. Pěna má čistě bílou barvu.

Tab. 4 Vlastnosti PET, Airex T90.100

Airex T90.100	Jednotka	T90.100
Hustota	kg/m ³	110
Pevnost v tlaku	N/mm ²	1,4
Modul pružnosti v tlaku	N/mm ²	85
Pevnost v tahu	N/mm ²	2,2
Modul pružnosti v tahu	N/mm ²	120
Pevnost ve smyku	N/mm ²	0,8
Tepečná vodivost	W/m.K	0,033

- SAN

Pěna firmy Gurit, M80. Vyznačuje se vysokou průtažností, vysokou teplotní odolností a nízkou absorpcí pryskyřice. Její použití je vhodné pro ruční laminaci, infúzi i prepreg. Pěna má nažloutlou barvu.

Tab. 5 Vlastnosti SAN, Gurit M80

Gurit M80	Jednotka	M80
Hustota	kg/m ³	85
Pevnost v tlaku	N/mm ²	1,02
Modul pružnosti v tlaku	N/mm ²	71
Pevnost v tahu	N/mm ²	1,62
Modul pružnosti v tahu	N/mm ²	72
Pevnost ve smyku	N/mm ²	1,09
Tepečná vodivost	W/m.K	0,04

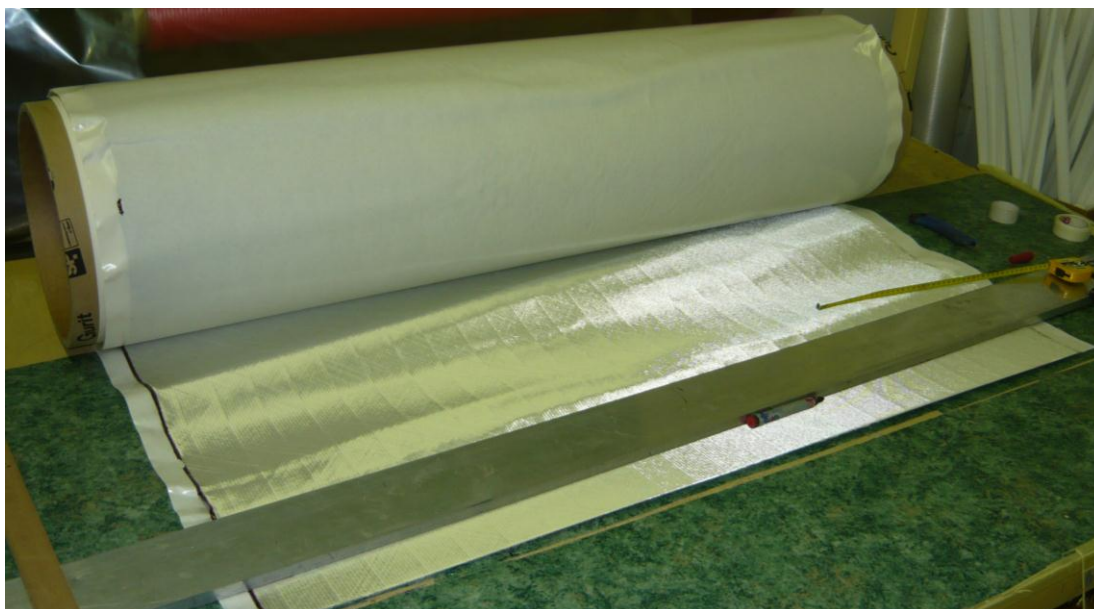
5.1.2 Tkaniny, rohože, prepreg

- Prepreg

Byl vybrán prepreg Sprint XE 905/SS od společnosti Gurit. Předimpregnovaná tkanina, skelná vlákna. Nízká toxicita kouře, bez halogenů, dobrá kvalita povrchu, vhodná pouze pro vakuové zpracování.

Tab. 6 Vlastnosti prepregu SprintXE905/SS

Sprint XE 905/SS	Jednotka	XE 905/SS	Testovací metoda
Obsah pryskyřice	%	39	-
Hmotnost vláken	g/m ²	900	-
Vazba		Biaxiální skel. vlákna	-
0° pevnost v tahu	MPa	457,7	BS EN ISO 527
0° modul pružnosti	GPa	22,86	BS EN ISO 527
45° pevnost v tahu	MPa	106,4	BS EN ISO 527
45° modul pružnosti	GPa	12,46	BS EN ISO 527
Odolnost hoření		Třída 0	BS476, 6



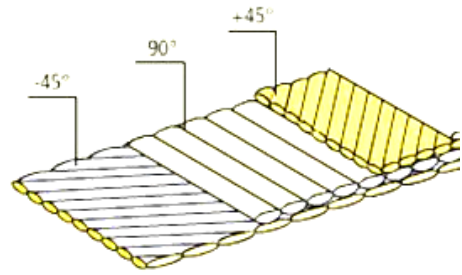
Obr. 45 Návin prepregu

- Tkanina

Byla vybrána tkanina se skleněnými vlákny firmy Saertex, typ S32EX010-00980-01270-283000.

Tab. 7 Vlastnosti tkaniny

Konstrukce vláken	Husota (g/m ²)
-45°	476
90°	29
+45°	476



Obr. 46 Bidiagonální struktura

- Rohož

Byly vybrány rohože pro ruční laminování firmy OCV, typ M123. Rohož vhodná pro ruční laminaci se skleněnými vlákny.

Rohože jsou vyrobeny z vláken z broušeného skla, náhodně strukturované a vzájemně spojeny pojivem. Rohože se vyznačují dobrou tvarovatelností, snadnou impregnací, vysokou pevností v tahu, vhodné pro kontinuální laminování.

Tab. 8 Vlastnosti rohože

Hustota (g/m ²)	Šíře (cm)	Průměr (cm)	Délka (m)
300	130/125	40	220
450			150



Obr. 47 Skelná rohož

5.1.3 Pryskyřice

Byla vybrána bezhalogénová polyesterová pryskyřice DION® FR 850-M850. K jejím kladům patří samozhášivost.

5.1.4 Gelcoat

Byl vybrán gelcoat Norpol NGA HX3 se zpomalovačem hoření. Technický list gelcoatu je přiložen v příloze.

Tab. 9 Tabulka vlastností gelcoatu

Norpol NGA HX3	Jednotky	Hodnota	Testovací metoda
Pevnost v tahu	MPa	min. 65	ISO 527-1993
Modul pružnosti	MPa	min. 3000	ISO 527-1993
Protažení	%	min. 3,0	ISO 527-1993
Teplotní odolnost	°C	min. 90	ISO 75-1993

Gelcoat je povrchová vrstva, která bývá použita na pohledových dílech s možností dalšího lakování dílu.

5.1.5 Lepidla

Pro vlepení závitových vložek (inzertů) byly použita a otestována 2 typy lepidel.

- Weld On SG300

Dvousložkové methakrylátové lepidlo pro lepení kovů, kompozitů a dalších plastových dílů. Materiálový list v příloze.

- Plexus MA310

Dvousložkové methakrylátové lepidlo pro lepení termoplastů, kovu a kompozitních materiálů. Po 15 až 18 minutách dosahuje 75% celkové pevnosti při pokojové teplotě. Vysoká pevnost a tuhost svazbou na širokou škálu materiálů.

Materiálový list v příloze.

6 VÝROBA ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ

Sendvičové materiály byly vyráběny na otevřené formě ve tvaru rovné desky, která byla rozřezána na jednotlivé zkušební vzorky. Výroba jednotlivých vzorků, volba materiálů se vždy odvíjela dle splněných kritérií při testování.

- Pomocné materiály

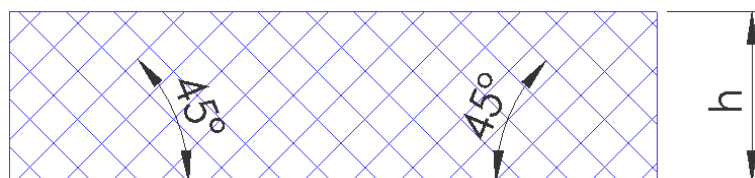
Nůžky, odtrhová fólie, odrthová tkanina, válečky, oboustrané těsnicí pásky, kotoučová pila.

6.1 Vzorek č.1

Pro vzorek č.1 byla použita technologie ručního kladení prepregů pod pružnou fólii, tzv. suchá cesta zpracování. Složení konstrukce je uvedeno v tabulce. Rozměr vyráběného sendviče byl 600x500mm.

Tab. 10 Sendvičová konstrukce č.1

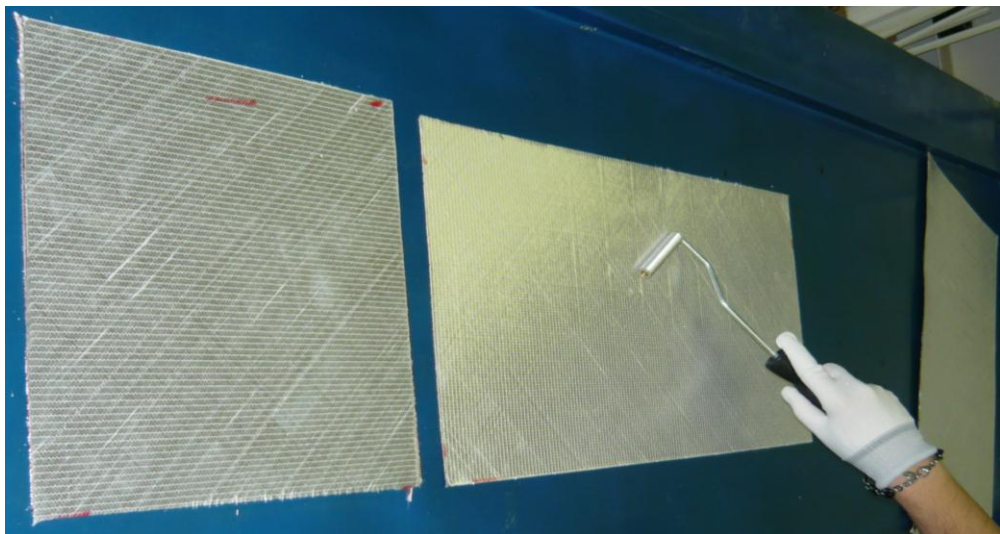
Vzorek č. 1	
Skladba	3-1-2
Počet výztužných vrstev	5
Materiál výztužných vrstev	Sprint XE 905/SS
1. Strana	Prepreg: 2xSprint XE 905/SS
Jádro	PET, Airex T90.100, tl.20mm
2. Strana	Prepreg: 3xSprint XE 905/SS



Obr. 48 Orientace vláken Prepregu ve vzorku

6.1.1 Postup výroby

- Na očištěnou formu byla nanесena vrstva separátoru a poté byly kladeny jednotlivé vrstvy prepregu.
- Každá vrstva byla válečkována pro lepší přilnutí k povrchu a odstranění vzduchových kapes. V případě složitějšího tvarování, je možné prepregy nahřívát pro lepší přilnutí, např. fénem.



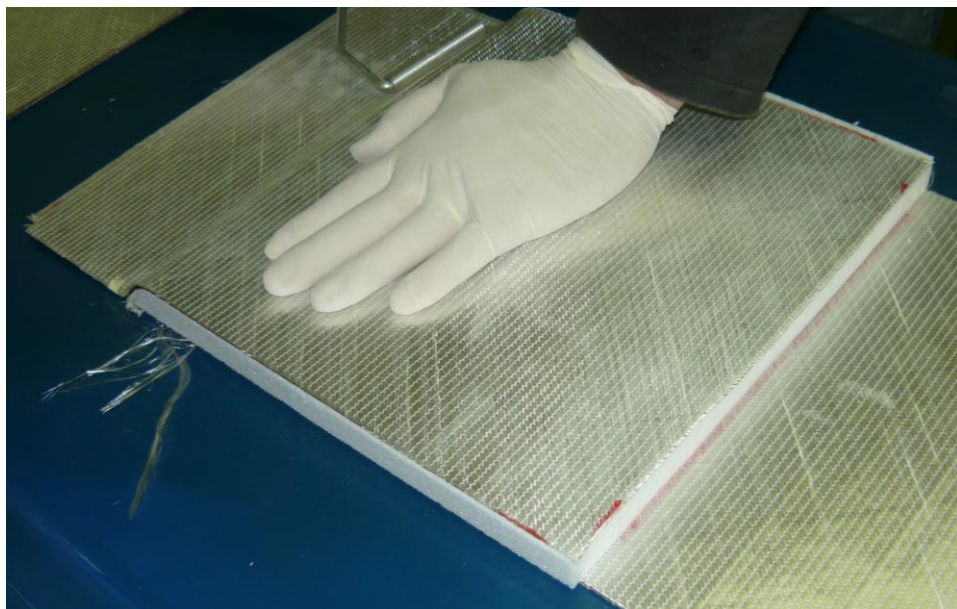
Obr. 49 Kladení prepregů na formu

- Mezi jednotlivé vrstvy prepregu byly vloženy vlákna, která slouží pro odvod možných vzduchových bublin.
- Na položené prepregy bylo položeno jádro sendviče, v případě vzorku č. 1 PET pěna tl. 20mm.
- Hrany byly sřezány pod úhlem 45° z důvodu lepšího prosvícení krajů pryskyřicí.



Obr. 50 Umístění jádra na prepreg

- V dalším kroku byly na jádro sendviče položeny zbylé 3 vrstvy prepregu.



Obr. 51 Umístění prepregů na jádro sendviče

- Na 3 vrstvy prepregu byla položena odtrhová vrstva a vrstva umožňující průnik přebytečné pryskyřice.



Obr. 52 Odtrhová vrstva



Obr. 53 Odsávací tkanina

- Na odsávací tkaninu byla položena vakuovací fólie v dostatečné velikosti, která byla po obvodu zafixována těsnicí páskou, v rozích a po obvodu udělány „uši“ a následně byla vakuovací fólie pomocí těsnicí pásky přitisknuta k formě a dobře utěsněna.

Obr. 54 Aplikace těsnicí pásky -200Y
Sealant Tape

Obr. 55 Vytvoření vakua 0,8 bar

- Napojení vakuovacího systému, dobré vypnutí vakuovací fólie pod tlakem 0,8 bar.
- Vytvrzení prbhalo teplotě 120°C pod stálým podtlakem po dobu 6 hodin.

6.2 Vzorek č. 2, č. 3

Pro vzorek č.2 a 3 byla použita technologie ruční laminace s lisováním pomocí vakua. Tato technologie je vhodná v případě, kdy potřebujeme zvýšit obsah výztuže a odsát přebývající pryskyřici pro zlepšení mechanických vlastností. Výroba dvou druhů sendvičové konstrukce byla spojena do jedné výroby, kde byly použity dva typy jádra (PET, SAN). Rozměr vyráběného sendviče byl 620x560 mm.

Složení jednotlivých konstrukcí je uvedeno v tabulkách.

Tab. 11 Sendvičová konstrukce č.2

Vzorek č. 2	
Skladba	3-1-2
Počet výztužných vrstev	5
Pryskyřice	DION® FR 850-M850
Gelcoat	NGA HX3
1. Strana	Rohože: 1x300+2x450 g/m ²
Jádro	PET, Airex T90.100, tl. 20mm
2. Strana	Rohože: 2x450 g/m ²

Tab. 12 Sendvičová konstrukce č.3

Vzorek č. 3	
Skladba	3-1-2
Počet výztužných vrstev	5
Pryskyřice	DION® FR 850-M850
Gelcoat	NGA HX3
1. Strana	Rohože: 1x300+2x450 g/m ²
Jádro	SAN, Gurit M80, tl. 20mm
2. Strana	Rohože: 2x450 g/m ²

6.2.1 Postup výroby

- Na očištěnou formu byla nanášena vrstva separátoru, na kterou byla nastříkána vrstva gelcoatu. Množství potřebného gelcoatu bylo určeno ze vztahu:

$$S_{p_{gelcoatu}} = S_{výrobku} \cdot 0,8$$

$$S_{p_{gelcoatu}} = 0,35 \cdot 0,8$$

$$S_{p_{gelcoatu}} = 0,28 \text{ kg}$$

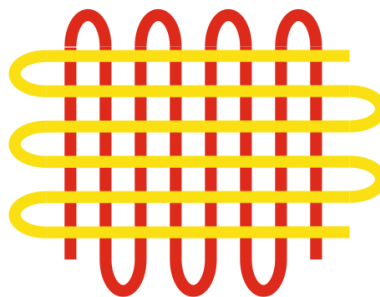


Obr. 56 Připravená vytvrzená vtrsva gelcoatu

- Stříkání gelcoatu bylo započato na vnější straně formy a postupně bylo vedeno dovnitř. Stříkácí pistoli je doporučeno držet kolmo k povrchu formy ve vzdálenosti 50-80 cm (v případě špatně přístupných míst se místo stříkácí pistole použije štětec).

Stříkání bylo prováděno rovnoběžně souvislým a příčným pohybem s překrytím asi 20% při stálé rychlosti tak, aby se vytvořila stejnoměrná vrstva.

Za vlhka byl zkontrolována síla vrstvy, která by se měla pohybovat v rozmezí 0,5 - 0,8 mm. Síla se kontroluje pomocí měřky.



Obr. 57 Postup stříkání gelcoatu

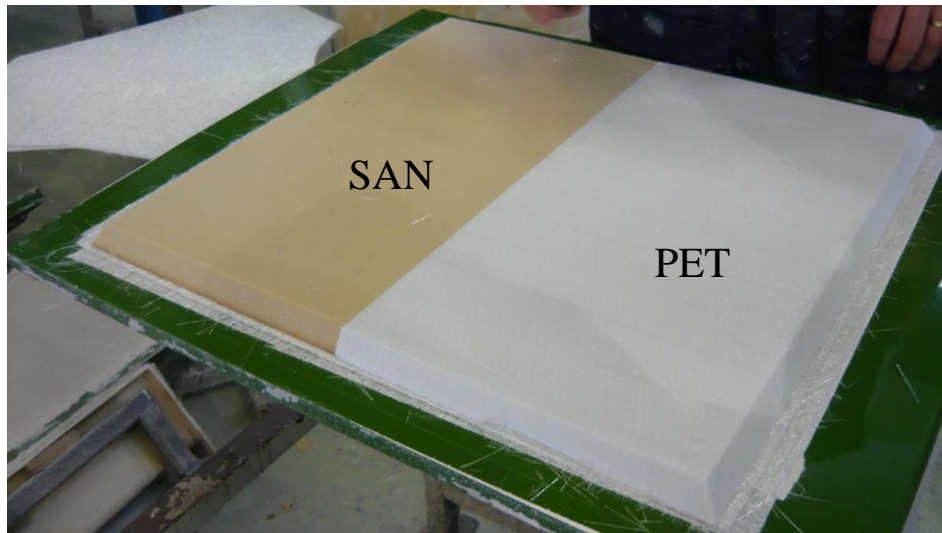
- Na vrstvu galcoatu byla nanesena vrstva pryskyřice DION® FR 850-M850.
- Celkové množství pryskyřice potřebné pro vyrobení sendviče bylo určeno ze vztahu:

$$S_{p\text{pryskyřice}} = S_{p\text{rohoží}} \cdot 2 \cdot K_{spz}$$

$$S_{p\text{pryskyřice}} = 0,75 \cdot 2 \cdot 1$$

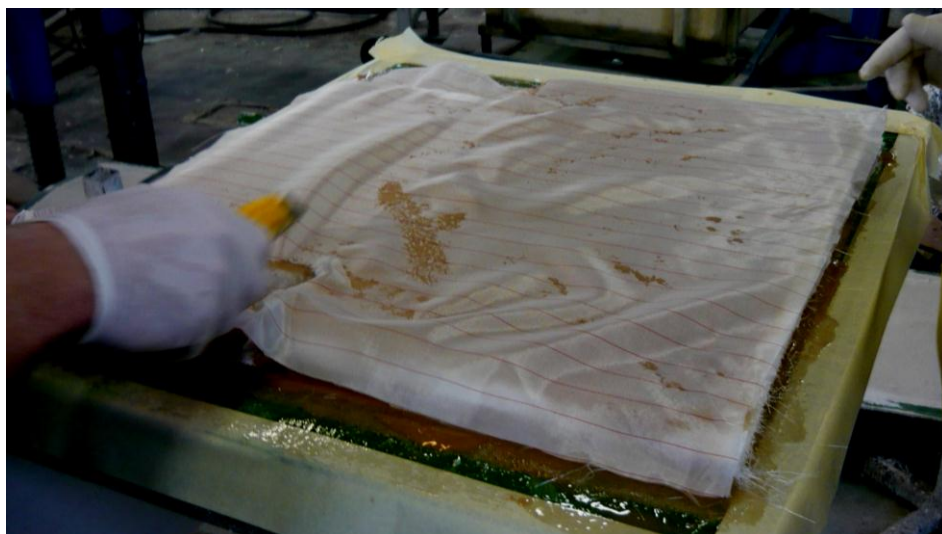
$$S_{p\text{pryskyřice}} = 1,5 \text{ kg}$$

- Do nanesené pryskyřice byla položena rohož. Celkem byly ze spodní strany položeny 3 vrstvy. Rohož 1x 300 g/m² + rohož 2x450 g/m².
- Každá vrstva rohože byla proložena pryskyřicí, která byla válečkem veválečkována do rohože.



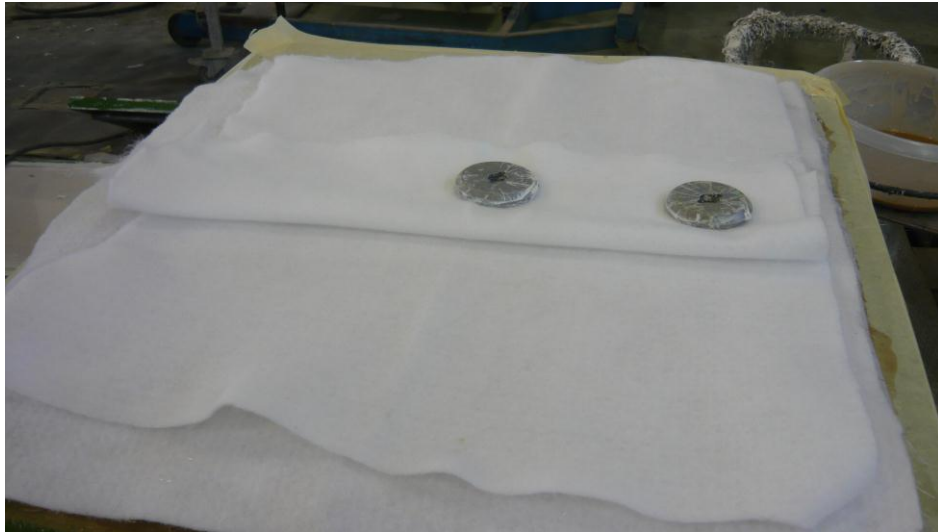
Obr. 58 Jádra sendvičové konstrukce – PET, SAN

- Na rohože prosycené pryskyřicí byla položena jádra (PET a SAN).
- Jádra byla opět prosycena pryskyřicí a byly postupně položeny se 2 vrstvy rohoží.



Obr. 59 Položení odtrhové tkaniny Peel-Ply

- Byla položena odtrhová a odsávací tkanina.



Obr. 60 Odsávací tkanina

- V závěrečné fázi byla položena vakuovací fólie, která byla fixována pomocí žluté těsnící pásky AT-200Y Sealant Tape. Při fixování fóli k formě musíme dbát na maximální těsnost. Při stříhání fólie musíme počítat s dostatečnou velikostí, aby zůstala volná i v komplikovanějších přechodech, záhybech. Při dodržení této podmínky bude fólie dobře utěsněna. Fólie se napojením k vakuovaci systému přisaje k povrchu výrobku.



Obr. 61 Napojení vakua

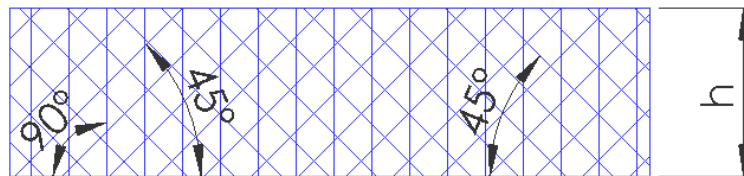
6.3 Vzorek č. 4

Pro vzorek č. 4 byla použita opět technologie ruční laminace s lisováním pomocí vakua. Rozdíl proti vzorku č. 2 je, že se jedná o vícevrstvou sendvičovou konstrukci. Postup výroby je však identický. Rozměr sendviče byl 620x560 mm.

Složení sendvičové konstrukce je uvedeno v tabulce.

Tab. 13 Sendvičová konstrukce č. 4

Vzorek č. 4	
Skladba	4-1-3-1-3
Počet výztužných vrstev	10
Pryskyřice	DION® FR 850-M850
Gelcoat	NGAX3
1. Strana	Rohož: 1x300+1x450 g/m ²
	Tkanina: 1xD9912
	Rohož: 1x300 g/m ²
Jádro	PET, Airex T90.100, tl. 15mm
Střed	Rohož: 1x300 g/m ²
	Tkanina: 1xD9912
	Rohož: 1x300 g/m ²
Jádro	PET, Airex T90.100, tl. 15mm
2. Strana	Rohož: 1x300 g/m ²
	Tkanina: 1xD9912
	Rohož: 1x300 g/m ²



Obr. 62 Orientace vláken bidiagonální tkaniny ve vzorku

6.4 Vzorek č. 5, č. 6

Vzorky č.5, 6 byly vyrobeny ze sendviče č. 4.

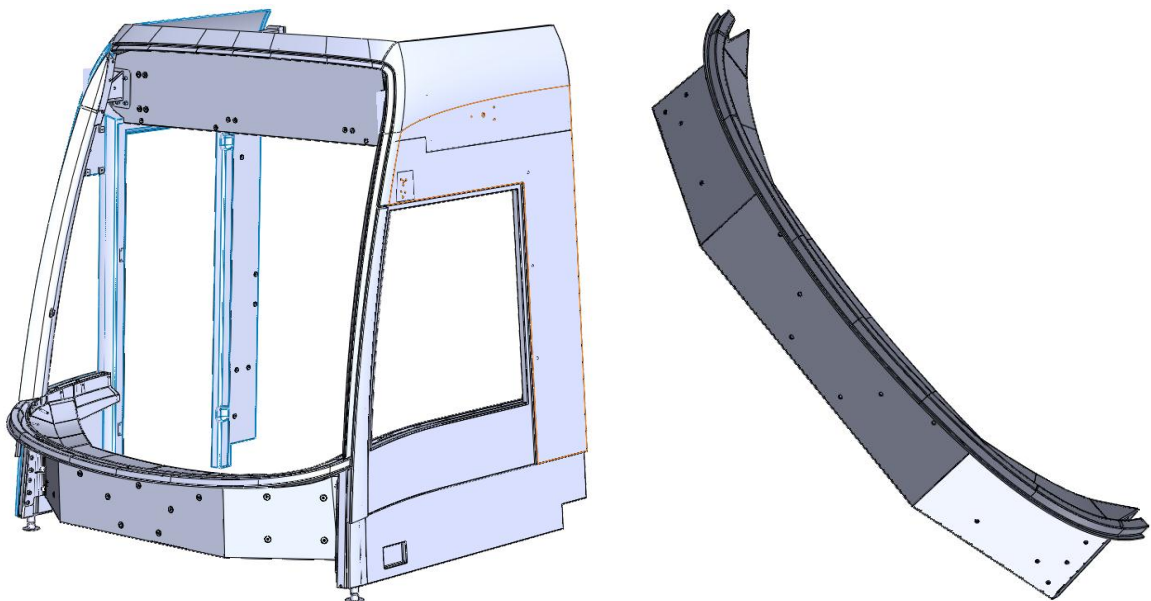
- Rozměr vzorku byl 100x100 mm.
- Ve vzorku byl vyvrtán vyfrézován otvor pro vlepění závitové vložky M10.
- Pro vlepění bylo použito lepidlo:
 - Weld On SG300
 - Plexus MA310

6.5 Pevnostní požadavky

Kvalifikovaný odhad možného zatížení čelníku bylo ve VÚKV a.s. stanoveno na hodnotu 40 kN. Tato síla má působiště ve spodní části podvozku, přes který působí na samotný čelník.

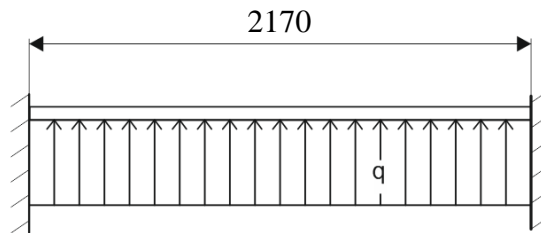


Obr. 63 Namontovaný čelní modul k vozu [28]



Obr. 64 Čelní modul + čelník

- Zjednodušený náčrt



Obr. 65 Schéma zatížení

- Velikost spojitého zatížení:

$$Q = q \cdot l$$

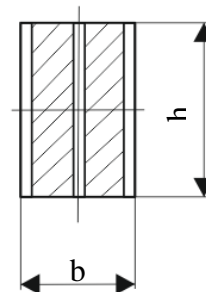
$$q = \frac{Q}{l} = \frac{40000}{2170} = 18,43 \text{ N/mm}$$

- Výpočet max. ohybového momentu

$$M_{o \max} = \frac{q \cdot l^2}{24}$$

- Průřezový modul v ohybu

$$W_o = \frac{b \cdot h^2}{6}$$



Aby výpočet byl přesnější, při výpočtu průřezového modulu nebudeme uvažovat tloušťku jádra. Nosným prvkem je v tomto případě především laminát.

- Výpočet ohybového napětí při max. předpokládaném spoj. zatížení q - vzorek č. 1

$$b=5\text{mm}, h=315\text{mm}, l=2170\text{mm}, q=18,43\text{N/mm}$$

$$\sigma_o = \frac{M_{o \max}}{W_o}$$

$$\sigma_o = \frac{M_{o\max}}{W_o} = \frac{\frac{q.l^2}{24}}{\frac{b.h^2}{6}} = \frac{q.l^2}{24} \cdot \frac{6}{b.h^2} = \frac{q.l^2}{4.b.h^2}$$

$$\sigma_o = \frac{M_{o\max}}{W_o} = \frac{q.l^2}{4.b.h^2} = \frac{18,43.2170^2}{4.5.315^2} = \frac{86,785.10^6}{1,985.10^6} = 43,47MPa$$

- Výpočet ohybového napětí při předpokládaném spoj. zatížení q - vzorek č. 2, 3
b=5mm, h=315mm, l=2170mm, q=18,43N/mm

$$\sigma_o = \frac{M_{o\max}}{W_o} = \frac{q.l^2}{4.b.h^2} = \frac{18,43.2170^2}{4.5.315^2} = \frac{86,785.10^6}{1,985.10^6} = 43,47MPa$$

- Výpočet ohybového napětí při předpokládaném spoj. zatížení q - vzorek č. 4
b=10mm, h=315mm, l=2170mm, q=18,43N/mm

$$\sigma_o = \frac{M_{o\max}}{W_o} = \frac{q.l^2}{4.b.h^2} = \frac{18,43.2170^2}{4.10.315^2} = \frac{86,785.10^6}{3,969.10^6} = 21,86MPa$$

7 TESTOVÁNÍ VZORKŮ

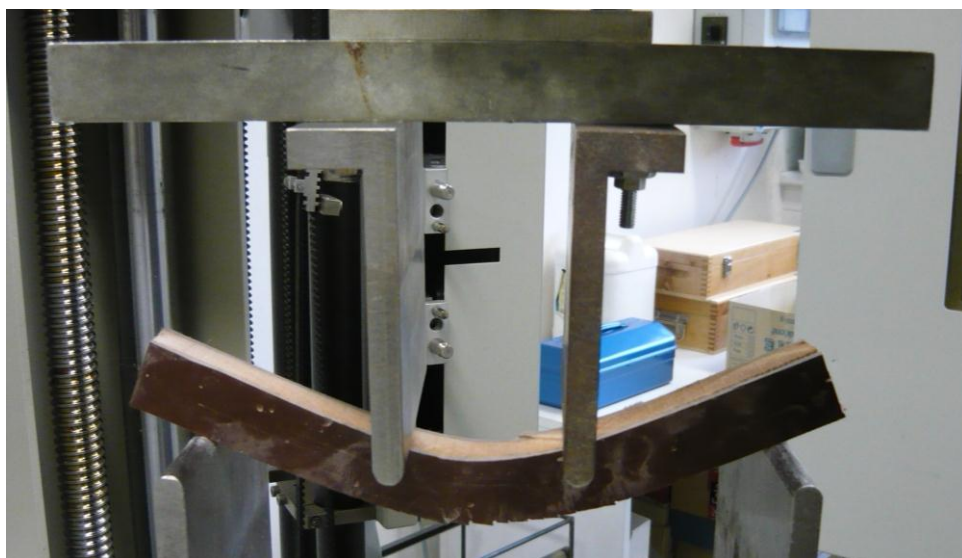
Vzorky byly testovány na trhacím stroji Zwick 1456 v laboratoři UTB, Fakulty Technologické. Software pro měření byl použit Zwick II v3.31.



Obr. 66 Testovací stroj Zwick 1456

- Test na 3, 4 bodový ohyb – vzorek č. 1, 2, 3, 4
- Test na vytržení – vzorek č. 5, 6
- Test na odlup
- Součinitel prostupu tepla

7.1 Vzorek č. 1



Obr. 67 4-bodový ohyb - prepreg

Tab. 14 Naměřené hodnoty vzorek č. 1 – 3-bodový ohyb

Poř. č.	a_0 (mm)	b_0 (mm)	σ_m (MPa)	E (MPa)
1.	24,2	25,3	82,73	2301
2.	24	24,8	73,90	1921
3.	24,2	24,6	65,25	2105
4.	24,5	24,3	70,12	2086
5.	24,6	24,8	72,13	2132
\bar{x}	24,3	24,76	72,83	2109
s	0,245	0,365	6,41	135,4
ν	1,01	1,47	8,08	6,42

Tab. 15 Naměřené hodnoty vzorek č. 1 – 4-bodový ohyb

Poř. č.	a_0 (mm)	b_0 (mm)	σ_m (MPa)	E (MPa)
1.	24,5	25,2	72,73	1016,01
2.	24,3	24,9	63,90	774,01
3.	24,6	24,9	66,12	863,25
4.	24,9	24,8	71,06	940,21
5.	24,8	25	69,85	913,68
\bar{x}	24,62	24,96	68,73	901,4
s	0,239	0,152	3,63	90,1
ν	0,97	0,61	5,29	10,0

Vyhodnocení

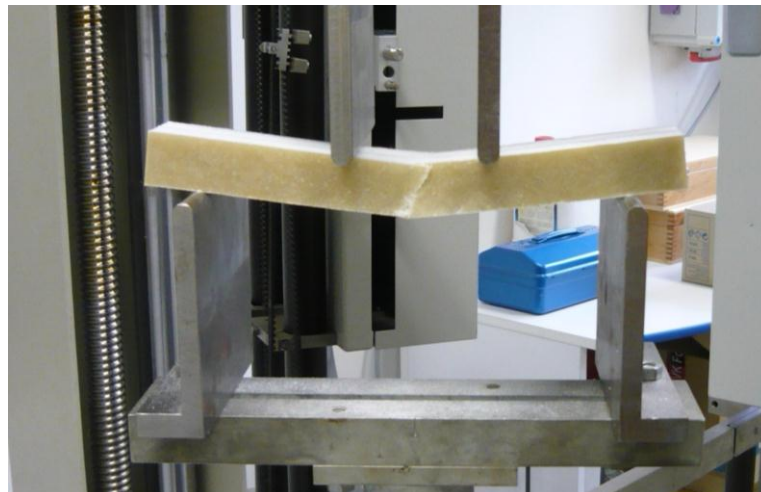
Vzorek č. 1 vyhovuje podmínce $\sigma_m > \sigma_{dov}$.

Dovolené napětí $\sigma_{dov} = 43,47$ MPa, napětí v ohybu $\sigma_m = 68,73$ MPa. Koeficient bezpečnosti $k = 1,58$.

7.2 Vzorek č. 2

Tab. 16 Naměřené hodnoty vzorek č. 2 – 3-bodový ohyb

Poř. č.	a_0 (mm)	b_0 (mm)	σ_m (MPa)	E (MPa)
1.	25,25	24,3	65,45	2180,32
2.	25,25	24,3	63,17	1960,19
3.	25	23,8	62,03	1732,53
4.	25,2	24,2	66,86	2050,11
5.	25,1	24,3	65,08	2131,06
\bar{x}	25,16	24,18	64,518	2010,8
s	0,108	0,217	1,916	176,6
ν	0,43	0,9	2,97	8,78



Obr. 68 4-bodový ohyb - laminát

Tab. 17 Naměřené hodnoty vzorek č. 2 – 4-bodový ohyb

Poř. č.	a_0 (mm)	b_0 (mm)	σ_m (MPa)	E (MPa)
1.	25,1	24,5	55,27	893,66
2.	25,3	24,8	57,41	855,64
3.	24,7	24,4	57,97	805,88
4.	24,8	25,1	63,59	799,40
5.	24,9	25,3	55,12	860,21
\bar{x}	24,96	24,82	57,87	843,0
s	0,241	0,383	3,44	39,7
ν	0,96	1,54	5,94	4,71

Vyhodnocení

Vzorek č. 2 vyhovuje podmínce $\sigma_m > \sigma_{dov}$.

Dovolené napětí $\sigma_{dov} = 43,47$ MPa, napětí v ohybu $\sigma_m = 57,87$ MPa. Koeficient bezpečnosti $k = 1,3$.

7.3 Vzorek č. 3

Tab. 18 Naměřené hodnoty vzorek č. 3 – 3-bodový ohyb

Poř. č.	a ₀ (mm)	b ₀ (mm)	σ_m (MPa)	E (MPa)
1.	24,9	25,2	58,12	1620,03
2.	25,3	25,1	59,31	1618,78
3.	25	24,3	60,65	1676,18
4.	24,9	24,1	61,03	1632,41
5.	24,7	25,1	59,48	1610,13
\bar{x}	24,96	24,76	59,718	1631,5
s	0,219	0,518	1,158	26,2
ν	0,88	2,09	1,94	1,61

Tab. 19 Naměřené hodnoty vzorek č. 3 – 4-bodový ohyb

Poř. č.	a ₀ (mm)	b ₀ (mm)	σ_m (MPa)	E (MPa)
1.	25,1	24,8	52,12	782,11
2.	25,3	25	56,76	853,46
3.	25	24,9	55,03	790,43
4.	24,9	24,6	54,73	815,31
5.	25	24,7	54,93	823,07
\bar{x}	25,060	24,8	54,714	812,9
s	0,152	0,158	1,663	28,3
ν	0,61	0,64	3,04	3,48

Vyhodnocení

Vzorek č. 3 vyhovuje podmínce $\sigma_m > \sigma_{dov}$.

Dovolené napětí $\sigma_{dov} = 43,47$ MPa, napětí v ohybu $\sigma_m = 54,714$ MPa. Koeficient bezpečnosti $k = 1,26$.

7.4 Vzorek č. 4

Tab. 20 Naměřené hodnoty vzorek č. 4 – 3-bodový ohyb

Poř. č.	a ₀ (mm)	b ₀ (mm)	σ _m (MPa)	E (MPa)
1.	24,8	38,9	36,65	3006,69
2.	24,9	38,4	36,18	2837,92
3.	24,6	38,7	36,43	2914,03
4.	25,4	38,4	37,23	2923,12
5.	24,2	39,2	36,49	2978,31
\bar{x}	24,78	38,72	31,356	2932,0
s	0,438	0,342	0,736	65,1
ν	1,77	0,117	2,35	2,22

Tab. 21 Naměřené hodnoty vzorek č. 4 – 4-bodový ohyb

Poř. č.	a ₀ (mm)	b ₀ (mm)	σ _m (MPa)	E (MPa)
1.	25	37,6	65,27	993,66
2.	25,4	38,5	67,41	955,64
3.	25,4	39,1	67,97	905,88
4.	25,3	38,3	73,59	899,40
5.	25,5	37,5	65,78	986,15
\bar{x}	25,32	38,2	68,0	948,1
s	0,192	0,663	3,32	44,0
ν	0,76	1,74	4,88	4,64

Vyhodnocení

Vzorek č. 3 vyhovuje podmínce $\sigma_m > \sigma_{dov}$.

Dovolené napětí $\sigma_{dov} = 21,86$ MPa, napětí v ohybu $\sigma_m = 54,714$ MPa. Koeficient bezpečnosti $k = 2,5$.

7.5 Test závitové vložky – vzorek č. 5

Upnutí vzorku na trhacím stroji. Skladba sendviče s vlepenou záv. vložkou je identické se vzorkem č. 4. Rozměr vzorku je 100x100 mm.



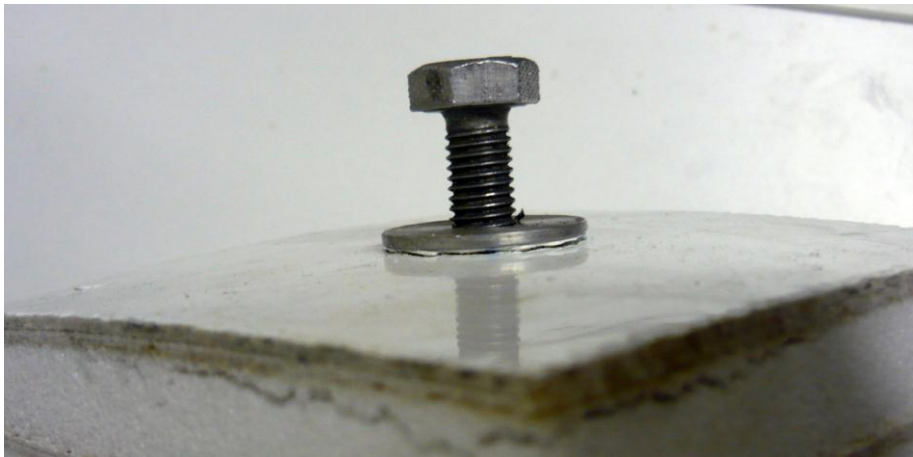
Obr. 69 Upnutí při trhacím testu záv. vložky

Tab. 22 Naměřenné hodnoty - vytrhnutí záv. vložky

Poč. č.	a_0 (mm)	b_0 (mm)	Rm (N)
1.	0,38	30	2800,02
2.	0,38	30	3047,80

Vyhodnocení

Byly otestovány 2 druhy lepidel. Průměrná síla potřebná pro vytržení z materiálu sendviče byla 2924 N. V zadávacích podmínkách je podmínka 800 N proti vytržení. Obě lepidla jsou vyhovující.



Obr. 70 Porušení jádra



Obr. 71 Vytržená závitová vložka

7.6 Odlup

Vzorky jsou identického složení se vzorky č. 1, 2 a 3. Byla měřena síla potřebná k porušení soudržnosti vnější vrstvy laminátu a jádra sendvičového materiálu.



Obr. 72 Test odlupu

7.6.1 Prepreg - PET

Tab. 23 Naměřené hodnoty odlupu Prepreg - PET

Poř. č.	a_0 (mm)	b_0 (mm)	F (N)	E (MPa)
1.	2	24	52,7	486
2.	2	24	79,7	551
3.	2	24	26,1	255
4.	2	24	98,7	647
5.	2	24	105	663
\bar{x}	2	24	72,4	520,4
s	0	0	32,9	165
ν	0	0	45,47	31,71

7.6.2 Laminát - PET

Tab. 24 Naměřené hodnoty odlupu Laminát - PET

Poř. č.	a_0 (mm)	b_0 (mm)	F (N)	E (MPa)
1.	2	24	177	712
2.	2	24	111	715
3.	2	24	186	869
4.	2	24	181	671
5.	2	24	167	963
\bar{x}	2	24	164,4	786
s	0	0	30,7	124,5
ν	0	0	18,65	15,83

7.6.3 Laminát - SAN

Tab. 25 Naměřené hodnoty odlupu Laminát - SAN

Poř. č.	a_0 (mm)	b_0 (mm)	F (N)	E (MPa)
1.	2	24	88,4	290
2.	2	24	73,9	450
3.	2	24	92,9	715
4.	2	24	85,4	294
5.	2	24	83,9	584
\bar{x}	2	24	84,9	466
s	0	0	7,04	184,9
ν	0	0	8,3	39,63

Vyhodnocení

Nejlepší výsledky soudržnosti mezi jádrem a laminátem vykázaly vzorky laminát-PET. Průměrná síla potřebná k odlupu byla naměřena 164,4 N. Jsou to dvojnásobné hodnoty vzhledem k vzorkům prepreg-PET (72,4 N) a laminát-SAN (84,9 N).

7.7 Součinitel prostupu tepla

Pro zajištění tepelné izolace vnitřních prostor kabiny řidiče musí skladba sendvičového materiálu splňovat požadavek součinitele prostupu tepla $U \max. 2 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$.

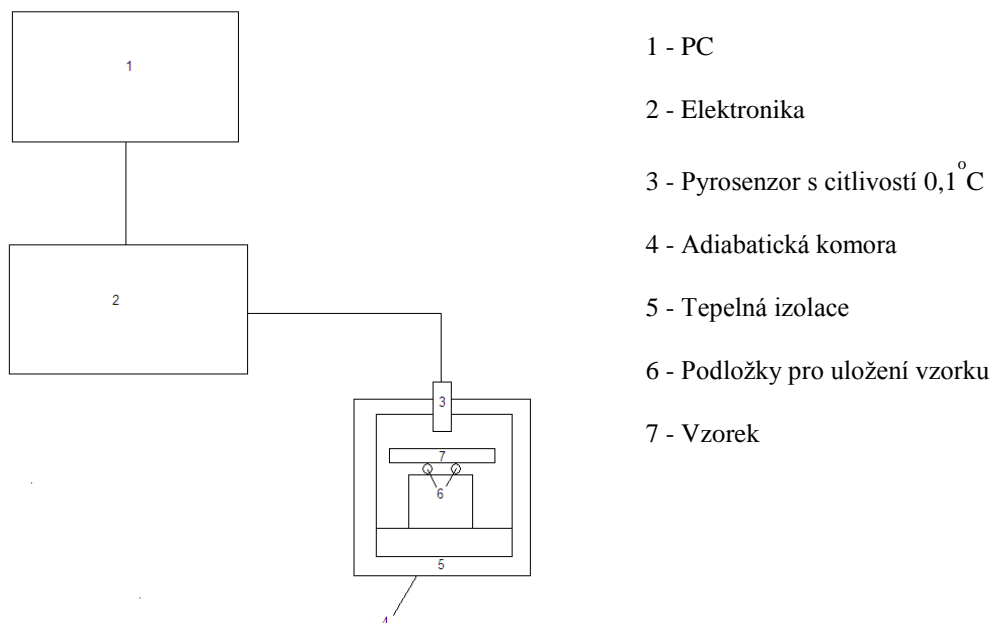
Součinitel tepelné vodivosti laminátu byl naměřen ve spolupráci s Fakultou metalurgie a materiálového inženýrství VŠB-TU.

7.7.1 Postup měření

Jedná se o způsob určení tepelné vodivosti z poklesu teploty vzorku chladičímho v převážně nekonduktivním režimu.

Příprava vzorku:

- vzorek musí být jemně broušený, příp. leštěný
- tloušťka vzorku musí být co nejnižší (čím nižší vodivost, tím menší tloušťka)
- povrch vzorků musí být nastříkaný černým matným lakem (emisivita) [29]



Obr. 73 Schéma testovacího zařízení [29]

- Vzorek se ohřeje nad teplotu okolí, obvykle na cca 50 °C.
- Poté se vzorek vloží do adiabatické komory, která se uzavře.
- Pomocí PC se spustí automatické načítání časových změn teploty (10 min.).



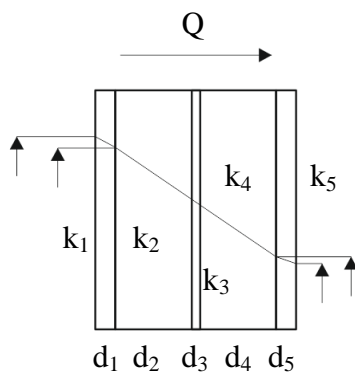
Obr. 74 Testovací komora [29]

Tab. 26 Naměřené hodnoty tepelných parametrů

Parameter	Měření 1	Měření 2	Měření 3	Průměr
$dT_{\max}(\text{°C})$	9,937	14,72	12,35	12,336
$T_{\text{amb}}(\text{°C})$	24,35	24,72	24,80	24,623
$\tau(\text{s})$	88,03	87,14	87,50	87,557
$h(\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1})$	28,6	28,66	28,7	28,653
$c_p(\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	1406	1394	1401,2	1400,4
$\alpha(\text{mm}^2\cdot\text{s}^{-1})$	0,1135	0,1147	0,1139	0,1140
$k(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	0,2469	0,2472	0,247	0,2470

Tab. 27 Teplná vodivost PET pěny

$k(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	0,033
---	-------



- d – tloušťka vrstvy [m]
- k - součinitel tepelné vodivosti [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]
- $d_{1,3,5}$ – tloušťka laminátu
- $d_{2,4}$ – tloušťka jádra

$$U = \frac{1}{\frac{d_1}{k_1} + \frac{d_2}{k_2} + \frac{d_3}{k_3} + \frac{d_4}{k_4} + \frac{d_5}{k_5}}$$

$$U = \frac{1}{\frac{d_1}{k_1} + \frac{d_2}{k_2} + \frac{d_3}{k_3} + \frac{d_4}{k_4} + \frac{d_5}{k_5}} = \frac{1}{\frac{0,004}{0,247} + \frac{0,015}{0,033} + \frac{0,003}{0,247} + \frac{0,015}{0,033} + \frac{0,003}{0,247}} =$$

$$= \frac{1}{0,016 + 0,45 + 0,012 + 0,45 + 0,012} = \frac{1}{0,94} = 1,05 \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-1}$$

Vyhodnocení

V zadávací podmínce je požadavek na splnění součinitele prostupu tepla U max. $2 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$. Skladba sendvičového vzorek č.4 plně vyhovuje. Součinitel prostupu tepla $U = 1,05 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$.

7.8 Diskuse výsledků

Diplomová práce se zabývá návrhem vhodných materiálů pro skladbu sendvičové struktury s použitím na konkrétní díl předního modulu tramvaje. Výroba jednotlivých vzorků a volba materiálů se vždy odvíjela dle splněných kritérií při testování.

Ze sendvičového materiálu bude vyráběn čelník předního modulu tramvaje Škoda 15T. Čelník bude možné zatížit silou o velikosti 40 kN, která bude přes podvozek působit spojitým zatížením na čelník. K dalším dílům ze sendvičového materiálu patří střecha modulu, avšak na tento díl již nejsou kladeny takové podmínky.

Celkem bylo otestováno 62 vzorků v 5 různých zkouškách. Byl proveden 3-bodový a 4-bodový ohyb, test odlupu, test lepení a zjištění tepelné vodivosti laminátu se skelnou výztuží.

Ze zkoušek odlupu nejlépe dopadla kombinace materiálů laminát-PET pěna. Síla potřebná k odlupu vnější vrstvy od jádra je vyšší o 92%, než u varianty laminát-SAN a prepreg-PET. PET pěna Airex T90 zároveň také splňuje podmínky nehořlavosti a hustoty kouře a tato kombinace materiálů je ideální pro tuto konkrétní aplikaci.

Výsledek ohybových zkoušek ukazuje důvody použití tkanin s orientovanými vlákny a jejich správné orientování na výrobku. Porovnáním vzorků č. 1 a č. 2 vidíme, že u vzorku č. 1 s použitím orientovaných vláken došlo ke zvýšení pevnosti o 16%. Pevnostní podmínku splnily všechny testované vzorky na ohyb, avšak z bezpečnostních důvodů je doporučována skladba vzorku č. 4, kde koeficient bezpečnosti $k = 2,5$. Při vyhodnocení ohybových zkoušek bereme v úvahu výsledky 4-bodového ohybu, který lépe vystihuje reálné zatížení.

Pevnost lepení závitových vložek do sendvičového materiálu splňují obě použítá lepidla. Podmínka odolání působení síly 800 N proti vytržení v ose šroubu je splněna. Naměřená síla potřebná pro vytržení záv. vložky je 2924 N.

Součinitel prostupu tepla sendvičovou strukturou $U = 1,05 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ vyhovuje podmínce $U = \max 2 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$. Tuto podmínku splní jak kombinace laminát-PET, tak i prepreg-PET a laminát-PET.

ZÁVĚR

Diplomová práce je rozdělena na dvě části. V teoretické části je zpracována problematika kompozitních materiálů, sendvičových konstrukcí a jejich testování.

V praktické části jsou popsány jednotlivé vybrané materiály, je popsána vlastní výroba a testování vyrobených vzorků.

Vzorky byly vyráběny ruční laminací s lisováním pod pružnou folií pomocí vakua a kladením prepregového materiálu pod pružnou fólii. Obě zvolené výrobní technologie jsou bezproblémové a ve firmě Form s.r.o. s nimi mají dlouholetou praktickou zkušenost.

Práce poskytla cenné poznatky jak z hlediska použitých materiálů, tak výrobních postupů. Zároveň je důležité provedení dalších dílčích testů pro ověření celkové sestavy předního modulu metodou konečných prvků. Mezi tyto testy budou patřit hodnoty modulů pružnosti, poissonovy konstanty a tahové zkoušky jednotlivých samostatných materiálů, z nichž budou sendvičové a kompozitní díly složeny.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] AGARWAL, Bhagwan D - BROUTMAN, Lawrence J. *Vláknové kompozity*. 1. vyd. Praha : SNTL, 1987. 294 s.
- [2] BAREŠ, Richard A. *Kompozitní materiály*. 1. vyd. Praha : SNTL, 1988. 325 s. ISBN
- [3] Kořínek , Zdeněk. *Kompozity* [online]. [cit. 05. 09. 2011] Dostupné z <http://www.volny.cz/zkorinek/>
- [4] DADOUREK, Karel. *Kompozitní materiály - druhy a jejich užití*. Vyd. 1. Liberec : Technická univerzita v Liberci, 2007. 114 s. ISBN 978-80-7372-279-1 (brož.).
- [5] RUSNÁKOVÁ, Soňa. *Kompozitní materiály: Přednášky a cvičení*. In: [online]. [cit. 2011-12-20].
- [6] *S stefanmichna.com* [online]. c2007 [cit. 2011-01-11].Kompozitní materiály. Dostupné z WWW: <http://www.stefanmichna.com/download/technickematerialy_II/kompozitni_materialy.pdf>
- [7] Gottfried W. Ehrenstein. *Polymerní kompozitní materiály*. 1. vyd. Praha: Scientia, 2009. 350 s. ISBN 978-80-86960-29-6
- [8] KOŘÍNEK, Zdeněk. <http://www.volny.cz/zkorinek/vlakna.pdf> [online]. [cit. 2012-12-08].
- [9] <Http://www.directindustry.com/prod/diab-ab/balsa-core-materials-for-composites-54826-359433.html> [online]. [cit. 2012-12-03].
- [10] REINFORCEDPLASTICS. <Http://www.reinforcedplastics.com/> [online]. [cit. 2012-11-12].
- [11] [online]. [cit. 2012-01-19]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/sendvicove-konstrukce.html>
- [12] [online]. [cit. 2012-01--17]. Dostupné z: <http://www.f1technical.net/forum/viewtopic.php?f=6&t=8832&start=15>
- [13] [online]. [cit. 2012-01--17]. Dostupné z: [http://cs.wikipedia.org/wiki/Sendvič_\(laminát\)](http://cs.wikipedia.org/wiki/Sendvič_(laminát))
- [14] [online]. [cit. 2012-01--17]. Dostupné z: [http://cs.wikipedia.org/wiki/Voština_\(kompozit\)](http://cs.wikipedia.org/wiki/Voština_(kompozit))

- [15] CANADIANHONEYCOMB. [online]. [cit. 2011-11-13]. Dostupné z: [15]
<http://www.canadianhoneycomb.com/>
- [16] [online]. [cit. 2012-01-20]. Dostupné z:
http://wood.mendelu.cz/cz/sections/Props/files/verejny/MVD/Jancar%20-%20Uvod%20do%20materialoveho%20inzenyrstvi%20kompozitu/skripta_1.doc
- [17] [online]. [cit. 2011-11-20]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Balsa>
- [18] J. M. DAVIES. *Lightweight sandwich construction*. John Wiley & Sons, 2001.
- [19] [online]. [cit. 2011-11-21]. Dostupné z:
http://www.ellri.cz/vyroba_na_zakazku/Prepreg_sendvic_konstr.htm
- [20] [online]. [cit. 2012-01-21]. Dostupné z:
http://www.hexcel.com/Resources/DataSheets/Brochure-Data-Sheets/Honeycomb_Attributes_and_Properties.pdf
- [21] [online]. [cit. 2012-01-19]. Dostupné z: <http://www.posterus.sk/?p=7861>
- [22] [online]. [cit. 2011-11-23]. Dostupné z: <http://www.posterus.sk/?p=7871>
- [23] [online]. [cit. 2011-11-23]. Dostupné z: <http://www.posterus.sk/?p=8404>
- [24] [online]. [cit. 2012-01-15]. Dostupné z:
http://www.hexcel.com/Resources/DataSheets/Brochure-Data-Sheets/Sandwich_Panel_Fabrication_Technology.pdf
- [25] ZENKER, D. *Sandwich Constructions*. Londýn: Emas, 2000, 439 s.
- [26] [online]. [cit. 2012-02-13]. Dostupné z:
<http://drogo.fme.vutbr.cz/opory/pdf/umvi/zk.raz.ohybu.pdf>
- [27] Mechanické vlastnosti [online]. [cit.2012-05-02]. Dostupný z WWW:
http://www.ateam.zcu.cz/mechanicke_vlastnosti.pdf.
- [28] IDNES.CZ. [online]. [cit. 2011-10-18].
- [29] KOŠTIAL, Pavol. Zariadenie na bezkontaktné a automatické meranie tepelnej a teplotnej vodivosti ako aj mernej tepelnej kapacity tuhých látok (úžitkový vzor). [online]. [cit. 2012-05-08].

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

μm	mikrometr
a_0	rozměr v mm
AF	aramidová vlákna
ASTM	americká norma
b	šířka profilu
b_0	rozměr v mm
CF	uhlíková vlákna
DIN	německá národní norma
E	modul pružnosti
F	síla
FST	fire smoke toxicity
GF	skelné vlákna
h	výška profilu
K	kelvin
kN	kilonewton
l	velikost buňky
m	metr
M	moment
M_{omax}	maximální ohybový moment
MPa	megapascal
N	newton

PEI	polyetherimid
PET	polyethylentereftalát
PS	polystyren
PUR	polyuretan
PVC	polyvinylchlorid
Q	síla
q	spojité zatížení
R_m	mez pevnosti
RIM	Reaction Injection Molding
RTM	Resin Transfer Molding
SAN	styreneacrylonitril
t	tloušťka stěny
U	součinitel prostupu tepla
W_o	modul průřezu v ohybu
σ	napětí

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1: Synergické chování složek kompozitu [6].....	13
Obr. 2: Tahový diagram křehké matrice a kompozitu [6].....	14
Obr. 3: Jevy na rozhraní matrice a výztuhy [6].....	14
Obr. 4: rozdělení kompozitních materiálů podle geometrie a orientace výztuže [3].....	15
Obr. 5 Schéma výroba textilních skleněných vláken tažením z trysek [7]	16
Obr. 6 Schéma výroba aramidových vláken [7].....	17
Obr. 7 Schéma výroby uhlíkových PAN-vláken [7]	18
Obr. 8 A – Sendvičový panel, B – vnější vrstvy, A – jádro [12]	21
Obr. 9 Prepregová sendvičová konstrukce [19]	23
Obr. 10 Balsa [17].....	25
Obr. 11 Balsové jádro [9]	25
Obr. 12 Papírová voština [15].....	25
Obr. 13 Postup výroby plechové voštiny [5]	26
Obr. 14 Šestihranná voština [20]	26
Obr. 15 OX-Core voština [20]	27
Obr. 16 Flex jádro [20]	27
Obr. 17 Způsoby zatěžování voštin [5].....	28
Obr. 18 Pěny [10].....	29
Obr. 19 a) Honeycomb b) pěna s otevř. buňkami c) pěna s uzavř. buňkami [21]	30
Obr. 20 Pracovní diagram pěn TAH – TLAK [23].....	30
Obr. 21 Charakteristický tvar tlakové křivky pěn [23]	31
Obr. 22 Tahové diagramy pěn [23]	31
Obr. 23 Čelní lepení s podporou [25]	34
Obr. 24 Lepený tupý spoj H [25]	34
Obr. 25 Čelní lepený spoj s interní podporou [25]	34
Obr. 26 Rohové spojení polodrážkou [25].....	34
Obr. 27 Rohové spojení s podporou L lišt [25]	34
Obr. 28 Rohové spojení – ostrý roh [25]	35
Obr. 29 Rohové spojení - zaoblený roh [25].....	35
Obr. 30 T – spojení L lištami [25]	35
Obr. 31 T – spojení pero – drážka [25].....	35

Obr. 32 Výplňová hrana [25]	35
Obr. 33 U-hrana [25]	35
Obr. 34 Vlepená hrana vhodná pro silnější panely [25]	36
Obr. 35 Uzavření hrany páskou [25].....	36
Obr. 36 Rovnováha úseku defonovaný uzavřenou cestou kolem síly Q.....	36
Obr. 37 Koncetrovaná síla a moment na ploše	37
Obr. 38 Průběh ohybového momentu u nosníku na dvou podporách [27]	39
Obr. 39 Průběh ohybového momentu	40
Obr. 40 Climbing drum test [25]	41
Obr. 41 DCB peel test [25]	42
Obr. 42 Peel test – Air pressure [25]	42
Obr. 43 Popis čelního modulu	45
Obr. 44 Pevnostní požadavky čelního modulu S, T – vaznice skříně vozidla.....	46
Obr. 45 Návin prepregu	48
Obr. 46 Bidiagonální struktura	49
Obr. 47 Skelná rohož	49
Obr. 48 Orientace vláken Prepregu ve vzorku.....	51
Obr. 49 Kladení prepregů na formu.....	52
Obr. 50 Umístění jádra na prepreg.....	53
Obr. 51 Umístění prepregů na jádro sendviče.....	53
Obr. 52 Odtrhová vrstva	54
Obr. 53 Odsávací tkanina.....	54
Obr. 54 Aplikace těsnící pásky -200Y Sealant Tape	54
Obr. 55 Vytvoření vakua 0,8 bar.....	54
Obr. 56 Připravená vytvrzená vtrava gelcoatu	56
Obr. 57 Postup stříkání gelcoatu.....	56
Obr. 58 Jádra sendvičové konstrukce – PET, SAN	57
Obr. 59 Položení odtrhové tkaniny Peel-Ply.....	57
Obr. 60 Odsávací tkanina.....	58
Obr. 61 Napojení vakua	58
Obr. 62 Orientace vláken bidiagonální tkaniny ve vzorku	59
Obr. 63 Namontovaný čelní modul k vozu [28]	60
Obr. 64 Čelní modul + čelník	60

Obr. 65 Schéma zatížení	61
Obr. 66 Testovací stroj Zwick 1456	63
Obr. 67 4-bodový ohyb - prepreg.....	63
Obr. 68 4-bodový ohyb - laminát.....	65
Obr. 69 Upnutí při trhacím testu záv. vložky.....	68
Obr. 70 Porušení jádra	69
Obr. 71 Vytržená závitová vložka	69
Obr. 72 Test odlupu	70
Obr. 73 Schéma testovacího zařízení [29].....	72
Obr. 74 Testovací komora [29].....	73

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Porovnání mechanických vlastností přírodních a skleněných vláken [7]	18
Tab. 2 Výchřevnost různých druhů plastů a paliv	19
Tab. 3 Vlastnosti sendvičové konstrukce [5]	22
Tab. 4 Vlastnosti PET, Airex T90.100	47
Tab. 5 Vlastnosti SAN, Gurit M80	47
Tab. 6 Vlastnosti prepregu SprintXE905/SS	48
Tab. 7 Vlastnosti tkaniny	49
Tab. 8 Vlastnosti rohože	49
Tab. 9 Tabulka vlastností gelcoatu	50
Tab. 10 Sendvičová konstrukce č.1	51
Tab. 11 Sendvičová konstrukce č.2	55
Tab. 12 Sendvičová konstrukce č.3	55
Tab. 13 Sendvičová konstrukce č. 4	59
Tab. 14 Naměřené hodnoty vzorek č. 1 – 3-bodový ohyb	64
Tab. 15 Naměřené hodnoty vzorek č. 1 – 4-bodový ohyb	64
Tab. 16 Naměřené hodnoty vzorek č. 2 – 3-bodový ohyb	65
Tab. 17 Naměřené hodnoty vzorek č. 2 – 4-bodový ohyb	65
Tab. 18 Naměřené hodnoty vzorek č. 3 – 3-bodový ohyb	66
Tab. 19 Naměřené hodnoty vzorek č. 3 – 4-bodový ohyb	66
Tab. 20 Naměřené hodnoty vzorek č. 4 – 3-bodový ohyb	67
Tab. 21 Naměřené hodnoty vzorek č. 4 – 4-bodový ohyb	67
Tab. 22 Naměřené hodnoty - vytrhnutí záv. vložky	68
Tab. 23 Naměřené hodnoty odlupu Prepreg - PET	70
Tab. 24 Naměřené hodnoty odlupu Laminát - PET	71
Tab. 25 Naměřené hodnoty odlupu Laminát - SAN	71
Tab. 26 Naměřené hodnoty tepelných parametrů	73
Tab. 27 Teplná vodivost PET pěny	73

SEZNAM PŘÍLOH

PI NORPOL NGA HX3

PII Weld On SG300

PIII Plexus MA310

PŘÍLOHA P I: NORPOL NGA HX3

REICHHOLD

PRODUCT BULLETIN

December 2010

NORPOL NGA HX3

DESCRIPTION

NORPOL NGA HX3 is a fire retardant gelcoat based on isophthalic/neopentylglycol polyester resin.

NORPOL NGA HX3 is approved for boat production in compliance with

- Det Norske Veritas' Rules for classification of High Speed, Light Craft and Naval Surface Craft
- Det Norske Veritas' Standards for Certification No. 2.20, Lifeboats and Rescue Boats, 2007

Recommended peroxide dosage: 1.3-2.0 %
Recommended film thickness: 0.55-0.85 mm (wet film)
Oxygen index: 26-27 %

TYPICAL PROPERTIES

PHYSICAL DATA IN LIQUID STATE AT 23°C

Properties	Unit	Hand quality	Test method
Viscosity			
- Brookfield RVF sp.4/4 rpm	mPa·s(cP)	14000-30000	A050
- Cone & Plate	mPa·s(cP)	500-700	A010
Density	g/cm ³	1.3-1.5	B020
Flash point	°C	26	ASTM D 3278-95
Gel time: 1.5% NORPOL PEROXIDE 1	minutes	10-25	G020
Storage stability from date of production	months	6	G180

MECHANICAL/PHYSICAL DATA FOR THE GELCOAT'S BASE POLYESTER RESIN IN CURED STATE

Properties	Unit	Value	Test method
Tensile strength	MPa	min. 65	ISO 527-1993
Tensile modulus	MPa	min. 3000	ISO 527-1993
Tensile elongation	%	min. 3.0	ISO 527-1993
Heat distortion temp.	°C	min. 90	ISO 75-1993
Hardness Barcol	-	min. 40	ASTM D 2583-99
Water absorption	mg/test piece	max. 65	Det norske Veritas 1981

The information herein is to help customers determine whether our products are suitable for their applications. Our products are intended for sale to industrial and commercial customers. We request that customers inspect and test our products before using them to satisfy themselves as to contents and suitability. We warrant that our products will meet our written specifications. Nothing herein shall constitute any other warranty express or implied, including any warranty of merchantability or fitness for a particular purpose, nor is protection from any law or patent to be inferred. All patent rights are reserved. The exclusive remedy for all proven claims is replacement of our materials, and in no event shall we be liable for special, incidental, or consequential damages.

919-990-7500 • 800-448-3482 • P.O. Box 13582, Research Triangle Park, NC 27709 USA • 2400 Ellis Road, Durham, NC 27703 USA • www.reichhold.com

Reichhold, P.O.Box 2061, N-3202 Sandefjord, Norway, Tel. +47 33 44 86 00, Fax + 47 33 44 86 01

PŘÍLOHA P II: WELD ON SG300



SMARTER ADHESIVE SOLUTIONS

TECHNICAL DATA SHEET

SG300 Series Methacrylate Adhesives

DESCRIPTION

SCIGRIP™ SG300 Series Methacrylate Adhesives are two-component, 10:1 mix ratio products for bonding metals, composites and other plastic parts¹. Most metals can be bonded without priming². These advanced products are designed to meet specific requirements of the transportation industry, including reduced read through on show surfaces. The combination of minimum surface preparation^{1,2}, primerless metal bonding and low read through makes the SG300 series products ideal for a variety of assembly operations. Packaging options include 50 and 490 ml cartridges and 19 and 189 liters (5 and 50 gallon) bulk containers for application with meter-mix dispense equipment.

PERFORMANCE BENEFITS

• Primerless metal bonding	➡	No surface treatment or primers required for most metals ²
• Reduced bond line read through	➡	Reduced post finishing requirements
• Choice of 5, 15 and 40 minute working times	➡	Selection to fit application and process requirements
• Non-sag application characteristics	➡	Facilitates application on non-level surfaces
• Excellent environmental resistance	➡	Permanent bonds in harsh operating environments
• Permanent toughness	➡	Excellent fatigue, impact and shock load resistance

TYPICAL ADHESIVE CHARACTERISTICS @ 24°C (75°F)

Characteristics	Part A (Adhesive)	Part B (Activator)	Mix (Part A + B)
Colour	Off White	Black or Off White	Black or Off White
Mix ratio by volume	10	1	—
Mix ratio by weight	8.75	1	—
Density, g/cc	1.01	1.15	1.02
Density, lb/gallon	8.40	9.60	8.51
Viscosity, cps	190,000 – 250,000	50,000 – 150,000	—

TYPICAL PHYSICAL PROPERTIES @ 24°C (75°F)

Tensile Strength MPa (psi)	14 – 15 (2,000 – 2,200)	Lap Shear Strength ⁴ MPa (psi)	17 – 19 (2,500 – 2,800)
Maximum Tensile Elongation (%)	100 – 125	Service Temperatures °C (°F)	-40 to 82 (-40 to 180)
Tensile Modulus ³ MPa (psi)	207 – 276 (30,000 – 40,000)		

RECOMMENDED SUBSTRATES

Composites	Metals ²	Thermoplastics ¹
✓ Epoxy	✓ Aluminum	✓ ABS
✓ Polyester & DCPD Modified	✓ Carbon Steel	✓ Acrylics
✓ Vinyl Ester	✓ Stainless Steel	✓ PVC/CPVC
✓ Gelcoats	✓ Coated Metals	✓ Styrenics

PRODUCT PROPERTIES @ 24°C (75°F) – Fixture Time (time to achieve 1.4 MPa or 200 psi strength in lap shear)⁴

Cartridge	Adhesive / Activator	Working Time (minutes)	Fixture Time (minutes)
SG300-05	SG305 A / SG605 B	4 – 6	>15
SG300-15	SG315 A / SG605 B	13 – 17	>30
SG300-40	SG340 A / SG605 B	35 – 45	>80

NOTES:

1. Polyolefins, thermoplastic polyesters, fluorocarbon plastics and other low surface energy plastics are generally not bondable.
2. Prepare metal by removing dust, loose scale, rust and other surface residue including oil and grease. For maximum bond strength on steel, abrade surface prior to bonding. See important notes a, b and c on reverse side.
3. Tensile modulus as measured in the linear portion of the stress strain curve.
4. Lap shear strength of unprimed aluminum to aluminum bond based on ASTM D 1002 method.

PŘÍLOHA P III: PLEXUS MA310

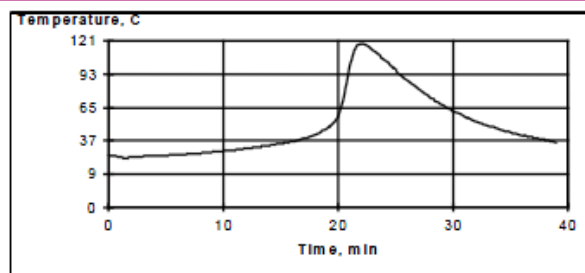
ITW PLEXUS

TECHNICAL DATA SHEET

PLEXUS MA310

Description Plexus™ MA310 is a two-part methacrylate adhesive designed for structural bonding of thermoplastic, metal, and composite assemblies¹. Combined at a 1:1 ratio, it has a working time of 15 to 18 minutes and achieves 75% of ultimate strength in 30 to 35 minutes at room temperature. MA310 is particularly well suited for bonding thermoplastic materials. This adhesive combines high strength and stiffness with the ability to bond a wide range of materials. Plexus MA310 is supplied in ready to use cartridges, 20 litre pails or 200 litre drums to be dispensed as a non-sagging gel.

Characteristics	Room Temperature Cure		
	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Working Time² 15 – 18 minutes ▪ Fixture Time³ 30 – 35 minutes ▪ Operating Temperature -55°C – 121°C ▪ Gap Filling⁷ 1mm to 4mm ▪ Mixed Density 1.00 g/cc ▪ Flash Point 9°C 		
Chemical Resistance⁴	Excellent resistance to:	Susceptible to:	
	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Hydrocarbons ▪ Acids and Bases (3-10 pH) ▪ Salt Solutions 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Polar Solvents 	
Physical Properties (uncured) – Room Temperature	Adhesive	Activator	
	Viscosity, cP 40,000 – 60,000 Colour Off-White Density, g/cc 1.03 Mix Ratio by Volume 1 Mix Ratio by Weight 1 Mixer Recommendation: Cartridge (50ml): 50ml 1:1 static mixer Cartridge (400ml): MC10:18 Bulk: Refer to ITW Plexus ⁵	40,000 – 60,000 Yellow 0.97 1 1	
Mechanical Properties (Cured) Room Temperature	Tensile (ASTM D638)		
	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Strength, MPa 27.5 - 31 ▪ Modulus, MPa 1034 – 1206.5 ▪ Strain to Failure (%) 5 - 15 		
Recommended for:	<ul style="list-style-type: none"> ▪ ABS ▪ Acrylics ▪ FRP ▪ Gelcoats⁴ ▪ Epoxies 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ PVC ▪ Polyesters (including DCPD modified) 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Styrenics ▪ Urethanes (general) ▪ Vinyl Esters
	Lap Shear (ASTM D1002)	Cohesive Strength MPa	20.5 - 24



Typical Exotherm Curve for MA310 at 23°C (10 grams)⁶