

Vliv typu výztuže na FST vlastnosti vláknitého kompozitu

Bc. Petra Tichá

Diplomová práce
2013



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Petra TICHÁ**
Osobní číslo: **T11184**
Studijní program: **N3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Výrobní inženýrství**
Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Vliv typu výztuže na FST vlastnosti vláknitého kompozitu**

Zásady pro vypracování:

I. Teoretická část

1. Polymerní kompozitní materiály, definice, rozdělení, vlastnosti.
2. Vlákna, výztužné útvary, matrice a jejich funkce.
3. Technologie zpracování kompozitních materiálů.
4. Přehled požárních vlastností a standardů týkajících se kompozitních materiálů.

II. Praktická část

1. Návrh materiálového složení vzorků pro sledování FST vlastností.
2. Výroba vzorku technologií RTM (využití směřovat pro dopravní průmysl).
3. Testování vzorků dle vybraných norem, týkajících se vyšetřování FST vlastností.
4. Studium vlivu obsahu výztuže na požární vlastnosti.
5. Závěr.

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

[1] Ehrenstein, Gottfried W. Polymerní kompozitní materiály. Praha: Scientia, 2009.

[2] Jančář, Josef. Úvod do materiálového inženýrství polymerních kompozitů.: Brno 2003.

[3] Kořínek, Z.: Kompozity. Dostupné z: <http://www.volny.cz/zkorinek/>

[4] MOURITZ, Adrian P a A GIBSON. Fire properties of polymer composite materials. Dordrecht: Springer, c2006,

[5] Beneš, R. A.: Kompozitní materiály. SNTL Praha, 1988.

Další literatura dle doporučení vedoucího práce.

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

Ústav výrobního inženýrství

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

Termín odevzdání diplomové práce: **10. května 2013**

Ve Zlíně dne 11. února 2013



doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.
děkan



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

Příjmení a jméno: *Tichá Petra*

Obor: *VI*

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby 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 *2.5.2013*

Tichá

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 nevdělečně 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 díla vytvořené žákem nebo studentem ke splnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školskému či vzdělávacího 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). Odpirá-li autor takového díla udělit svolení bez vážného důvodu, mohou se tyto osoby domáhat nahrazení chybějícího projevu jeho vůle u soudu. Ustanovení § 35 odst. 3 zůstává nedotčeno.*

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

(3) *Škola nebo školské či vzdělávací zařízení jsou oprávněny požadovat, aby jim autor školního díla z výtěžku 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 výtěžku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.*

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá problematikou protipožárních vlastností polymerních kompozitních materiálů. Nároky kladené na FST (fire, smoke, toxicity) vlastnosti musí splňovat náročné požadavky protipožárních směrnic a zároveň zachovat materiálu vysoké hodnoty mechanických vlastností.

Cílem je získat takovou skladbu kompozitní desky, která bude, dostatečně odolávat požáru při zachování dostatečných mechanických vlastnostech, dále bude splňovat požadavky na pohledovou stranu výrobku a nebude docházet k deformování desky po vytvrzení pryskyřice.

V experimentální části se budou vyrábět vzorky a následně vyhodnocovat jejich vlastnosti. Cílem je najít odpovídající kompromis mezi protipožárními a pevnostními vlastnostmi.

Prováděné zkoušky budou například: zkouška podle směrnice UIC 564-2, zjištění kyslíkového čísla podle normy ČSN ISO 4589-2, Trojbodový ohyb dle normy ČSN EN ISO 178 aj.

Klíčová slova: FST vlastnosti, protipožární vlastnosti, proces hoření.

ABSTRACT

My diploma thesis describes fire properties of polymer composite materials.

The demands put on FST characteristics (fire, smoke, toxicity) must fulfill particular requirements of fire directives and preserve high mechanical property values at the same time.

The main target is to obtain such a structure of composite plate, that will be fire resistant enough when keeping all its mechanical properties. Furthermore it will match visual aspect requirements and won't be deformed after hardening of resin.

In experimental part of my work there will be produced samples and then evaluated their characteristics. My aim is to find an appropriate compromise between fire properties and strength properties.

The testing performed will be for example: testing according to UIC 564-2 directive, determination of oxygen index according to ČSN ISO 4589-2 norm, three-point flexure testing according to ČSN EN ISO 178 norm, and others.

Keywords: FST properties, describes fire properties, case combustin.

Ráda bych touto cestou poděkovala vedoucí mé práce paní doc. Ing. Soni Rusnákové, Ph.D. a panu Ing. Vladimíru Rusnákovi za jejich čas, který mi věnovali, za poskytnutí cenných rad a připomínek, které mi pomohli při vypracování diplomové práce. Dále bych chtěla poděkovat svým rodičům za morální a finanční podporu během celé doby studia.

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

OBSAH

ÚVOD	11
I TEORETICKÁ ČÁST	12
1 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY	13
1.1 KOMPOZITNÍ POLYMERNÍ MATERIÁLY	13
1.2 VLASTNOSTI KOMPOZITNÍCH POLYMERNÍCH MATERIÁLŮ.....	14
1.3 VLASTNOSTI DLOUHOVLÁKNOVÝCH KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ.....	14
1.3.1 Hustota kompozitu	14
1.3.2 Podélný modul pružnosti v tahu.....	16
1.3.3 Porušení celistvosti kompozitu	17
1.3.4 Paradoxy kompozitních materiálů.....	17
1.4 POLYMERNÍ MATRICE	18
1.4.1 Nenasycené polyesterové pryskyřice	18
1.4.2 Epoxidové pryskyřice.....	19
1.4.3 Vinylesterové pryskyřice	20
1.4.4 Fenolické pryskyřice	21
1.5 FORMA VÝZTUŽE.....	21
1.5.1 Roving	22
1.5.2 Rohož	22
1.5.3 Tkanina.....	23
1.5.3.1 Multiaxiální tkaniny.....	23
1.5.4 Pletenina.....	24
1.5.5 Částicové výztuže.....	24
1.6 MATERIÁLY VÝZTUŽÍ	25
1.6.1 Skleněná vlákna	25
1.6.2 Uhlíková vlákna	26
1.6.3 Aramidová vlákna	26
1.6.4 Přírodní vlákna	27
1.7 TECHNOLOGIE VÝROBY KOMPOZITNÍCH DÍLŮ.....	28
1.7.1 Technologie nízkotlakého vstřikování (RTM).....	29
2 POŽÁRNÍ VLASTNOSTI KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ	31
2.1 NEBEZPEČÍ POŽÁRŮ.....	31
2.2 TEORIE HOŘENÍ	31
2.2.1 Spalovací cyklus.....	32
2.2.2 Popožární pevnostní vlastnosti kompozitního polymerního materiálu	34
2.3 MOŽNOSTI MODIFIKACE VLASTNOSTÍ KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ	35
2.4 RETARDÉRY HOŘENÍ.....	36
2.4.1 Inertní retardéry hoření	37
2.4.2 Aktivní retardéry	37
2.4.2.1 Hydroxid hlinitý $Al(OH)_3$	37
2.4.2.2 Hydroxid hořečnatý $Mg(OH)_2$	38
2.4.2.3 Oxid antimonitý Sb_4O_6	38
2.4.2.4 Oxidy zinečnaté a boritany	39
2.4.3 Bobtnající výplně	39

2.4.4	Protipožární povrchové úpravy	39
2.5	TEORIE ZKOUŠEK POŽÁRNÍ ODOLNOSTI A MECHANICKÝCH ZKOUŠEK	40
2.5.1	Stanovení hodnot kyslíkového čísla.....	40
2.5.2	Zkouška podle směrnice UIC 564 – 2.....	40
2.5.3	Určování obsahu skla kalcinační metodou.....	40
2.5.4	Stanovení ohybových vlastností.....	41
2.5.5	Dynamicko mechanická analýzy.....	41
2.5.6	Diferenční skenovací kalorimetrie – DSC	42
II	PRAKTICKÁ ČÁST	43
3	CÍL PRÁCE	44
4	NÁVRH MATERIÁLOVÉHO SLOŽENÍ VZORKŮ PRO SLEDOVÁNÍ FST VLASTNOSTÍ.....	45
4.1	VÝROBA VZORKŮ TECHNOLOGIÍ RMT	49
4.1.1	Technologické podmínky	49
5	TESTOVÁNÍ VZORKŮ	51
5.1	ODEBRÁNÍ A PŘÍPRAVA VZORKŮ	51
5.2	STANOVENÍ OHYBOVÝCH VLASTNOSTÍ DLE ČSN EN ISO 178	52
5.2.1	Přístroje, zařízení a podmínky měření.	52
5.2.2	Naměřené hodnoty	53
5.2.3	Vyhodnocení výsledků.....	61
5.2.3.1	Srovnání pevnostních vlastností v ohybu zvolených pryskyřic.....	61
5.2.3.2	Průběh závislosti napětí na poměrné deformaci.	63
5.3	ZKUŠEBNÍ METODA DLE SMĚRNICE UIC 564-2.....	65
5.3.1	Vyhodnocení	67
5.4	STANOVENÍ KYSLÍKOVÉHO ČÍSLA	71
5.4.1	Vyhodnocení	73
5.5	STANOVENÍ OBSAHU SKLA KALCINAČNÍ METODOU	73
6	STUDIUM VLIVU OBSAHU VÝSTUŽE NA POŽÁRNÍ VLASTNOSTI	77
6.1	SHRNUTÍ.....	77
7	EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ VYBRANÝCH TECHNOLOGIÍ.....	78
7.1	PRODUKTIVITA	78
7.2	NÁKLADY NA MATERIÁL	78
7.3	NÁKLADY NA ZHOTOVENÍ FOREM	81
7.4	SOUHRNNÉ ZHODNOCENÍ.....	81
	ZÁVĚR	83
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	86
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	89
	SEZNAM OBRÁZKŮ	91
	SEZNAM TABULEK.....	93
	SEZNAM PŘÍLOH.....	96

ÚVOD

Výroba materiálu s vlastnostmi šitými na míru. I tak je možno charakterizovat zhotovování kompozitních dílů. Samotná výroba není vůbec jednoduchá. Odrážejí se zde mnohé znesnadňující okolnosti. V širším pohledu to jsou možnosti jednotlivých technologií, vyřešení přilnavosti jednotlivých složek a v neposlední řadě výsledné mechanické vlastnosti. Kompozitní materiály jsou charakteristické tím, že spojením jednotlivých složek se nezískává součet jejich původních vlastností, ale vlastnosti nové.

Kompozitní materiály se ve velké míře využívají v leteckém, námořním nebo dopravním průmyslu. Ve své diplomové práci se věnuji kompozitním materiálům s polymerní matricí se zaměřením na železniční průmysl.

Výzkum se věnuje vlivu typu výztuže na FST vlastnosti vláknitého kompozitu. Je podstatné vysvětlit si zkratku FST. Jedná se o začáteční písmena z anglických slov Fire (ohně), Smoke (kouř) a Toxicity (toxicita). Konkrétně se FST vlastnosti zabývají problematikou hoření materiálu, jeho šíření materiálem, množstvím tepla, které je nutno dodat, aby došlo k jeho vznícení, ale i množstvím tepla, které je materiálem opět vydáno do okolí. Velký význam mají i vlastnosti, které materiál vykazuje po oddálení zdroje ohně. Přesněji, zda je materiál ochoten dále samovolně hořet.

Hoření je chemický děj, při kterém se uvolňuje teplo, plyny a zplodiny. V této souvislosti je třeba myslet na problémy, které mohou nastat v souvislosti s hořením. Například: Jaké plyny jsou uvolňovány při hoření? Jaké je jejich množství? Jsou tyto plyny toxické? V jak velké koncentraci jsou produkovány? Je možno eliminovat množství toxických plynů? Tvoří se během hoření velké množství zplodin, které zapříčiňují hustý kouř? Jak rychle se tento kouř tvoří?

Toto je jen malý výčet otázek, na které je třeba znát odpověď. Jsou tím zásadnější, pokud materiál uplatňujeme v náročných aplikacích, kde se musí obezřetně dbát na protipožární vlastnosti. Mezi prostředím, kde je třeba zvýšené opatrnosti, patří především uzavřené prostory s nesnadnou nebo žádnou možností úniku osob (letadla, lodě, ponorky apod.).

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY

Pod pojmem kompozit rozumíme heterogenní materiál složený ze dvou nebo více fází. Jednotlivé fáze kompozitního materiálu se od sebe liší zásadním způsobem ve svých mechanických, fyzikálních a chemických vlastnostech. Spojením těchto složek se získávají vlastnosti, které nejsou součtem jednotlivých vlastností použitých materiálů, ale nové výhodnější. [3]

Základní dvě složky kompozitních materiálů jsou:

1. matrice,
2. výztuž.

Podle druhu matrice rozlišujeme:

- a) kompozity s polymerní matricí,
- b) kompozity s kovovou matricí,
- c) kompozity s keramickou matricí.

1.1 Kompozitní polymerní materiály

Pod pojmem polymerní kompozitní materiály chápeme takové materiály, jejichž matrice je tvořena polymerní pryskyřicí. Tyto kompozity jsou rozšířeny v průmyslech, kde se vyžadují dobré mechanické vlastnosti a zároveň se klade požadavek na to, aby výrobky z nich zhotovené, neměli velkou hmotnost. Příkladem takových odvětví je mezi prvními letecký a lodní průmysl. Jejich uplatnění nalezneme taky v automobilovém průmyslu nebo i při výrobě např.: tobogánů. Na následujících obrázcích jsou příklady použití v praxi.



a)



b)

Obr. 1. Příklad použití kompozitních materiálů v praxi; a) Závodní kajak [12],

b) Sportovní letadlo [13].

1.2 Vlastnosti kompozitních polymerních materiálů

Výchozí vlastnosti kompozitních materiálů v největší míře ovlivňuje jejich stavba. Mechanické charakteristiky kompozitu závisí na mechanických charakteristikách komponent, na rozložení a uspořádání výztužné složky a kvalitě mezisložkového rozhraní. [1; 11]

1.3 Vlastnosti dlouhvláknových kompozitních materiálů

1.3.1 Hustota kompozitu

Obsah vláken v kompozitním materiálu se určuje objemovým podílem vláken. Zanedbají-li se dutiny a bubliny v matrici a využije-li se výpočtu z hmotnostních podílů, získá se jednoduchý vztah. Protože hmotnostní podíl vláken je definován: [1; 5; 11]

$$w_f = \frac{m_f}{m_c} \quad (1)$$

Kde: w_f – hmotnostní podíl vláken,

m_f – hmotnost vláken v kompozitu,

m_c – hmotnost kompozitu.

K zjištění hmotnostního podílu vláken se využívá přesně definovaných vzorků. Aby byla, zjištěna hmotnost vláken ve vzorku laminátu, je nutné odseparovat matici od výztuže. To je možno spálením nebo chemickým odstraněním matrice od vzorku. [5; 10]

Dále platí:

$$v_f = \frac{V_f}{V_c} = \frac{S_f}{S_c} \quad (2)$$

kde: v_f – objemový podíl vláken,

V_f – objem vláken v objemu kompozitu,

V_c – objem kompozitu,

S_f – plocha, kterou zaujímají vlákna v řezu kolmém na směr výztuže,

S_c – celková plocha tohoto řezu.

Hmotnost kompozitu složeného z matrice a vláken při zanedbání dutin v matici se určí ze vztahu:

$$m_c = m_f + m_m \quad (3)$$

kde: m_c – hmotnost kompozitu,

m_f – hmotnost vláken,

m_m – hmotnost matrice.

neboli

$$\rho_c V_c = \rho_f V_f + \rho_m V_m \quad (4)$$

kde: ρ_c – hustota kompozitu,

ρ_f – hustota vláken,

ρ_m – hustota matrice,

V_m – objem matrice.

Po úpravě, která zahrnuje vydělení rovnice objemem V_c a dosazení složek v_f a v_m se získá vztah pro hustotu kompozitu:

$$\rho_c = \rho_f v_f + \rho_m v_m = \rho_f v_f + \rho_m (1 - v_f) \quad (5)$$

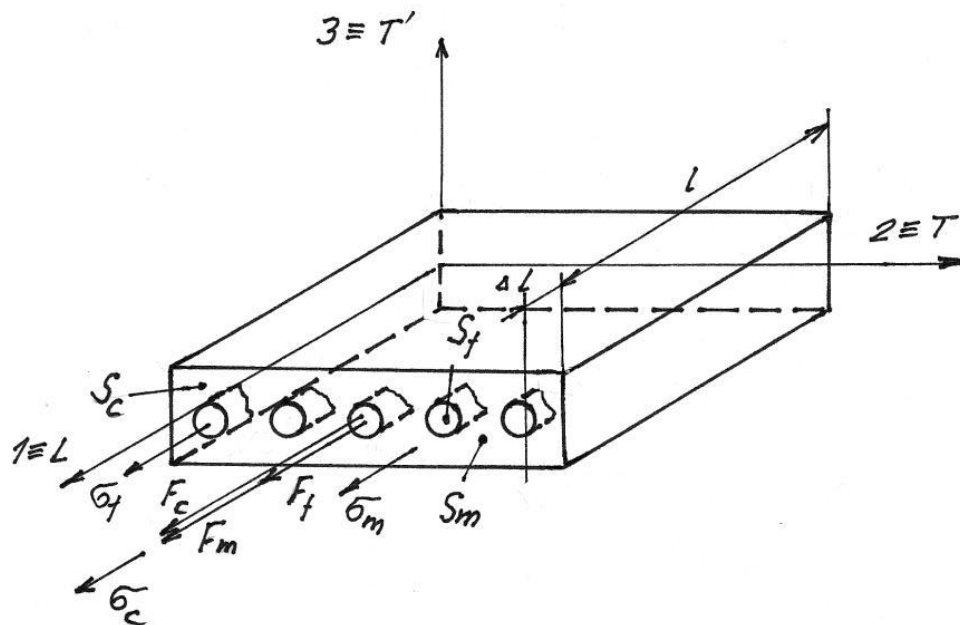
Platí převodní vztah mezi hmotnostmi a objemovým podílem:

$$w_f = \frac{\rho_f}{\rho_c} v_f \quad (6)$$

[5; 10]

1.3.2 Podélný modul pružnosti v tahu

Při určování průměrného napětí v kompozitu σ_c v podélném směru se vychází z podmínky silové ekvivalence v podélném směru. Při čemž se vychází z níže uvedeného modelu.



Obr. 2. Silové poměry v příčném řezu dlouhovláknového kompozitu.

$$F_c = F_f + F_m \quad (7)$$

$$\sigma_c \cdot S_c = \sigma_f \cdot S_f + \sigma_m \cdot S_m / l \quad (8)$$

$$\sigma_c \cdot V_c = \sigma_f \cdot V_f + \sigma_m \cdot V_m / \frac{1}{V_c} \quad (9)$$

$$\sigma_c = \sigma_f \cdot v_f + \sigma_m \cdot v_m = \sum_i \sigma_i \cdot v_i \quad (10)$$

σ_c – průměrné podélné napětí v kompozitu,

σ_f – napětí ve vláknu,

σ_m – napětí v matrici,

S_c – plocha příčného průřezu kompozitu,

S_f – plocha průřezu vláken,

S_m – plocha průřezu maticí.

[10]

1.3.3 Porušení celistvosti kompozitu

Vnitřní porušení celistvosti kompozitu má také vliv na výsledné mechanické vlastnosti. Nejběžnější způsoby porušení jsou:

- vznik mikrotrhlin v matici,
- přetržení vlákna,
- oddělení vlákna od matrice,
- delaminace.

Mechanismy porušení celistvosti závisí zejména na způsobu namáhání (smyk, tlak, tah). [10]

1.3.4 Paradoxy kompozitních materiálů

U kompozitních materiálů se projevuje několik paradoxů chování, které se nesmí opomenout, už jen proto, aby se správně přistupovalo k posuzování vlastností.

1. Paradox pevného materiálu

Skutečná pevnost materiálu je podstatně nižší než pevnost vypočtená teoreticky. Je nutné rozlišit pevnost vlákna a pevnost kompaktního tělesa. [1]

2. Paradox vláknité struktury

Materiál ve formě vláken má mnohonásobně vyšší pevnost než stejný materiál v kompaktní formě. Čím je vlákno tenčí, tím je pevnější. [1]

3. Paradox délky zatížení

Čím kratší je zatížená část jednotlivého vlákna, tím vyšší je jeho naměřená pevnost. [1]

4. Paradox kompozitního materiálu

Kompozitní materiál jako celek může převzít napětí, které by jeho slabší složku porušilo. Od pevnější složky kompozitu může převzít vyšší podíl její teoretické pevnosti, než kdyby byla namáhána samostatně. [1]

Všeobecně platí u kompozitního polymerního materiálu vyztuženého dlouhými vlákny, konečnými nebo nekonečnými v rozmezí určité síly vláken, cílené vyztužení ve

směru namáhání. To znamená, že výsledkem jsou anizotropní vlastnosti. Materiály vykazující anizotropii jsou takové, které mají v různých směrech různé vlastnosti. [1]

1.4 Polymerní matrice

Matrice v kompozitním materiálu má za úkol zaručit geometrii, přenos sil a ochranu výztužných vláken před vnějšími vlivy. Dále přenáší vnější namáhání na vlákna. Zaručuje geometrickou polohu vláken a tvarové vlastnosti výsledného kompozitu. Kvalitu kompozitu ovlivňuje zásadním způsobem kvalita přilnutí pryskyřice k výztužnému materiálu. Místo, kde dochází ke kontaktu výztuže a pryskyřice, označujeme jako fázové rozhraní matrice - vlákno. Některá vlákna se vyznačují špatnou přilnavostí k matrici. Tuto nežádoucí vlastnost je možné eliminovat použitím vhodného apretačního systému v návaznosti na použitou matrici. [1]

Polymerní pryskyřice, používaná na výrobu laminátů, se využívá jak termosetická tak i termoplastická. Termoplastické pryskyřice se vyznačují velkou viskozitou. Což je při výrobě kompozitních dílů nevýhodné, protože může docházet ke vzniku bublin, nesmočení pramenců vláken, atd. Předcházet těmto problémům je možno využitím vstupní výztužné suroviny již před impregnování. Což na druhou stranu vede k nárůstu ceny hotových kompozitních profilů. Z toho je patrné, že se v převážné míře využívají termosety [1, 2, 3].

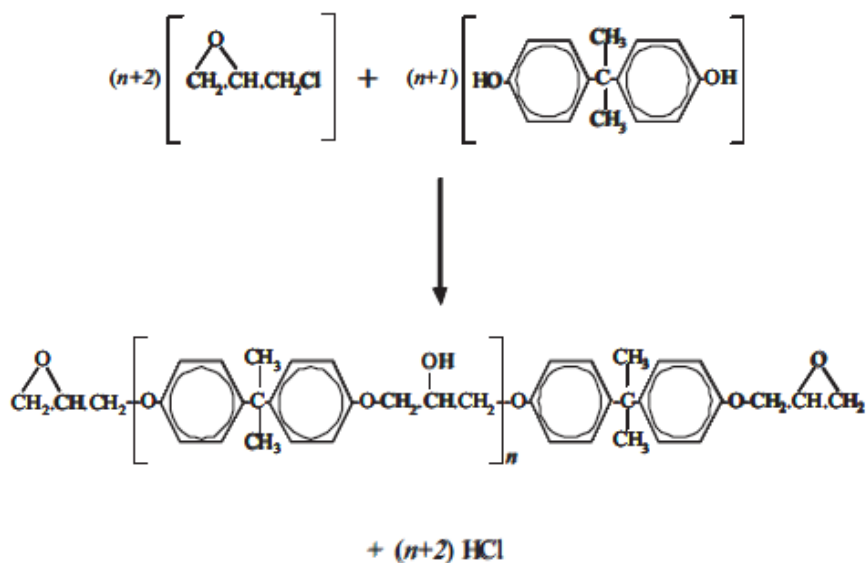
Používají se pryskyřice:

- polyesterové,
- vinylesterové,
- epoxidové,
- fenolické.

1.4.1 Nenasycené polyesterové pryskyřice

Pryskyřice je připravována reakcí dvou funkčních složek. Připravený předpolymer se poté rozpouští v reaktivním rozpouštědle, obvykle styrenu. Ovšem existují i nestyrenové polyesterové pryskyřice. Katalyzátorem síťovací reakce jsou organické peroxidy, aktivátorem obvykle oktoátkobalnatý. [5]

Polyesterové pryskyřice mají tu výhodu, že se dají použít pro všechny technologie. Protože u nich můžeme pomocí vytvrzovacího systému řídit dobu gelace a dobu vytvrzení.



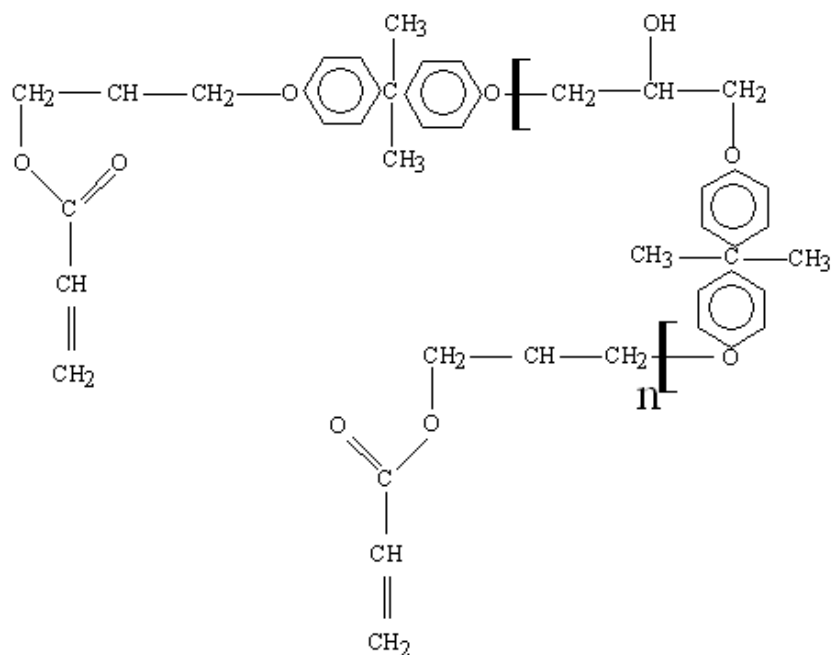
Obr. 4. Epoxidová pryskyřice

1.4.3 Vinylesterové pryskyřice

Pod obecným pojmem vinylester je v běžném názvosloví myšlen polymer s esterovou skupinou vzniklou esterifikací a jedná se o lineární termoplastický polymer. Ovšem pod pojmem vinylesterová pryskyřice se skrývá velmi úzké spektrum chemických sloučenin. Vznikají reakcí dienových epoxidů a kyseliny akrylové. Někdy jsou taky nazývány epoxidové vinylestery nebo vinylestery na epoxidové bázi. Jedná se o termosety [2].

Makromolekula polyesterové pryskyřice má více reaktivních míst než pryskyřice vinylesterová, kde je dvojná vazba umístěna pouze na koncích řetězce. Což vede k větší ohebnosti pryskyřice a větší odolnosti proti tvorbě mikrotrhlin. Oproti pryskyřicím polyesterovým, mají vinylesterové větší mezilaminární smykovou pevnost a větší houževnatost. [5]

Jsou vhodné pro výrobu kompozitů vyztužených skleněnými i uhlíkovými vlákny určenými pro náročnější aplikace (např. do agresivního chemického prostředí, pro aplikace velmi mechanicky namáhané). [2]



Obr. 5. Vinylesterová pryskyřice

1.4.4 Fenolické pryskyřice

Fenolická pryskyřice našla své největší uplatnění v oblasti leteckého, železničního a automobilového průmyslu, kde jsou využívány na vnitřní vybavení. Využívá se jejich výborné chemické a tepelné odolnosti a nízké hořlavosti. V případě vzniku požáru je výhodou, že díly z těchto materiálů produkují nízkou hustotu kouře a ten vykazuje malou toxicitu. Nevýhodou je, že při použití u velkorozměrných výrobků jsou velmi křehké. Vznikají reakcí fenolu s formaldehydem. Rozlišují se dva typy: resol (jednostupňová pryskyřice) a novolak (dvoustupňová pryskyřice) [1]

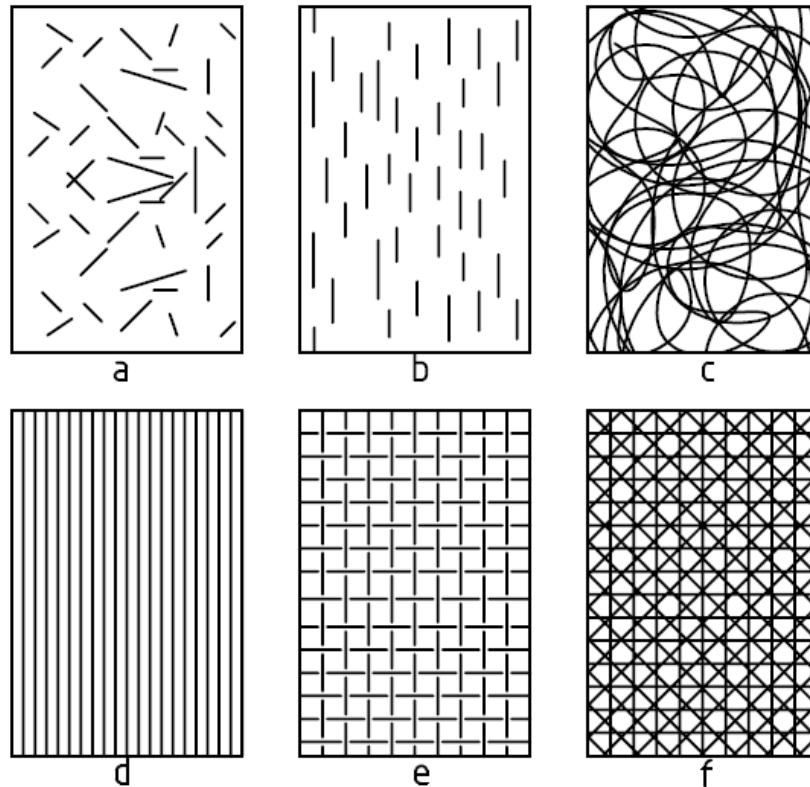
1.5 Forma výztuže

Druhou základní složkou kompozitních materiálů je výztuž. Jedná se o tu část kompozitu, která má nosnou funkci. Uspořádání vláken má přímý vliv na odolnost materiálu proti zatěžujícím silám. Z pravidla platí u vláknité výztuže, že při podélném zatěžování vlákna má výrazně vyšší pevnost oproti příčnému zatížení. [1, 2, 3, 5]

Formy výztuží:

- pramen,
- roving,
- rohož,

- tkanina,
- pletenina,
- částice.



Obr. 6. Příklady výztužných systémů a) neusměrněná krátká vlákna, b) usměrněná krátká vlákna, c) rohož, d) jednosměrné uspořádání rovingu, e) tkanina, f) víceosá výztuž z rovingu (multiaxiální výztuž).

1.5.1 Roving

Jsou sdružené prameny ve formě nekonečných vláken s nulovým nebo malým počtem zákrutů (méně než 40). Pramen vzniká spojením přibližně 200 elementárních vláken bez zákrutu. Roving se používá pro výrobu profilů tažením (pultruzí), pro navíjení a pro výrobu prepregů. [1, 2, 5]

1.5.2 Rohož

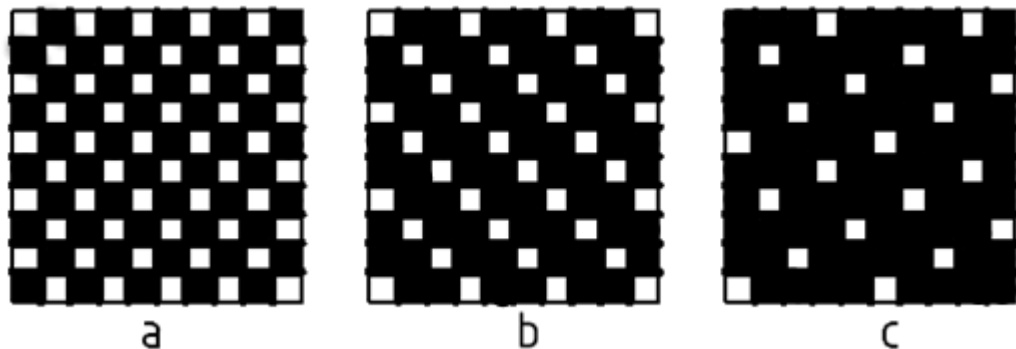
Rohože se jinak taky nazývají netkané textilie nebo rouna. Jsou tvořeny nahodile uspořádanými vlákny sekanými na délky 25 – 50 mm. K zafixování vláken dochází slabým naimpregnováním rohože. Jako impregnační prostředek se používá pryskyřice nebo termo-

plast. Obsah této výztuže se pohybuje v rozmezí 5 – 30 hmot. %. Jejím použitím se zvyšuje obsah pryskyřice v kompozitu. To má za následek snižování jeho tuhosti a pevnosti. Jsou charakterizovány gramáží (g/m^2). [1, 2, 5]

1.5.3 Tkanina

Jedná se o pravouhlé provázání osnovních a útkových přízí. Rozeznáváme tři základní druhy vazeb:

- plátnová
- keprová
- atlasová



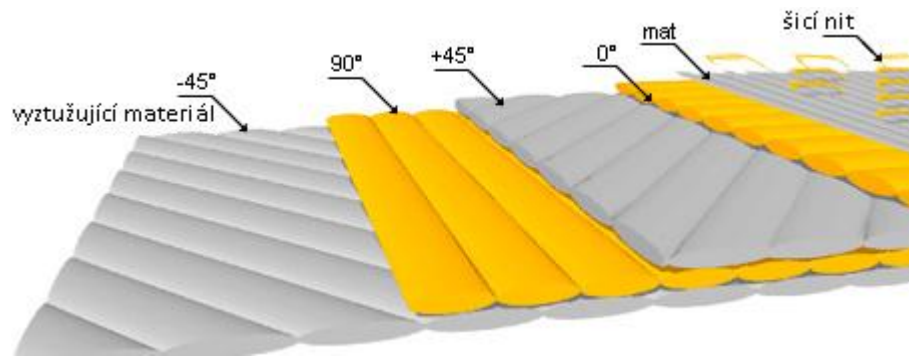
Obr. 7. Vazby tkanin: a) plátnová vazba, b) keprová vazba, c) atlasová vazba.

Vlastnosti tkaných výztuží lze ovlivnit jak použitím určité vazby, tak změnou hmotnosti vláken v osnovním i útkovém směru a to v poměru až 1 : 20. Tímto způsobem vznikají kvazijednosměrné tkaniny. Jsou charakterizovány gramáží (g/m^2). Tím, že jsou vlákna v tkanině usměrněna, zvyšuje se jejich obsah a zároveň se zvyšuje tuhost a pevnost konečného kompozitu. [1, 2, 5]

1.5.3.1 *Multiaxiální tkaniny*

Tento druh textilie řadíme mezi tkaniny. Přičemž v případě této formy výztuže k fixaci nedochází klasickým provázáním osnovy a útku. Textilie je tvořena vrstvením rovingu na sebe minimálně ve dvou vrstvách s následným prošitím, které zajišťuje fixaci vláken. Osnova je tady označována i jako 0 osa. K této ose se popisují vrstvy rovingu, které mohou být natočeny např. $+45^\circ$, 90° , -45° . [9]

Na obrázku 8 je znázorněna stavba jedné z variant multiaxiální tkaniny. Je možné také kombinovat tkaninu s rohoží, která se na povrch tkaniny našívá. Jejich výhodou je produktivní výroba laminátu a získání velmi dobrých mechanických vlastností v požadovaném směru. [9]



Obr. 8. Multiaxiální tkaniny

Podle množství vrstev se dají multiaxiální tkaniny rozdělit např.:

- Biaxiální (bidiagonální) tkaniny s uspořádáním např. $-45^\circ / +45^\circ$,
- triaxiální tkaniny s uspořádáním např. $-45^\circ / 90^\circ / +45^\circ$,
- quadraxiální tkaniny s uspořádáním např. $-45^\circ / 90^\circ / +45^\circ / 0^\circ$.

1.5.4 Pletenina

Další variantou propojení vláken je pletení. Nevýhodou je, že pleteniny vyztužují relativně malým obsahem vláken. Malá plošná hmotnost pleteniny má za následek vznik oblastí s přebytkem pryskyřice. Právě tyto místa, díky malé lomové houževnatosti pryskyřic, jsou oblastmi náchylnými ke vzniku křehkého lomu. [1, 2, 5]

Inovativní technologií je tzv. splétání. Touto technologií je možné získat obsah vláken, který je srovnatelný s tkanými výztužemi. Výhodou je, že je možné vytvářet i speciální tvary jako jsou pásy, trubičky či 3D předtvary. [1, 2, 5]

1.5.5 Částicové výztuže

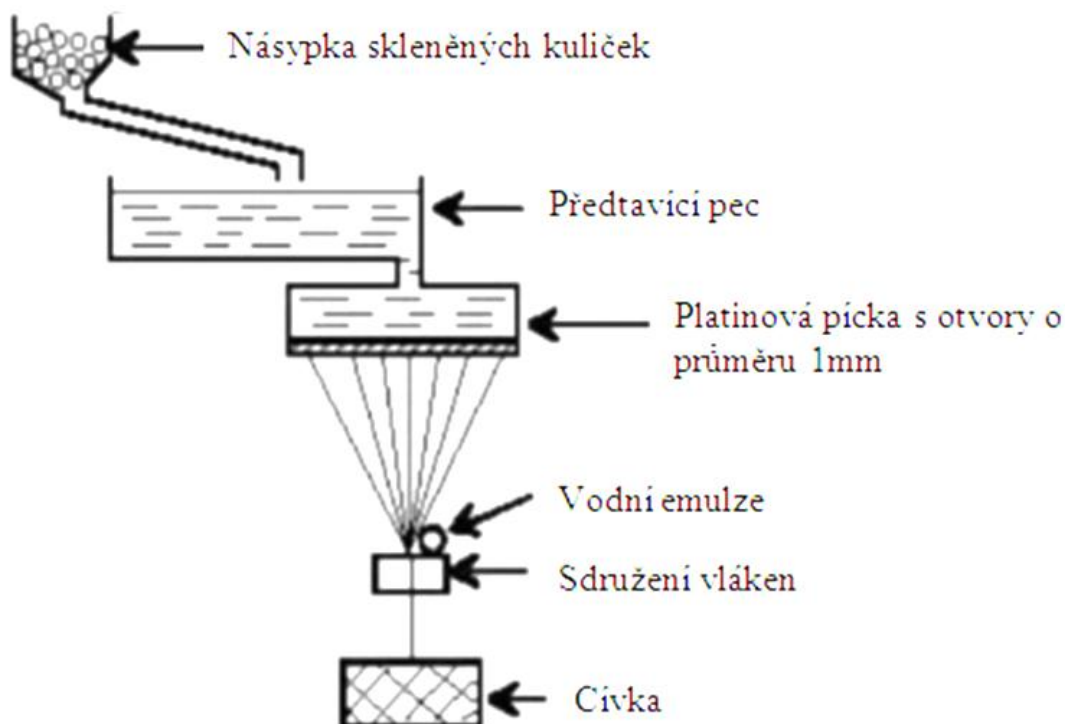
Částicové výztužné materiály se využívají tam, kde je snaha zvýšit určité vlastnosti jako je otěruvzdornost, tvrdost, odolnost proti zvýšeným teplotám apod. Částice mohou mít tvar lupínků, kuliček, krátkých vláken aj., jejichž velikost se pohybuje mezi 1 – 20 μm . V některých případech pak až kolem 1 mm. [1, 2, 5]

1.6 Materiály výztuží

Výztužné materiály, máme možnost vyrábět z poměrně velké škály surovin. Nejpoužívanější materiály jsou na bázi oxidu křemíku (SiO_2) a souhrnně jsou označovány jako skla. Podle obsahu oxidu křemičitého a dalších látek se dále rozlišují (viz. 1.6.1 Skleněná vlákna). Mezi další materiály, z kterých se výztužné systémy vyrábějí, jsou: kevlar (aramid), bór, karbid křemíku, uhlík a aluminium.

1.6.1 Skleněná vlákna

Skleněná vlákna mají silikátový základ (SiO_2). Vyrábějí se tažením taveniny ze směsi oxidu křemíku s příměsí dalších oxidů (Al, Ca, Mg, Pb a B) a většinou s malým podílem oxidů alkalických kovů (Na a K). Potřebného průměru vláken se dosáhne dloužením proudu skla tekoucího tryskami (průměr trysky 1 mm) ve dnu zvláknovací hlavy. Konečný průměr vlákna je dán rozdílem mezi rychlostí vytékání skloviny a rychlostí odtahování vlákna. Jednotlivá vlákna se po povrchové úpravě sdružují do pramene a navíjejí se na cívku. Sdružením pramenů vzniká roving. Schéma výroby skleněných vláken je na obrázku 9.



Obr. 9. Schéma výroby skleněných vláken.

Tab. 1. Vlastnosti skleněných vláken.

Sklo	E	S	D	C	L
Hustota [kg.m ⁻³]	2540	2490	2160	2490	4300
Pevnost v tahu [GPa]	3,5	4,65	2,45	2,8	1,68
Modul pružnosti v tahu [GPa]	73,5	86,8	52,5	70,0	51,1
Poměrné prodloužení do mezí pevnosti [%]	4,8	5,4	4,7	-	-
Dielektrická konstanta, 20 °C, 10⁶ Hz	5,8	4,53	3,56	6,24	9,49

1.6.2 Uhlíková vlákna

Uhlíková vlákna mají výborné pevnostní vlastnosti s nízkou měrnou hmotností. V porovnání ceny se skleněnými vlákny jsou nejlevnější uhlíková vlákna dvakrát dražší, nejkvalitnější pak až stokrát. Vykazují velmi silnou anizotropii. [2, 5, 14]

Výchozí surovina:

- polyakrylonitril,
- novoloidová,
- fenol – aldehydová vlákna.

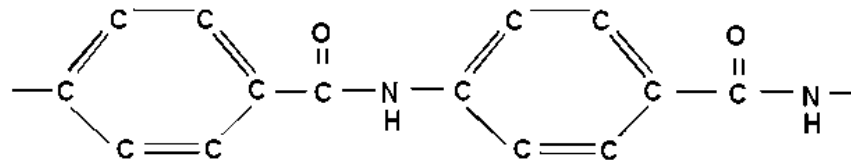
Tab. 2. Porovnání vysokopevnostních a vysokomodulárních vláken

Vlákna	Vysokopevnostní	Vysokomodulární
označení	HT	HM
Ru (GPa)	3,1	2,1
E (GPa)	240	400
ε (%)	1,2	0,5

1.6.3 Aramidová vlákna

Označení aramid vzniklo ze spojení slov **aromatický polyamid**. Nejznámějším aramidovým vláknem je Kevlar[®]. Jsou dražší než vlákna skleněná. Hlavní výhodou je malá hustota ($\rho = 1440 \text{ kg/m}^3$), velká odolnost proti abrazi a schopnost plasticky se deformovat

při působení síly kolmo na osu vlákna. Jsou ve velké míře používány v leteckém průmyslu. [2, 5, 14]



Obr. 10. Výchozí surovina aromatický polyamid.

Tab. 3. Porovnání vlastností

Vlákno	ρ (g/cm ³)	Ru (GPa)	E (GPa)	ϵ (%)
Nylon	1,14	1,02	5,62	18
Kevlar	1,44	2,81	63,3	4
Kevlar 49	1,45	2,81	133,6	2,4
E-sklo	2,54	3,4	72	3
ocel	7,86	2	204	2

1.6.4 Přírodní vlákna

Organická přírodní vlákna jsou z pěstovaných rostlin:

- konopí,
- juta,
- len,
- bavlna.

Tab. 4. Vlastnosti přírodních vláken

Vlákno	ρ (g/cm ³)	Ru (MPa)	E (GPa)	ϵ (%)
Konopí	1,5	460	70	1,7
Juta	1,3	440	60	2
Len	1,5	340	100	1,8
Bavlna	1,5	300	27	10

Přírodní vlákna se používají jako výztuž tvarových velkoplošných dílů pro interiéry osobních automobilů. Použití rostlinných vláken v termoplastech přináší tyto výhody:

- jedná se o lacinou výztuž,
- dochází k úspoře polymeru,

- je možný rychlejší výrobní cyklus (větší tepelná vodivost),
- odpad je recyklovatelný,
- povrch výrobku má přírodní vzhled,
- vlákna nezpůsobují opotřebení zpracovatelských strojů,
- použitím výztuže z přírodních vláken klesne cena výrobku.

[2, 5, 14]

1.7 Technologie výroby kompozitních dílů

Kompozitní materiál se vyrábí vrstvením. Takovéto materiály nazýváme lamináty.

Výhody laminátu:

Vykazují vysokou pevnost a tuhost ve směru vláken a to při nízké hmotnosti kompozitu. Jsou odolné vůči dynamickému namáhání při vysokém mechanickém tlumení. Vyznačují se přizpůsobivostí každému tvaru, malým součinitelem teplotní roztažnosti a velkou pružností při deformaci, vysokou odolností proti stárnutí a korozi. Při výrobě malého počtu výrobků, i velkoplošných, vyžadují menší nároky na investice. Dobrá surovinová základna a možnost kombinovat matrice a vlákna, umožňují přizpůsobení vlastností tzv. na míru. [1]

Nevýhody laminátu:

Pro velké množství materiálového složení neexistuje standartní kompozit. Protože kompozit vykazuje neobvyklé chování nelze vlastnosti jednoduše odvodit součtem vlastností jeho složek. Obtížné nedestruktivní zkoušky materiálu. Kolmo ke směru uložení vláken vykazují jen malé odolnosti v mezi pevnosti v tahu. Vysoké náklady při dimenzování náročných konstrukcí. Velké riziko katastrofálních následků při havárii. Místní poškození se obtížně poznávají a hůře opravují než např. u hliníkových konstrukcí. [1]

Technologie můžeme dělit například podle způsobu prosycování pryskyřicí. Na technologie za sucha, kdy jsou nejprve navrstveny výztužné materiály a následně jsou různými metodami prosyceny pryskyřicí. Proti nim stojí technologie za mokra, kdy jsou jednotlivé vrstvy prosycovány za pomoci např. válečků, jako je tomu u ručního kladení. [2, 5]

Tab. 5. Příklad některých technologií dělených podle podobného znaku technologie výroby.

Technologie	
za mokra:	za sucha:
ruční kladení	ruční a strojní kladení prepregů
šroubovitě navíjení za mokra	navíjení rovingového prepregu
pólové navíjení za mokra	technologie nízkotlakého vstřikování (RTM)
pultruze	metoda tlakového a vakuového vaku

Škála výrobních technologií je velmi široká. Postupem doby byly jednotlivé metody vyvíjeny a zdokonalovány. Ve své práci se nebudu věnovat výčtu všech technologií a jejich modifikací, ale zaměřím se jen na technologii nízkotlakého vstřikování, která se bezprostředně dotýká mé diplomové práce.

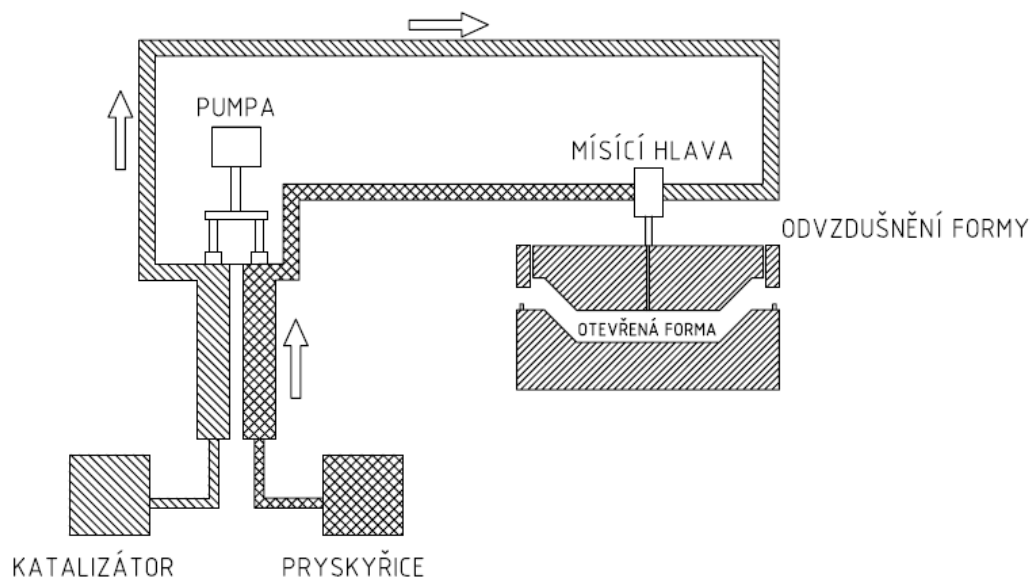
1.7.1 Technologie nízkotlakého vstřikování (RTM)

RTM - Resin transfer moulding. Jde o technologii, která využívá uzavřenou formu. Je možno použít polyesterové a vinylesterové pryskyřice, přičemž není do okolního prostoru uvolňováno reaktivní rozpouštědlo. Ohřátá pryskyřice a ohřáté tvrdidlo se pomocí nízkotlakých čerpadel dopravují do mísící hlavy, kde se bezprostředně před injektáží smísí. Dále je směs vedena do ocelové nebo hliníkové formy. [2]

Výhodou RTM technologie je možnost mít obě strany výrobku pohledové. Rozměry dílů jsou přesné. Na druhou stranu se nedosahuje tak vysokého stupně vyztužení, které se pohybujeme v rozmezí 30 – 60%. Ve srovnání s technologiemi kladení prepregů, pultruzí a navíjením se dosahuje nižších mechanických vlastností.[2]

Jako vyztužné materiály se používají tkaniny s převážným využitím multiaxiálních. Vysvětlení je jednoduché. Principiálně se pryskyřice šíří po délce vláken. Typická pravoúhle provázaná tkanina znesnadňuje plynulost šíření pryskyřice. Dále se využívá netkaných rohoží. Avšak v zásadě se jedná o kombinaci těchto dvou typů. [2]

Výhodou technologie je zvýšení produktivity v hromadné výrobě. Nevýhoda se projevuje v potřebě většího množství forem, které sice jsou nutné k zajištění produktivity, ale na druhou stranu finančně zatěžují při zavádění nových výrobků.



Obr. 11. Schéma technologie RTM

2 POŽÁRNÍ VLASTNOSTI KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ

Již v názvu diplomové práce je uvedeno, že se budu zabývat FST vlastnostmi kompozitního materiálu vyztuženého dlouhými vlákny. Výše jsem se věnovala druhům matric, škále výtuzných materiálů a jejich druhu. Nyní se budu věnovat studiu FST vlastností sklolaminátových materiálů. Zkratka FST se skládá z anglických slov:

Fire – oheň

Smoke – kouř

Toxicity – toxicita

S požáry přichází vždy velká řada rizik. Všeobecně hoření všech materiálů je nebezpečné. Ať již při šíření kouře a toxických látek tak i degradaci materiálu a hrozícím zhroucením nosných konstrukcí.

Proto se provádí testy požární bezpečnosti. Simulují se různé podmínky hoření materiálu, které mají přinést poznatky o předpokládaném chování materiálů při skutečném požáru.

2.1 Nebezpečí požárů

Je třeba si uvědomit, že vznik a vývoj požáru ovlivňuje velká řada faktorů. Jednak to jsou vlastnosti týkající se přímo materiálu, jako je tepelná vodivost, složení, zápalná teplota, ochota materiálu k šíření požáru apod. Dále vnější faktory jako je prostředí, ve kterém požár vypukl.

2.2 Teorie hoření

Hoření je velmi složitý proces, který je ovlivňován velkým množstvím podmětů. Tyto podměty jsou jednak z okolního prostředí a jednak přímo ovlivněny hořícím materiálem. Pod vnějším prostředím chápeme například dostupnost okysličovacího média, tedy vzduchu, který podporuje hoření, tak i samotný vnější zdroj ohně. Hořící materiál ovlivňuje hoření např. svou ochotou šířit plamen.

U materiálů se stanovují vlastnosti, které určí míru jejich hořlavosti. Tyto vlastnosti zahrnují:

- zapalovací čas,
- rychlost uvolňování tepla,

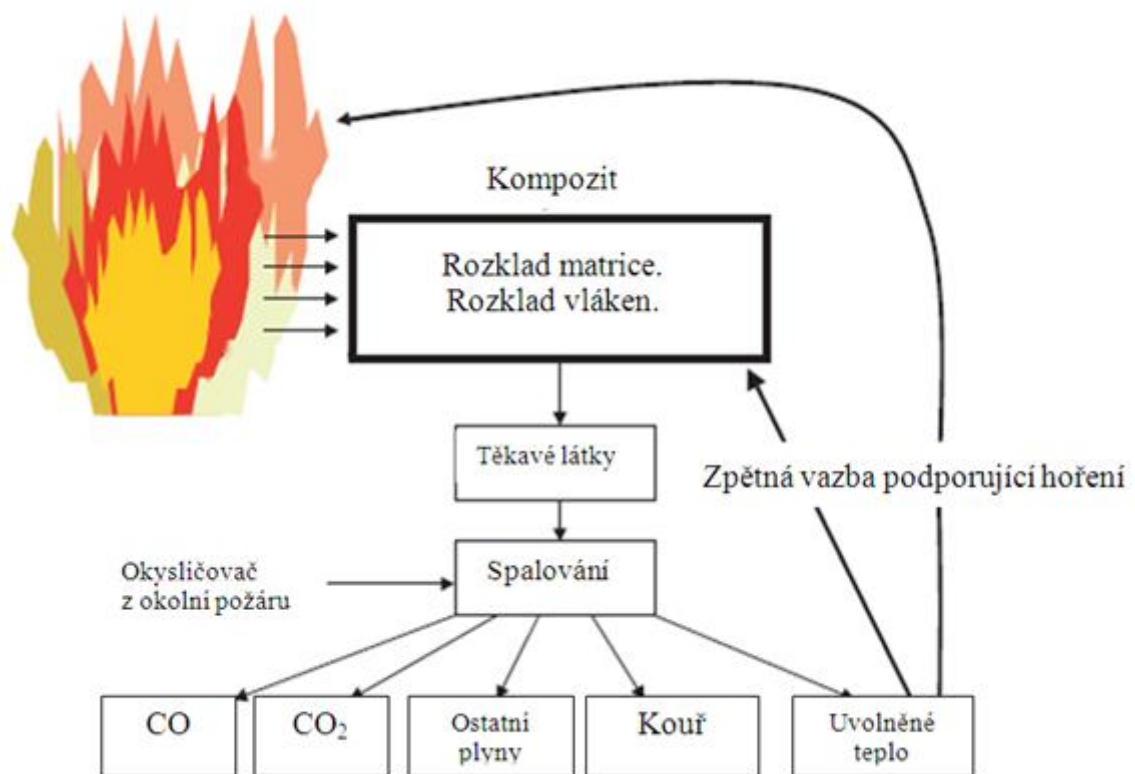
- produkci kouře a toxických plynů,
- rozklad materiálu,
- kyslíkové číslo, aj.

Zapalovací čas je doba, po kterou musí na materiál působit zdroj tepla, aby došlo k jeho vznícení. Kyslíkové číslo nám udává nejmenší možnou koncentraci kyslíku, při které je materiál ještě schopen hořet. Rychlost uvolňování tepla přímo závisí na tepelné vodivosti materiálu a na ochotě materiálu hořet a šířit plamen materiálem. Na tyto vlastnosti přímo navazuje vývin kouře a jeho hustota, kde se navíc zkoumá stupeň jeho toxicity.

Kouř má z hlediska bezpečnosti velký význam. A to zejména v uzavřených místnostech. Rozšíří-li se požár v uzavřené místnosti a bude-li hořet materiál čadící hustý dým je zřejmé, že budou-li se v tomto prostředí pohybovat lidé, je pravděpodobnost, že se ze zakouřeného prostoru dostanou v čas dosti snížena. Jedná se o to, že kouř má dusivé účinky a dráždí oči, což u většiny lidí může způsobit paniku a v kombinaci s hustým kouřem dezorientaci v prostoru.

2.2.1 Spalovací cyklus

Je dán kompozitní materiál, který je vystaven ohni. Při jeho působení se rozkládá polymerní matrice a organická vlákna, jsou-li přítomna. Uvolňuje se teplo, kouř a plyny. Plyny se skládají ze směsi nehořlavých par a hořlavých těkavých látek. Teplota, při které dochází k rozkladu, závisí na chemické povaze polymeru, organických vláken a požární atmosféře v okolí. I přesto se tato teplota pro většinu polymerů a organických vláken pohybuje v rozmezí 300 – 500 °C. [7]



Obr. 12. Spalovací cyklus

Hlavní exotermní reakce, která generuje většinu tepelné energie v plamenu:



$H\cdot$ jsou vodíkové radikály produkované reakcí způsobující řetězovou reakci, která pokračuje tak dlouho, dokud je v okolí dostatečné množství kyslíku. Zvyšuje se teplota plamene ve spalovací zóně a tím se urychluje rozklad kompozitu. [7]

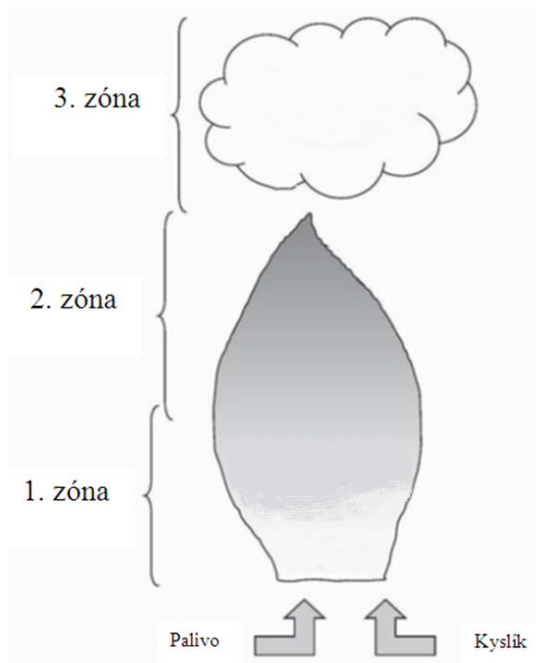
Mnoho z využívaných polymerních systémů jako jsou polyestery, vinylestery a epoxidy, uvolňují velké množství hořlavých plynů podporujících hoření. [7]

Proces spalování pokračuje za přítomnosti vzduchu, dokud se hořlavé těkavé látky z polymerní matrice a organických vláken nesníží natolik, že přestanou podporovat proces hoření. K tomuto často dochází, až tehdy, když jsou organická vlákna a matrice již zcela degradovány. [7]

Byly provedeny studie, které se zabíraly hořením, a byla snaha tomuto procesu porozumět. V rámci těchto výzkumů byl plamen rozdělen do tří částí:

1. První část plamene nejbližší k hořícímu materiálu přináší nejvíce tepla. Pohybuje se v rozmezí 830 – 900 °C.

2. Druhá část plamene by se dala nazvat jako viditelný plamen, jeho teplota se pohybuje okolo 400 °C.
3. Ve třetí části teplota plamene ještě klesne. Plamen se stává neviditelným a produkují se horké plyny, pára a saze.



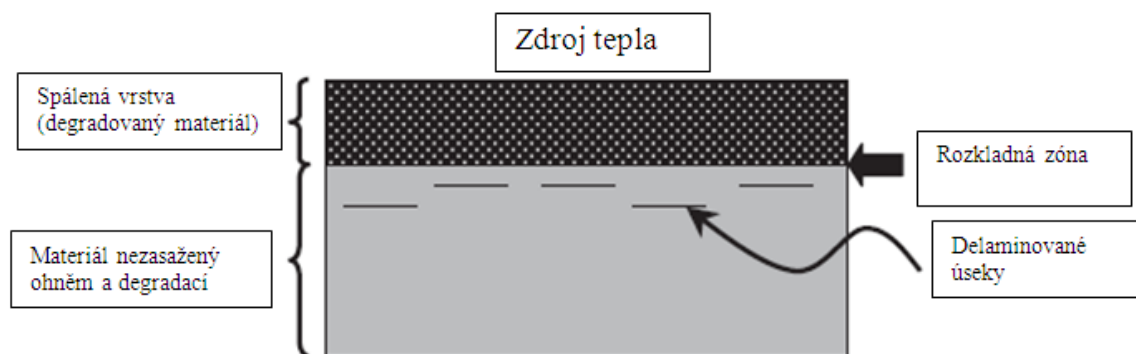
Obr. 13. Jednotlivé zóny ohně.

2.2.2 Popožární pevnostní vlastnosti kompozitního polymerního materiálu

V Americe se problematice polymerních kompozitních materiálů věnuje mnoho studií. Tyto materiály jsou hojně využívány v leteckém a lodním průmyslu. Což jsou oblasti, kde se v případě požáru, jedná o uzavřené prostory s malou, obtížnou nebo žádnou možností úniku. Hraje zde roli každé zlepšení vlastností, které dovolí zareagovat a zabránit katastrofě.

V jedné ze studií se američtí odborníci věnovali experimentu, kdy vystavili různé druhy termosetických a termoplastických laminátů tepelnému toku o intenzitě 25 kW/m² po dobu 20 minut v kuželovém kalorimetru. Následně měřili zbytkovou pevnost v ohybu při pokojové teplotě. Jejich výzkum prokázal, že termoplastické lamináty mají schopnost zachovat si mnohem vyšší pevnost ve srovnání s termosety. [7]

Všechny lamináty utrpěly značnou ztrátu pevnosti, v důsledku škod způsobených při hoření. [7]



Obr. 14. Schéma znázorňující postup degradace přes tloušťku termosetického laminátu.

Na obrázku 14 je znázorněna spálená část a zbylá neporušená část laminátu. Tyto dvě vrstvy rozděluje takzvané rozkladné rozhraní. Nežádoucí vlastností, která se projevuje, je vznik delaminovaných úseků ve vrstvě laminátu, který ještě nebyl jinak porušen. Čím menší bude spálená plocha, tím lepší zbytkové vlastnosti budou. [7]

2.3 Možnosti modifikace vlastností kompozitních materiálů

K dosažení lepších protipožárních vlastností se využívá různých metod. Je možné do polymerní matrice přidat různá oheň retardující plniva. Tyto plniva mohou být v kompozitu přítomna, aniž by reagovala s pryskyřicí. Používají se i taková, která se do pryskyřice přidávají během její výroby a stávají se součástí makromolekuly. Tato plniva nazýváme aktivní. [7]

Většina plniv pracuje na principu uvolňování látek, které ředí hořlavé těkavé látky uvolněné z matrice při hoření. Některá druhy, při svém rozkladu, produkují i vodní páry, které mají hasící účinek, čímž zpomalují proces hoření. Další možností je využití plniv, které při působení zvýšených teplot bobtnají a tím znesnadňují postup požáru kompozitem. [7]

Je možné ovšem přistoupit i k modifikaci samotné polymerní pryskyřice při její výrobě. Zajistí-li se např.: zesílení vazeb v polymeru, dosáhneme zpomalení jejího rozkladu. Dále je možno přidat halogeny nebo fosfor při zpracování. Jinou možností jak modifikovat vlastnosti je využití protipožárních nátěrů laminátových dílů. [7]

Mnoho plniv snižuje mechanické vlastnosti polymerů, což se při výběru a určení množství plniva nesmí opomenout. Hledá se optimum tak, aby byly splněny všechny nároky na mechanické vlastnosti a získána nejlepší protipožární odolnost. [7]

Výběr samozhášivých přísad pro polymerní kompozity závisí na několika faktorech.

A to:

- náklady,
- chemická kompatibilita mezi retardérem hoření a polymerem,
- teplota rozkladu sloučeniny.

Byla vyvinuta celá škála materiálů zpomalujících hoření pro polymery a polymerní kompozity. Látky zpomalující hoření jsou buď přísady, nebo reaktivní sloučeniny. Přísady se v průběhu zpracování přimíchávají do polymeru, ale chemicky s ním nereagují. Chemické složení těchto přísad je založeno na těchto prvcích: [7]

- antimon,
- hliník,
- bór,
- bróm,
- chlor.

Reaktivní sloučeniny jsou polymerované s pryskyřicí během zpracování a stávají se součástí makromolekulární struktury sítě. Reaktivní retardéry hoření jsou založeny na:

- halogenech (brom a chlor),
- fosforu,
- anorganických a melaninových sloučeninách.

[7]

2.4 Retardéry hoření

Základní princip je snížení množství organického plniva přidáním plniva nehořlavého. Dalším mechanismem je snížení absorpce tepla do kompozitu a snížení rychlosti hoření polymerní matrice. Proto, aby působil jako dobrý chladič, musí mít větší měrnou tepelnou kapacitu než polymer. Některá plniva také snižují hořlavost vytvořením izolační povrchové vrstvy, která vzniká při rozkladu polymeru. Snižuje rychlost vedení tepla k spodním vrstvám kompozitního materiálu a tím snižuje rychlost rozkladu polymerní matrice. Navíc tato povrchová vrstva znesnadňuje únik hořlavých těkavých látek z materiálu do plamene.

[7]

2.4.1 Inertní retardéry hoření

Všechna plniva pracují jako chladič, ale jen několik typů je schopno tvořit ochranné povrchové vrstvy, které poskytují vysoký stupeň tepelné izolace a působí jako nepropustná bariéra plynů. [7]

Inertní výplně používané u polymerních kompozitů jsou:

- oxid křemičitý,
- uhličitan vápenatý,
- saze, pro jejich schopnost snížit hořlavost a vývin kouře. [7]

2.4.2 Aktivní retardéry

Aktivní plniva jsou účinnější než inertní plniva. Působí rozkladem při zvýšené teplotě endotermickou reakcí, která absorbuje velké množství tepla, to má chladicí účinek, který zpomaluje rozklad polymerní matrice. Při hoření vzniká množství inertních plynů, jako je vodní pára a oxid uhličitý, které ředí koncentraci hořlavých plynů. [7]

Kovové oxidy a hydroxidy kovů jsou používány jako aktivní plniva. Jeden z nejběžnějších je hydroxid hlinitý. Dalšími typy jsou sloučeniny obsahující antimon (Sb_2O_3 , Sb_2O_5), železo (FeOOH , FeOCl), molybden (MnO_3), hořčík ($\text{Mg}(\text{OH})_2$). U těchto sloučenin dochází k potlačení spalování a tvorby kouře rozličnými způsoby, ale pro všechny platí, že se jejich účinnost zvyšuje s jejich koncentrací v polymerní matrici. Obsah plniva se pohybuje v rozsahu 20 – 60 hmot. %, aby bylo dosaženo podstatného snížení hořlavosti. [7]

2.4.2.1 Hydroxid hlinitý $\text{Al}(\text{OH})_3$

Je populární z několika důvodů:

- nízká cena,
- dobré vlastnosti zpomalující hoření,
- částičky jsou obvykle 1 μm nebo jemnější (musí být rovnoměrně rozptýleny v matrici, pro zajištění srovnatelných vlastností v celém výrobku,
- hmotnostní podíl v procentech činí mnohdy 50 a víc. Na druhou stranu toto vysoké zatížení snižuje mechanické vlastnosti a trvanlivost u většiny typů kompozitů.

Pro minimalizaci těchto nežádoucích účinků, je hydroxid hlinitý často použit v kombinaci s jinými látkami zpomalujícími hoření. [7]

Při rozkladu hydroxidu hlinitého, v rozmezí teplot 220 – 400 °C, dochází k absorpci tepla. Z čehož plyne, že se jedná o endotermickou reakci podle:

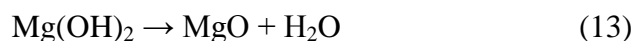


- absorbuje cca 1 kJ tepla na jeden gram hydroxidu hlinitého,
- reakce je neúčinnější při teplotě okolo 300 °C,
- vytváří se vodní páry (voda se uvolňuje do plamene, kde brání spalování zředěním koncentrace hořlavých látek vznikajících z polymerní matrice a omezuje přístup kyslíku ke kompozitnímu povrchu),
- reakce neprodukuje žádné toxické a žíravé plyny,

Hydroxid hlinitý má větší měrnou tepelnou kapacitu než většina organických pryskyřic - což umožňuje absorpci tepla. [7]

2.4.2.2 *Hydroxid hořečnatý $\text{Mg}(\text{OH})_2$*

Je tepelně stabilní až do 330 – 340 °C z toho plyne, že může být použit u mnoha typů vysokoteplotních termoplastů bez svého rozkladu. Obsah v kompozitu se pohybuje v rozmezí 30 – 60 hmot. %. Reakce je:



- hydroxidová skupina vázaná na hořčík se převede na vodní páru (ředí těkavé látky),
- rozklad hořčíkové směsi má dobré izolační vlastnosti,
- prodlužuje zapalovací čas,
- snižuje množství kouře.

[7]

2.4.2.3 *Oxid antimonitý Sb_4O_6*

Snižuje teplotu plamene. Při reakci vzniká SbOH a SbO. Tyto sloučeniny spotřebovávají vodíkové radikály, které při požáru podporují exotermní reakci v plamenu. [7]

2.4.2.4 Oxidy zinečnaté a boritany

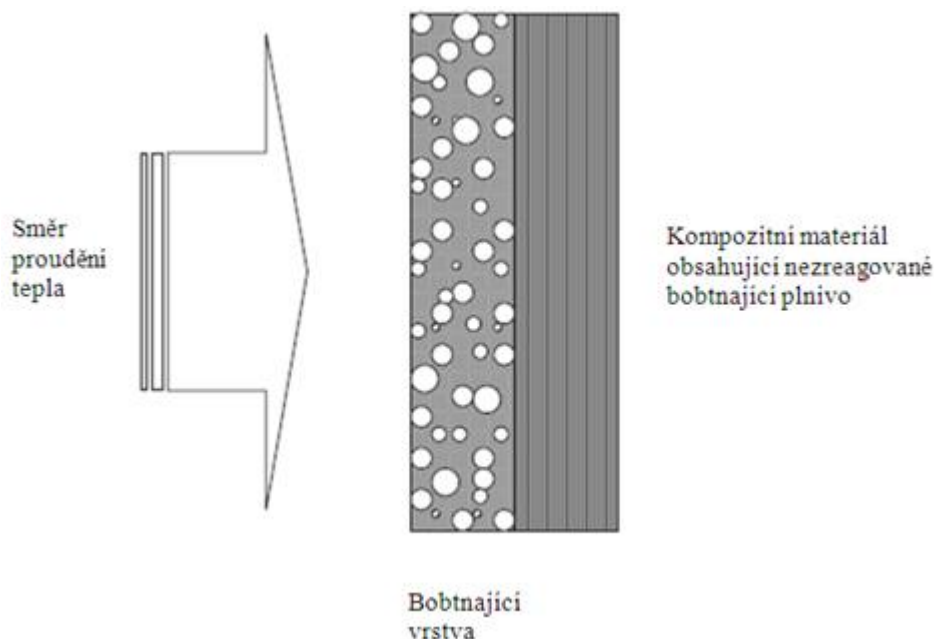
Jedná se o aktivní plnidla (ZnSnO_3 a $\text{ZnSnO}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) používaná u halogenových polymerů. Boritany zinku jsou použity častěji pro jejich nízkou cenu a dobré protipožární vlastnosti u některých polymerů. Příklad boritanu zinku:



[7]

2.4.3 Bobtnající výplně

Další možností retardérů hoření jsou bobtnající výplně. Při působení tepla se tyto přísady rozkládají a vznikají vzduchové bublinky, které znesnadňují další postup požáru přes kompozitní desku. Na následujícím obrázku je znázorněno schéma bobtnajícího procesu. [7]



Obr. 15. Schéma bobtnajícího procesu [7]

2.4.4 Protipožární povrchové úpravy

K zlepšení protipožárních vlastností mohou přispět i protipožární povrchové úpravy. Jednak použitím gelcoatu s přidáním retardérů hoření. Druhou možností je použití povrchových laků a povlaků s protipožární úpravou. [7]

2.5 Teorie zkoušek požární odolnosti a mechanických zkoušek

Postupem rozvoje zkoumání požární odolnosti, byli stanoveni ukazatelé požárních vlastností materiálu, kterými je možno klasifikovat bezpečnost materiálu při požáru. Je ovšem důležité mít na vědomí, že všechny tyto charakteristiky jsou pouze orientační a je třeba mít k dispozici výsledky z dostatečného množství měření. Bezpochyby je nutné kombinovat více metod k dosažení co nejkorektnějších výsledků. [7]

2.5.1 Stanovení hodnot kyslíkového čísla

Touto metodou se stanovuje minimální koncentrace kyslíku ve směsi s dusíkem, která je ještě schopná udržet hoření malých zkušebních těles ve vertikální poloze za přesně stanovených podmínek zkoušky. [14]

Směs se přivádí při teplotě 23 ± 2 °C. Tato teplota je právě schopna, za předepsaných podmínek zkoušky, udržet hoření. [14]

Výsledky se nedají použít pro určení požární bezpečnosti určitého výrobku nebo materiálu. Metoda udává citlivé měřítko pro charakteristiky hoření materiálu za určitých laboratorních podmínek. Z toho plyme, že výsledky slouží pro dílčí vyhodnocení požárního rizika. [14]

2.5.2 Zkouška podle směrnice UIC 564 – 2

Směrnice UIC 564 – 2 předepisuje postup zkoušky pro stanovení požární odolnosti kompozitních desek. Deska je ve stojanu umístěna pod úlem 45° a vystavena ohni za přesně stanovených podmínek. [20]

U vzorků se sleduje a následně vyhodnocuje:

- Čas, zdali a popřípadě jak dlouho po uhašení etanolového plamene laminát dále svévolně hoří.
- Zda ze vzorků odpadávají hořící částičky nebo kapky.
- Velikost ohořelé plochy a došlo-li k prohoření přes celou tloušťku vzorku. [20]

2.5.3 Určování obsahu skla kalcinační metodou

Postupuje se dle normy ČSN EN ISO 1172. Tato metoda stanovuje odebrání vzorků o hmotnosti 2 – 10 g. Před samotným spalováním, je třeba vzorky předsušit. Sušení se provádí v horkovzdušné sušičce při teplotě 105 °C. Následně jsou vzorky

umístěny do muflové pece, kde jsou vystaveny teplotě 500 – 600 °C po dobu 20 min. Ze vztahu (15) lze vyjádřit obsah výztuže. [15]

$$M_{glass} = \frac{m_3 - m_1}{m_2 \cdot m_1} \cdot 100 \quad (15)$$

Kde:

m_1 – hmotnost misky,

m_2 – hmotnost misky s předsušeným vzorkem,

m_3 – hmotnost misky se zbytkem spáleného vzorku.

[15]

2.5.4 Stanovení ohybových vlastností

Ohybové vlastnosti se stanoví trojbodovým ohybem dle normy ČSN EN ISO 178. Metoda se používá ke stanovení pevnosti v ohybu, modulu pružnosti v ohybu a dalších závislostech mezi napětím a deformací. Těleso podepřené dvěma podpěrami je zatěžováno přítláčným trnem uprostřed jejich rozpětí. [16]

Metoda není vhodná pro stanovení konstrukčních parametrů. Uplatnění nachází při zkoušení materiálu jako kontrolní test kvality. [16]

2.5.5 Dynamicko mechanická analýzy

Při zkoumání viskoelastického chování polymerů jsou nejčastěji používány tři druhy zkoušek. Jsou to creep, relaxace a dynamické namáhání.

Podstata dynamicko mechanické analýzy je podrobení vzorku slabému oscilačnímu napětí, přičemž se sleduje viskoelastická odezva materiálu.

Touto metodou lze stanovit:

- teplotu skelného přechodu T_g ,
- bod měknutí a tání,
- tlumící schopnost materiálu (mechanické ztráty v materiálu),
- stárnutí materiálu (dlouhodobá teplotní stabilita),
- složení směsi kompozitních materiálů.

[21]

2.5.6 Diferenční skenovací kalorimetrie – DSC

DSC analýzou lze testovat pevné i kapalně vzorky v širokém rozsahu teplot. Při této metodě jsou zkoumány tepelné vlastnosti vzorku vystaveného teplotnímu programu. Vzorek je ohříván nebo chlazen definovanou rychlostí spolu se vzorkem kontrolním, což je vybraný referenční materiál. Signál souvisí s fázovou změnou ve vzorku. Je zapříčiněn momentální rozdílnou teplotou vzorku a reference, kterou se přístroj snaží okamžitě kompenzovat. [27]

Měření se provádí v inertní atmosféře. Rozsah teplot závisí na typu přístroje v rozmezí 100 – 650 °C. [27]

Touto metodou se může vyhodnotit:

- teplota tání,
- teplota skelného přechodu,
- různé druhy krystalizací,
- tepelná kapacita,
- teplota degradace.

V konkrétních aplikacích se DSC uplatňuje při:

- studiu fázových přechodů, testování kvality polymerních, biopolymerních materiálů a skel,
- stanovení stability emulzí,
- stanovení hydratace materiálů (množství volné a vázané vody)

Komplikovanější experimenty DSC umožňují:

- studium vytvrzování pryskyřic,
- stanovení kinetiky chemických reakcí,
- tepelnou vodivost některých materiálů.

[27]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

3 CÍL PRÁCE

Cílem práce je stanovení optimálního složení kompozitní desky. Přičemž se sledují protipožární a mechanické vlastnosti. Zároveň se sleduje plnění formy a s tím spojené pro-sycení vzorku, jeho vzhled a deformace spojená se smršťováním pryskyřice.

Experimentální část diplomové práce se bude realizovat ve spolupráci s firmou FORM s.r.o., která se zabývá výrobou laminátových dílů v jednoduché či sendvičové struktuře. V rámci této spolupráce se vyrobily vzorky technologií RTM.

Sumárně je možno cíle diplomové práce shrnout do několika bodů:

1. Návrh materiálového složení.

Při stanovování materiálového složení vzorků se vycházelo ze zkušeností společnosti.

2. Výroba vzorků.

Pro výrobu vzorků byly použity dvě pryskyřice, u kterých se při následných měření porovnávaly jejich vlastnosti. Přičemž jedna z pryskyřic se vyvíjí v rámci čtyřletého projektu. V letošním roce plyne třetí rok tohoto projektu.

3. Příprava vzorků vzhledem k osnově.

V tomto ohledu je důležité, aby byly dodrženy určité zásady. V první řadě to je dodržení osnovy s ohledem na orientaci vzorků. Nejzásadněji se toto polohování týká vzorků, z kterých stanovujeme ohybová napětí. Druhá zásada je, aby rozmístění poloh odebíraných vzorků bylo u všech laminátových desek stejné.

4. Experimentální měření.

Měření provádíme pro vybrané zkoušky. Tyto zkoušky přinášejí ucelenější představu o vlastnostech materiálů. Pro přehlednost si tyto zkoušky můžeme rozdělit např.:

A. Určení ohybových napětí.

B. Zkoumání FST vlastností.

- Stanovení kyslíkového čísla.
- Určení požární odolnosti dle směrnice UIC 564-2.
- Stanovení obsahu skla kalcinační metodou.

5. Studium vlivu obsahu výztuže na požární vlastnosti materiálu.

6. Ekonomické zhodnocení vybraných technologií.

7. Závěr.

4 NÁVRH MATERIÁLOVÉHO SLOŽENÍ VZORKŮ PRO SLEDOVÁNÍ FST VLASTNOSTÍ

Technologie, pro kterou se vyvíjí složení laminátové desky, je RTM. Postupem rozvoje této technologie bylo prokázáno, že není vhodné použít jako výztužný materiál klasickou tkaninu. Pod pojmem klasické tkaniny rozumíme ty, které mají pravouhle provázané osnovní a útkové vlákna. Důvod proč tomu tak je, plyne z faktu, že pryskyřice se šíří po délce vláken. U klasických tkanin je toto vedení pryskyřice znesnadněno, právě pravouhlym provázáním vláken. Další nevýhodou jsou snížené pevnostní vlastnosti tkaniny. A proto se v případě této technologie využívá především multiaxiálních tkanin a rohoží.

Cílem bylo navrhnout takovou skladbu materiálu, aby bylo dosaženo co nejlepších mechanických a protipožárních vlastností. Studium se dále zabývá vlivem obsahu výztuže na tyto vlastnosti.

Při výrobě všech vzorků se stanovila skladba, která vyšla ze zkušeností spolupracující společnosti. Množství vrstev výztuže se určilo s ohledem na to, jakou tloušťku desky nám forma umožňuje vyrobit. V zásadě jde o to, aby po uzavření formy a přivedení pryskyřice, nevznikal vysoký tlakový odpor, který by znemožnil prosycení výrobku.

První co sledujeme po odformování kompozitních desek je:

1. Dotečenost vyráběné desky.
2. Prosycenost (zda se nacházejí suchá místa).
3. Zda dochází k deformaci.

U většiny vzorků se projevila deformace v podobě prohýbání po odformování. Za tuto deformaci může nestejně smrštění matrice přes tloušťku materiálu. K rozdílnému smrštění, které nastává v průběhu vytvrzování, dochází v důsledku rozdílného objemu pryskyřice v jednotlivých vrstvách. Multiaxiální tkanina v porovnání s rohoží má nižší objem pryskyřice a tedy menší procento smrštění.

Při výrobě vzorků s vývojovou pryskyřicí, bylo upraveno uspořádání výztužných vrstev. Snahou bylo docílit snížení nebo úplného odbourání deformací. Předpokládaný efekt se projevil, ale nevyřešil problém zcela.

Tab. 6. Složení vzorků s isoftalovou nenasyčenou polyesterovou matricí.

Vzorek	Materiálové kombinace
V1.	Popis: Polyesterový skelný laminát
	Skladba: 1xpolyesterový gelcoat OLDOPOL S 250 VH
	1x BIDIAGONAL-GLASS-FABRIC S32EX010-00980-01270-283000 (+45/90/-45)
	1x skelná rohož 300 g/m ²
	Matrice: Norpol Dion 850 - M850
	Iniciační systém 1% Butanox M-50
	Povrchová úprava: bez laku - polyesterový gelcoat
V2.	Popis: Polyesterový skelný laminát
	Skladba: 1xpolyesterový gelcoat OLDOPOL S 250 VH
	1xskelná rohož 100 g/m ²
	1x QUADRAXIAL-GLASS-FABRIC V104876-820 (0/+45/90/-45)
	1x skelná rohož 300 g/m ²
	Matrice: Norpol Dion 850 - M850
	Iniciační systém 1% Butanox M-50
Povrchová úprava: bez laku - polyesterový gelcoat	
V3.	Popis: Polyesterový skelný laminát
	Skladba: 1xpolyesterový gelcoat OLDOPOL S 250 VH
	1xskelná rohož 100 g/m ²
	2x QUADRAXIAL-GLASS-FABRIC V104876-820 (0/+45/90/-45)
	1x skelná rohož 300 g/m ²
	Matrice: Norpol Dion 850 - M850
	Iniciační systém 2% Butanox M-50, 0,1% Co urychlovač 4%
Povrchová úprava: bez laku - polyesterový gelcoat	
V4.	Popis: Polyesterový skelný laminát
	Skladba: 1xpolyesterový gelcoat OLDOPOL S 250 VH
	1xskelná rohož 100 g/m ²
	2x TRIAXIAL-GLASS-FABRIC S32EY470-00910-01270-464000 (0/+45/-45)
	1x skelná rohož 300 g/m ²
	Matrice: Norpol Dion 850 - M850
	Iniciační systém 2% Butanox M-50, 0,1% Co urychlovač 4%
Povrchová úprava: bez laku - polyesterový gelcoat	
V5.	Popis: Polyesterový skelný laminát
	Skladba: 1xpolyesterový gelcoat OLDOPOL S 250 VH
	1xskelná rohož 100 g/m ²
	1x TRIAXIAL-GLASS-FABRIC S32EY470-00910-01270-464000 (0/+45/-45)
	1x skelná rohož 300 g/m ²
	Matrice: Norpol Dion 850 - M850
	Iniciační systém 2% Butanox M-50, 0,1% Co urychlovač 4%
Povrchová úprava: bez laku - polyesterový gelcoat	

Tab. 7. Návrh pěti vzorků s vývojovou maticí.

Vzorek	Materiálové kombinace
V6.	Popis: Polyesterový skelný laminát
	Skladba: 1xpolyesterový gelcoat OLDOPOL S 250 VH
	1xskelná rohož 100 g/m ²
	1x BIDIAGONAL-GLASS-FABRIC S32EX010-00980-01270-283000 (+45/90/-45)
	1x skelná rohož 300 g/m ²
	Matrice: Vývojová
	Iniciační systém 1% Butanox M-50, 0,2% Fe
Povrchová úprava: bez laku - polyesterový gelcoat	
V7.	Popis: Polyesterový skelný laminát
	Skladba: 1xpolyesterový gelcoat OLDOPOL S 250 VH
	1xskelná rohož 100 g/m ²
	1x TRIAXIAL-GLASS-FABRIC S32EY470-00910-01270-464000 (0/+45/-45)
	1x skelná rohož 300 g/m ²
	1x TRIAXIAL-GLASS-FABRIC S32EY470-00910-01270-464000 (0/+45/-45)
	Matrice: Vývojová
Iniciační systém 1% Butanox M-50, 0,2% Fe	
Povrchová úprava: bez laku - polyesterový gelcoat	
V8.	Popis: Polyesterový skelný laminát
	Skladba: 1xpolyesterový gelcoat OLDOPOL S 250 VH
	1xskelná rohož 100 g/m ²
	1x TRIAXIAL-GLASS-FABRIC S32EY470-00910-01270-464000 (0/+45/-45)
	1x skelná rohož 300 g/m ²
	Matrice: Vývojová
	Iniciační systém 1% Butanox M-50, 0,3% Fe
Povrchová úprava: bez laku - polyesterový gelcoat	
V9.	Popis: Polyesterový skelný laminát
	Skladba: 1xpolyesterový gelcoat OLDOPOL S 250 VH
	1xskelná rohož 100 g/m ²
	1x QUADRAXIAL-GLASS-FABRIC V104876-820 (0/+45/90/-45)
	1x skelná rohož 300 g/m ²
	Matrice: Vývojová
	Iniciační systém 1% Butanox M-50, 0,3% Fe
Povrchová úprava: bez laku - polyesterový gelcoat	
V10.	Popis: Polyesterový skelný laminát
	Skladba: 1xpolyesterový gelcoat OLDOPOL S 250 VH
	1xskelná rohož 100 g/m ²
	1x QUADRAXIAL-GLASS-FABRIC V104876-820 (0/+45/90/-45)

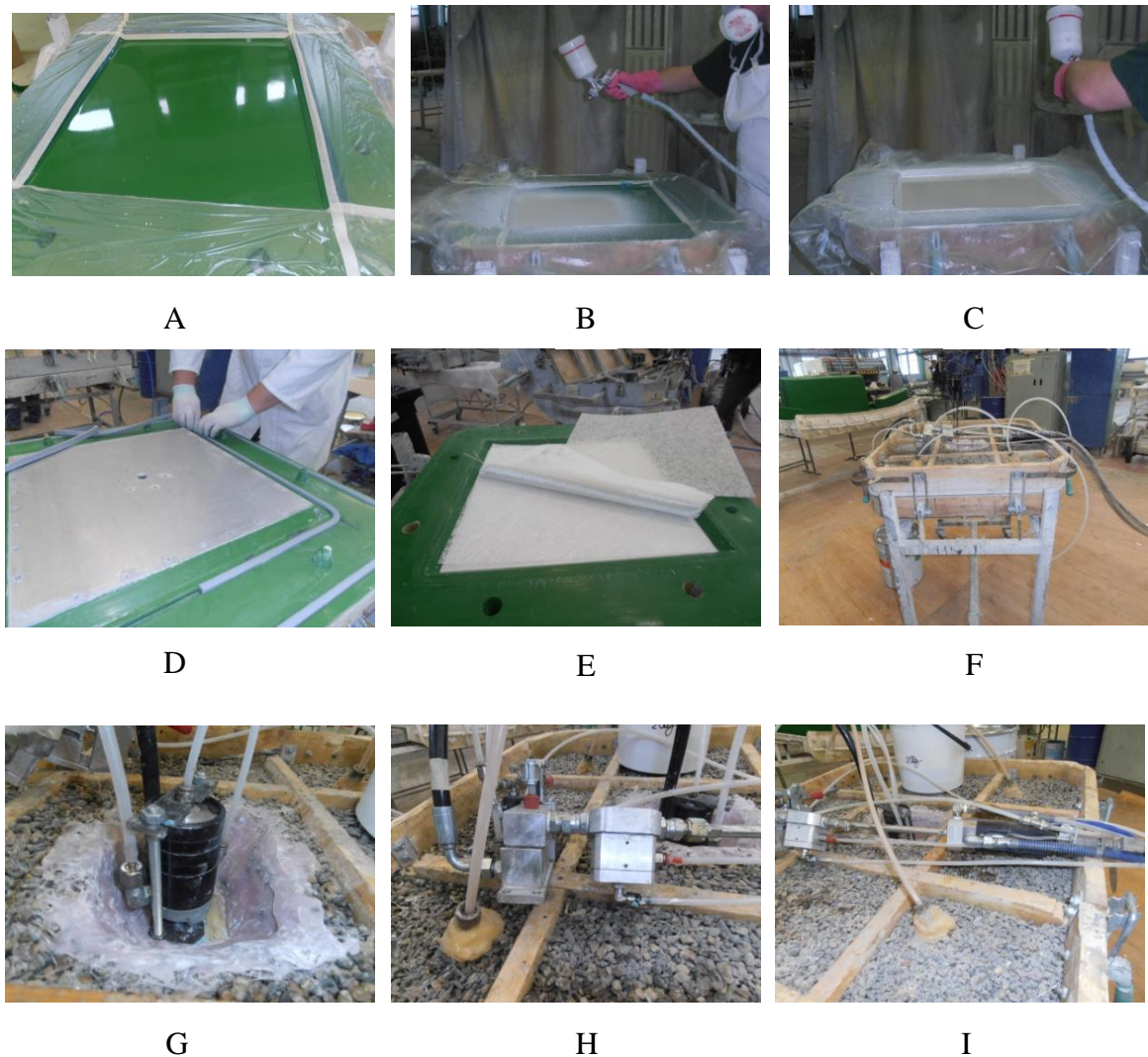
	1x skelná rohož 300 g/m2
	1x QUADRAXIAL-GLASS-FABRIC V104876-820 (0/+45/90/-45)
	Matrice: Vývojová
Iniciační systém	1% Butanox M-50, 0,3% Fe
Povrchová úprava:	bez laku - polyesterový gelcoat

Dále se uvažovalo, jaký vliv má na protipožární a pevnostní vlastnosti gelcoatová vrstva. Z toho důvodu se dodatečně vyrobily srovnávací vzorky. Skladba desky vedená pod označením V11 byla stanovena na základě předchozího měření. Tato kombinace materiálů vykazovala nejvýhodnější pevnostní vlastnosti.

Tab. 8. Návrh srovnávacích vzorků bez gelcoatové vrstvy.

Vzorek	Materiálové kombinace
V11.	Popis: Polyesterový skelný laminát
	Skladba: 1x skelná rohož 100 g/m2
	1x TRIAXIAL-GLASS-FABRIC S32EY470-00910-01270-464000 (0/+45/-45)
	1x skelná rohož 300 g/m2
	1x TRIAXIAL-GLASS-FABRIC S32EY470-00910-01270-464000 (0/+45/-45)
	Matrice: Vývojová
	Iniciační systém 1% Butanox M-50, 0,3% Fe
Povrchová úprava: bez laku	
V12.	Popis: Polyesterový skelný laminát
	Skladba: 1x BIDIAGONAL-GLASS-FABRIC S32EX010-00980-01270-283000 (+45/90/-45)
	1x skelná rohož 300 g/m2
	1x BIDIAGONAL-GLASS-FABRIC S32EX010-00980-01270-283000 (+45/90/-45)
	Matrice: Vývojová
	Iniciační systém 2% Butanox M-50, 0,3% Fe
	Povrchová úprava: Bez laku

4.1 Výroba vzorků technologií RMT



Obr. 16. Výroba vzorků technologií RTM. A – příprava spodní části formy na nástřik gelcoatové vrstvy, B – nástřik gelcoatové vrstvy, C – gelcoatová vrstva, D – utěsnění vrchní části formy, E – navrstvení výztuže do spodní části formy, F – uzavřená forma, G – ústí vstříkovací hlavy, H – pojistný tlakový ventil, I – směšovací ústrojí pryskyřice a iniciátoru.

4.1.1 Technologické podmínky

Technologické parametry pro isoftalovou nenasyčenou polyesterovou pryskyřici Norpol Dion 850 - M850:

- Teplota okolí: $22\text{ °C} \pm 2$
- Pracovní tlak: 4 bary (400 kPa)
- Vstříkovací tlak: 1 bar (100 kPa)

- Geltime: 40 - 50 min.
- Doba odformování: 3 hodiny

Technologické parametry pryskyřice vývojové:

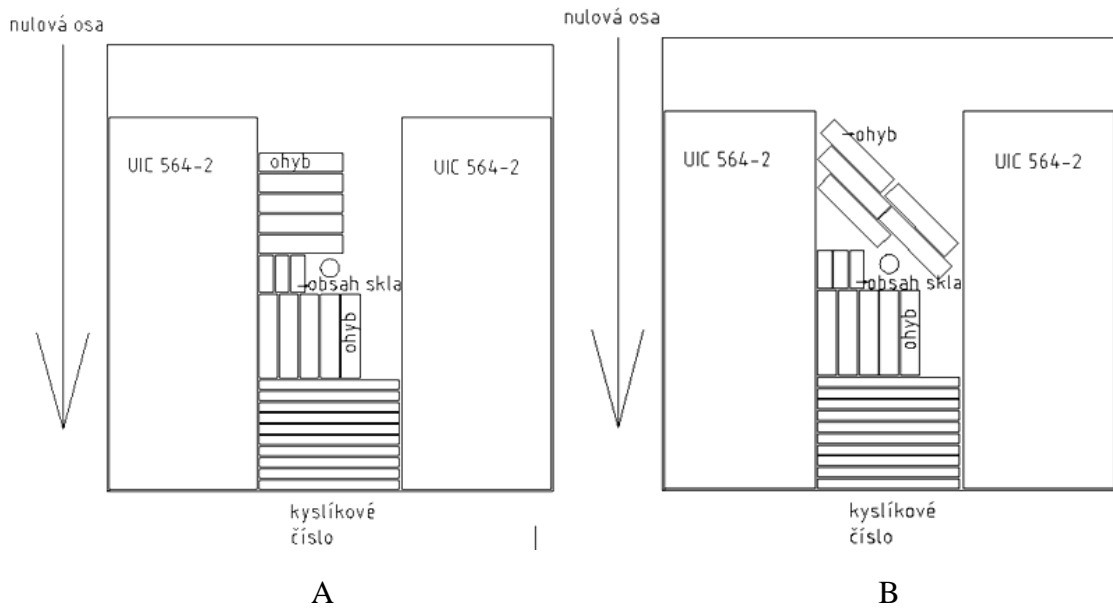
- Teplota okolí: $22\text{ °C} \pm 2$
- Pracovní tlak: 4 bary (400 kPa)
- Vstřikovací tlak: 1 bar (100 kPa)
- Geltime: 60 min.
- Doba odformování: 5 hodin

Při použití tkanin jakéhokoli druhu je riziko, že se na povrch proznačí jeho struktura. Jako ochranné opatření proti tomuto nežádoucímu efektu se u vybraných vzorků zvolilo položení rohože o gramáži 100 g/m^2 na vrstvu gelcoatu, pohledové strany výrobku. Následně jsou kladeny další vrstvy v pořadí předem určeném (viz. Tab. 6 – 8). Tkaniny mají za úkol zvýšit obsah výztuže a zajistit výhodnější pevnostní vlastnosti. Vkládaná netkaná textilie o gramáži 300 g/m^2 má zajistit snadnější rozvod pryskyřice.

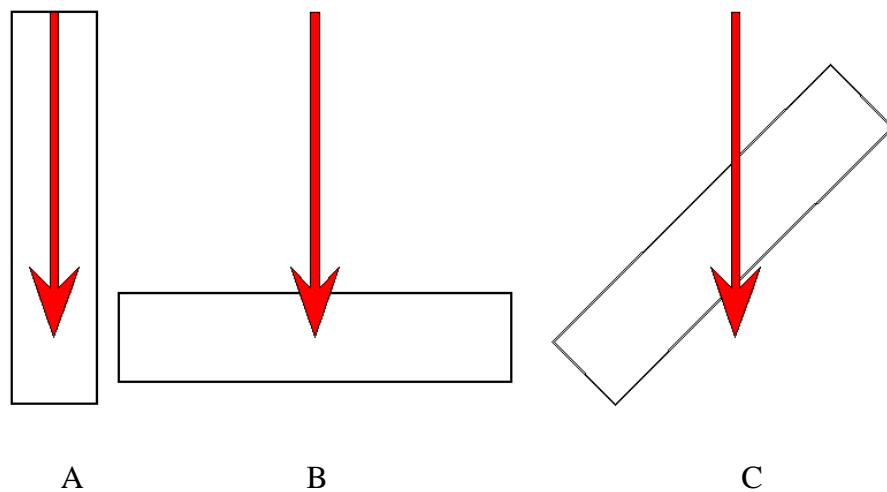
5 TESTOVÁNÍ VZORKŮ

5.1 Odebrání a příprava vzorků

Z laminátových desek o rozměru 480 x 480 mm byly odebrány vzorky. Schéma, jakým způsobem byly rozvrženy vzorky na laminátových deskách, je znázorněno na obrázku 17. Odebrané vzorky se nechali vytvrdit v peci při teplotě 60 °C po dobu 4 hodin.

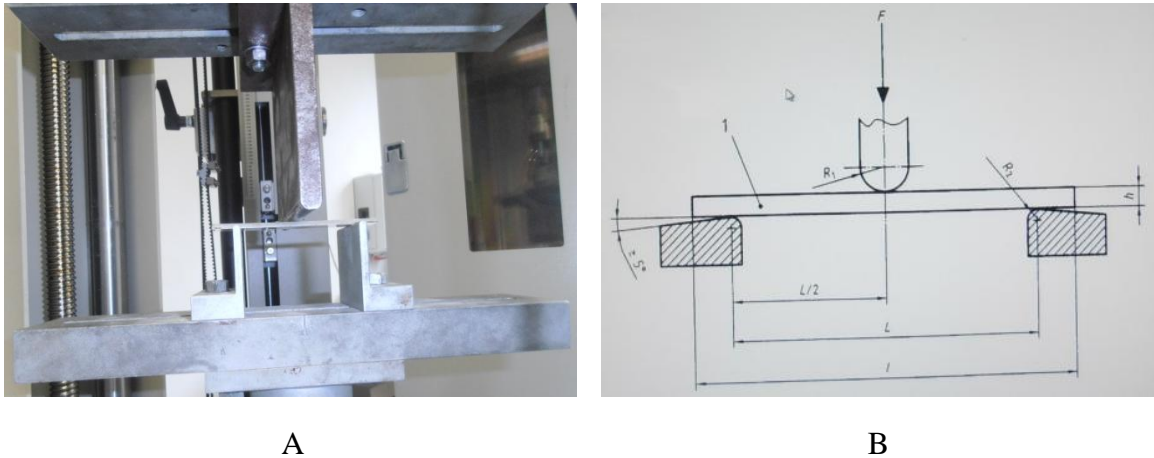


Obr. 17. Rozvržení vzorků. A – pro lamináty vyztužené triaxiální a quadraxiální tkaninou, B – pro lamináty s bidiagonální výztuží.



Obr. 18. Orientace odebraných vzorků vůči osnově.

5.2 Stanovení ohybových vlastností dle ČSN EN ISO 178



Obr. 19. Schéma měřícího zařízení. A – fotografie, B – schéma z normy ČSN EN ISO 178.

5.2.1 Přístroje, zařízení a podmínky měření.

- Měřící zařízení: Zwick 1456
- Vyhodnocovací program: TestXpert
- Rozměry vzorků: 20 x 90 mm
- Vzdálenost podpor: 64 mm
- Teplota okolí: 22 °C

Popis vzorků v tabulkách 9 – 32, které jsou uvedeny níže.

Příklad: V1_X

- Značí polohu vzorku vůči osnově. V popisu tabulky je dále toto značení upřesněno podle obr. 18.
- Označení vzorků. Značení je odpovídající s tabulkami 6 – 8.

U vzorků vyhodnocujeme modul pružnosti (E [MPa]), napětí při mezi pevnosti (σ_{fM} [MPa]), poměrné prodloužení při mezi pevnosti (ϵ_{fM} [%]) a vykonanou práci k maximální síle (W [Nmm]).

5.2.2 Naměřené hodnoty

Vzorek 1.

Tab. 9. Naměřené hodnoty ohybu vzorku 1 (orientace A).

V1_X	E	σ_{fM}	ϵ_{fM}	W
Nr	MPa	MPa	%	Nmm
1	4900	98,1	4	1412,79
2	5770	89	3,1	995,32
3	5390	102	3,2	1062,78
4	5050	103	3,7	1246,41
5	4930	95	3,3	1005,7
průměr	5210	97,3	3,5	1144,6
s	368	5,56	0,4	180,67
v	7,07	5,72	10,91	15,78

Tab. 10. Naměřené hodnoty ohybu vzorku 1 (orientace C).

V1_UHEL	E	σ_{fM}	ϵ_{fM}	W
Nr	MPa	MPa	%	Nmm
1	7400	143	3,4	1394,49
2	5060	116	3,8	1312,68
3	5120	115	4	1416,66
4	5720	126	4	1584,48
5	5760	122	3,4	1266,94
průměr	5810	124	3,7	1395,05
s	944	11,3	0,3	122,01
v	16,24	9,05	8,02	8,75

Vzorek 2.

Tab. 11. Naměřené hodnoty ohybu vzorku 2 (orientace A).

V2_II	E	σ_{fM}	ϵ_{fM}	W
Nr	MPa	MPa	%	Nmm
1	3460	102	4,2	1263,25
2	4410	108	4,6	1502,79
3	4390	118	4,3	1500,74
4	3510	96,9	4,3	1328,97
5	4290	108	4,3	1333,07
průměr	4010	106	4,3	1385,76
s	485	7,97	0,1	109,46
v	12,09	7,49	2,88	7,9

Tab. 12. Naměřené hodnoty ohybu vzorku 2 (orientace B).

V2_T	E	σ_{fM}	ϵ_{fM}	W
Nr	MPa	MPa	%	Nmm
1	4880	149	5,2	2452,62
2	5000	152	4,6	2016,17
3	5170	159	4,5	2051,97
4	5330	152	4,6	1882,19
5	5020	146	4,7	1870,51
průměr	5080	152	4,7	2054,69
s	173	4,88	0,3	236,39
v	3,41	3,22	6,37	11,5

Vzorek 3.

Tab. 13. Naměřené hodnoty ohybu vzorku 3 (orientace A).

V3_II	E	σ_{fM}	ϵ_{fM}	W
Nr	MPa	MPa	%	Nmm
1	4680	120	4,2	1627,08
2	4850	124	4,4	1714,21
3	4560	121	4,3	1673,41
4	4660	118	4,2	1542,39
5	4460	108	3,9	1259,28
průměr	4640	118	4,2	1563,28
s	145	5,98	0,2	181,55
v	3,12	5,05	4,91	11,61

Tab. 14. Naměřené hodnoty ohybu vzorku 3 (orientace B).

V3_T	E	σ_{fM}	ϵ_{fM}	W
Nr	MPa	MPa	%	Nmm
1	6630	176	4,5	2361,94
2	6610	177	4,6	2407,26
3	6500	190	4	2060,42
4	6140	168	4,5	2324,95
5	7200	176	4	2070,58
průměr	6620	177	4,3	2245,03
s	379	7,83	0,3	166,5
v	5,72	4,42	6,21	7,42

Vzorek 4.

Tab. 15. Naměřené hodnoty ohybu vzorku 4 (orientace A).

V4_II	E	σ_{fM}	ϵ_{fM}	W
Nr	MPa	MPa	%	Nmm
1	7730	259	5,5	4432,03
2	7260	268	5,8	4680,24
3	8780	278	5,5	4272,49
4	8880	276	5,3	4029,21
5	8330	250	5,9	4678,82
průměr	8200	266	5,6	4418,56
s	696	12	0,2	278,08
v	8,49	4,49	4,38	6,29

Tab. 16. Naměřené hodnoty ohybu vzorku 4 (orientace B).

V4_T	E	σ_{fM}	ϵ_{fM}	W
Nr	MPa	MPa	%	Nmm
1	6980	135	3,5	1407,18
2	5690	129	4,2	1947,74
3	6120	129	3,9	1493,91
4	6720	130	3,6	1453,48
5	6160	116	4	1604,69
průměr	6330	128	3,8	1581,4
s	514	7,04	0,3	217,44
v	8,11	5,5	7,78	13,75

Vzorek 5.

Tab. 17. Naměřené hodnoty ohybu vzorku 5 (orientace A).

V5_II	E	σ_{fM}	ϵ_{fM}	W
Nr	MPa	MPa	%	Nmm
1	5170	116	4,3	1357,81
2	4960	115	4,4	1361,39
3	4840	109	5,2	1582,55
4	5090	115	4,3	1368,88
5	5220	118	4,6	1499,99
průměr	5060	115	4,6	1434,12
s	155	3,49	0,4	102,15
v	3,06	3,03	8,13	7,12

Tab. 18. Naměřené hodnoty ohybu vzorku 5 (orientace B).

V5_T	E	σ_{fM}	ϵ_{fM}	W
Nr	MPa	MPa	%	Nmm
1	5380	116	4,1	1310,4
2	5520	124	3,9	1345,08
3	5130	116	4,1	1344,42
4	5720	134	4,4	1574,35
5	5630	120	4	1273,48
průměr	5480	122	4,1	1369,54
s	232	7,34	0,2	118,22
v	4,24	6,01	4,22	8,63

Vzorek 6.

Tab. 19. Naměřené hodnoty ohybu vzorku 6 (orientace A).

V6_X	E	σ_{fM}	ϵ_{fM}	W
Nr	MPa	MPa	%	Nmm
1	3890	124	4,8	1593,56
2	3440	129	5	1653,73
3	21,5	131	5,5	1929,47
4	3350	123	5	1684,08
5	3600	126	5,2	1802,26
průměr	2860	127	5,1	1732,62
s	1600	3,29	0,2	133,71
v	55,96	2,59	4,9	7,72

Tab. 20. Naměřené hodnoty ohybu vzorku 6 (orientace C).

V6_UHEL	E	σ_{fM}	ϵ_{fM}	W
Nr	MPa	MPa	%	Nmm
1	4080	127	4,6	1383,29
2	3600	121	5,8	2194,58
3	4370	116	4,6	1246,84
4	5120	151	5,3	2064,45
5	4820	130	4,8	1541,99
průměr	4400	129	5	1686,23
s	598	13,5	0,5	420,45
v	13,59	10,46	10,51	24,93

Vzorek 7.

Tab. 21. Naměřené hodnoty ohybu vzorku 7 (orientace A).

V7_II	E	σ_{fM}	ϵ_{fM}	W
Nr	MPa	MPa	%	Nmm
1	11800	426	4,8	5603,08
2	11700	395	4,7	4962,69
3	11400	396	5,3	5810,67
4	11600	396	4,7	5103,86
5	10300	376	5,2	5355,27
průměr	11400	398	4,9	5367,11
s	609	17,8	0,3	348,36
v	5,35	4,47	5,78	6,49

Tab. 22. Naměřené hodnoty ohybu vzorku 7 (orientace B).

V7_T	E	σ_{fM}	ϵ_{fM}	W
Nr	MPa	MPa	%	Nmm
1	7280	174	4,7	2583,43
2	8060	174	5,1	2996,37
3	7920	170	4,7	2524,02
4	7960	193	4,3	2580,69
5	8460	176	4,4	2476,36
průměr	7940	177	4,6	2632,17
s	427	8,86	0,3	208,35
v	5,38	5	6,29	7,92

Vzorek 8.

Tab. 23. Naměřené hodnoty ohybu vzorku 8 (orientace A).

V8_II	E	σ_{fM}	ϵ_{fM}	W
Nr	MPa	MPa	%	Nmm
1	4640	137	5,1	1700,51
2	4250	134	5,4	1876,39
3	4190	128	5,1	1696,35
4	3940	131	5,1	1678,33
5	4680	149	5	1798,84
průměr	4340	136	5,1	1750,08
s	314	7,97	0,2	84,89
v	7,24	5,86	3,4	4,85

Tab. 24. Naměřené hodnoty ohybu vzorku 8 (orientace B).

V8_T	E	σ_{fM}	ϵ_{fM}	W
Nr	MPa	MPa	%	Nmm
1	4700	136	4,4	1564,44
2	4530	128	5,2	1863,49
3	4180	120	4,6	1355,22
4	3900	105	4,8	1325,74
5	3630	112	4,8	1471,52
průměr	4190	120	4,8	1516,08
s	440	12,2	0,3	216,29
v	10,5	10,12	6,1	14,27

Vzorek 9.

Tab. 25. Naměřené hodnoty ohybu vzorku 9 (orientace A).

V9_II	E	σ_{fM}	ϵ_{fM}	W
Nr	MPa	MPa	%	Nmm
1	3530	107	5,1	1550,17
2	4000	113	4,8	1367,27
3	4240	107	4,2	1081,47
4	4400	117	5,5	1669,53
5	4040	106	5,2	1505,2
průměr	4040	110	5	1434,73
s	328	4,6	0,5	225,15
v	8,12	4,17	10,22	15,69

Tab. 26. Naměřené hodnoty ohybu vzorku 9 (orientace B).

V9_T	E	σ_{fM}	ϵ_{fM}	W
Nr	MPa	MPa	%	Nmm
1	4250	127	6	2173,59
2	4720	150	5,3	2073,29
3	3910	126	5,5	1903,01
4	3580	134	5,2	1951,92
5	4010	133	5	1866,47
průměr	4090	134	5,4	1993,65
s	428	9,62	0,4	127,33
v	10,45	7,18	6,8	6,39

Vzorek 10.

Tab. 27. Naměřené hodnoty ohybu vzorku 10 (orientace A).

V10_II	E	σ_{fM}	ϵ_{fM}	W
Nr	MPa	MPa	%	Nmm
1	6570	186	4,3	2308,05
2	6930	189	3,7	1905,25
3	7150	181	4,5	2330,02
4	7030	180	3,8	1897,78
5	7470	183	4,2	2187,52
průměr	7030	184	4,1	2125,72
s	330	3,42	0,3	211,76
v	4,7	1,86	7,73	9,96

Tab. 28. Naměřené hodnoty ohybu vzorku 10 (orientace B).

V10_T	E	σ_{fM}	ϵ_{fM}	W
Nr	MPa	MPa	%	Nmm
1	6600	234	3,8	2435,01
2	9250	197	2,6	1433,32
3	8890	206	2,7	1500,9
4	8920	228	3	1748,28
5	10100	225	2,7	1636,9
průměr	8750	218	3	1750,88
s	1300	15,9	0,5	401,36
v	14,81	7,32	16,96	22,92

Vzorek 11.

Tab. 29. Naměřené hodnoty ohybu vzorku 11. (orientace A).

V11_II	E	σ_{fM}	ϵ_{fM}	W
Nr	MPa	MPa	%	Nmm
1	13500	505	4,3	4630,51
2	14100	474	4,3	4556,2
3	13000	468	4,5	5002,68
4	15300	498	3,8	3728,28
5	15400	509	4,1	4208,7
průměr	14300	491	4,2	4425,28
s	1080	18,3	0,3	480,98
v	7,53	3,72	6,71	10,87

Tab. 30. Naměřené hodnoty ohybu vzorku 11 (orientace B).

V11_T	E	σ_{fM}	ϵ_{fM}	W
Nr	MPa	MPa	%	Nmm
1	7300	195	3,7	1886,94
2	8460	213	3,8	2143,32
3	9100	216	3,3	1704,33
4	8290	202	3,7	1844,49
5	8430	200	3,9	2076,91
průměr	8320	205	3,7	1931,2
s	648	9,09	0,2	178,31
v	7,79	4,43	6,53	9,23

Vzorek 12.

Tab. 31. Naměřené hodnoty ohybu vzorku 12 (orientace A).

V12_II	E	σ_{fM}	ϵ_{fM}	W
Nr	MPa	MPa	%	Nmm
1	11100	191	4,5	2045,32
2	9830	184	5	2381,75
3	9600	180	4,6	2239,86
4	9490	170	4,4	1923,39
5	9410	177	4,5	2018,7
průměr	9890	180	4,6	2121,8
s	704	7,6	0,2	185,31
v	7,12	4,21	5,2	8,73

Tab. 32. Naměřené hodnoty ohybu vzorku 12 (orientace B).

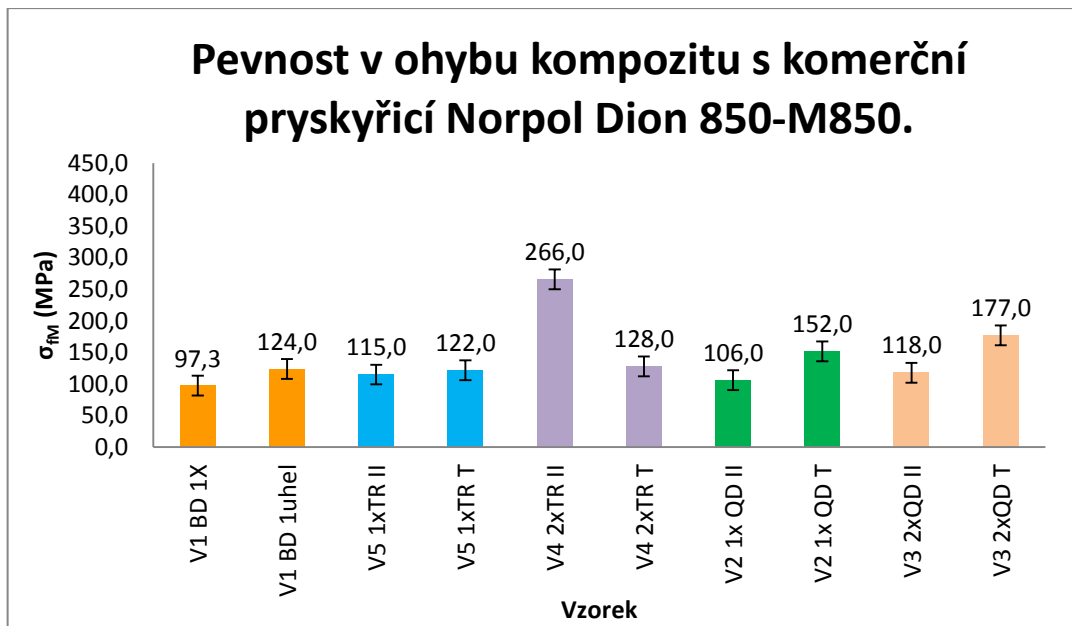
V12_T	E	σ_{fM}	ϵ_{fM}	W
Nr	MPa	MPa	%	Nmm
1	9480	187	4	2038,67
2	9350	230	4,6	2600,83
3	9970	222	4	2145,05
4	9320	229	4,3	2478,45
5	7910	210	5	3146,04
průměr	9200	216	4,4	2481,81
s	771	17,7	0,4	437,37
v	8,38	8,22	9,8	17,62

5.2.3 Vyhodnocení výsledků

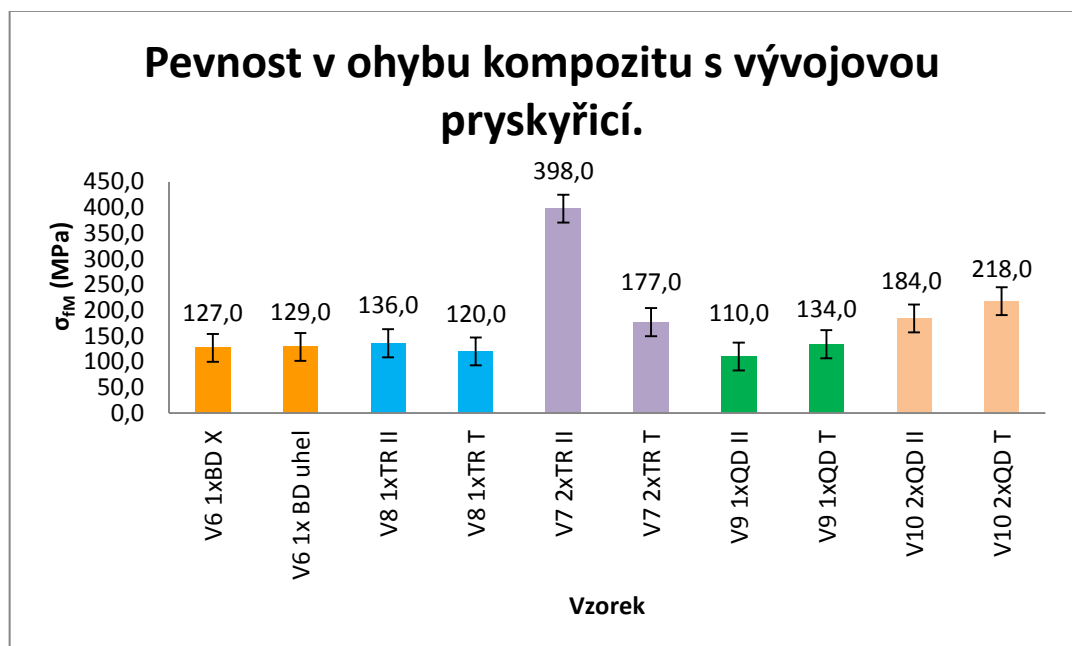
5.2.3.1 Srovnání pevnostních vlastností v ohybu zvolených pryskyřic.

Použité zkratky v grafech:

- BD – bidiagonální tkanina
- TR – triaxiální tkanina
- QD – quadraxiální tkanina



Obr. 20. Pevnostní ohybové vlastnosti vzorků s pryskyřicí Norpol Dion 850-M850.



Obr. 21. Pevnostní ohybové vlastnosti vzorků s vývojovou pryskyřicí.

Z obrázků 20 a 21 je patrné, že vývojová pryskyřice napomáhá k zlepšení pevnostních vlastností v ohybu. Ovšem nemůžeme tvrdit, že toto zlepšení je pravidlem. Stále platí, že zásadní vliv na pevnost kompozitu má výztuž.

Při porovnání laminátů s jednou vrstvou quadraxiální tkaniny, V2 a V9, vidíme, že zlepšení u vzorku, který je orientován po osnově, je minimální. Přičemž vzorek orientovaný kolmo k osnově vykazuje výhodnější vlastnosti u komerční pryskyřice. Obdobně je na tom laminát s jednou vrstvou triaxiální tkaniny.

Při objektivním posouzení pevnostních vlastností je třeba brát ohled na použitou tkaninu. Především pak na hustotu vyztužení v jednotlivých vrstvách tkaniny u každého typu.

Jako příklad uvádím výpisy z materiálových listů u použité quadraxiální a triaxiální tkaniny.

Tab. 33. Výpis z materiálového listu S32EY470-00910-01270-464000

Použitý - TRIAXIAL		
Konstrukce	Gramáž (g/m ²)	Jemnost příze (tex)
0°	425	1200
+45°	243	300
-45°	243	300

Tab. 34. Výpis z materiálového listu V104876-00820-01270-000000

Použitý - QUADRAXIAL		
Konstrukce	Gramáž (g/m ²)	Jemnost příze (tex)
0°	213	600
+45°	200	300
90°	201	300
-45°	200	300

Kde:

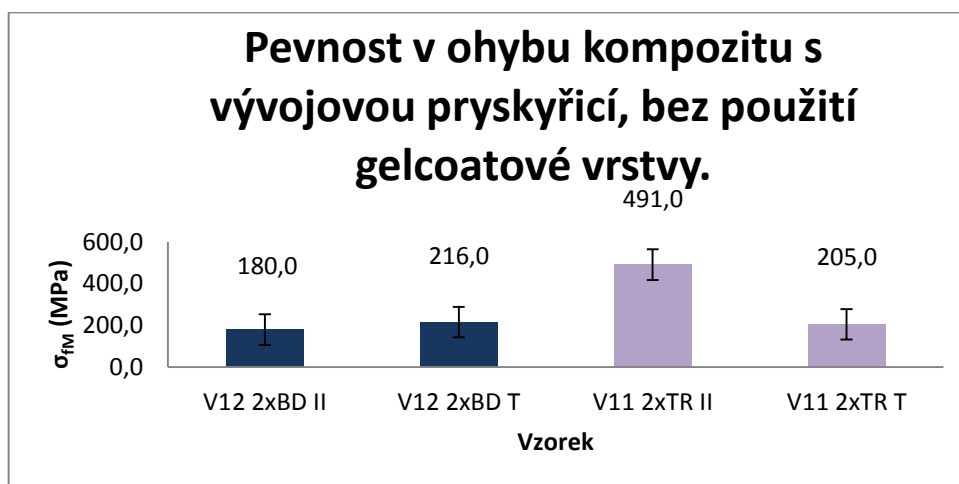
Gramáž [g/m²] – jedná se o charakteristiku nejen textilií. Vyjadřuje hmotnost jednoho metru čtverečního v gramech.

Jemnost příze [tex] – jedná se o délkovou hustotu. Kdy jednotka tex vyjadřuje hmotnost jednoho kilometru příze v gramech.

Dle francouzské normy je od materiálů uplatňujících se v železničním průmyslu vyžadováno, aby jejich pevnost v ohybu dosahovala minimální hodnoty 150 MPa. [22] Z tohoto pohledu jsou velmi zajímavé materiály vyztužené dvěma vrstvami triaxiální tkaniny. Vzorek V4 dosahuje velmi uspokojivé průměrné meze pevnosti v poloze A ($\sigma_{fM} = 266$ MPa). Obzvláště je pak zajímavý vzorek V7, kde se uspokojivé meze pevnosti v ohybu dosahuje i u vzorků uložených v poloze B. U tohoto vzorku vývojová pryskyřice významně navýšila jeho ohybovou pevnost. V poloze A tato pevnost v průměru dosahuje hodnoty 398 MPa a v poloze B 177 MPa.

Na základě předcházejícího měření a jeho výsledcích byl vyroben srovnávací vzorek označený jako V11. Cílem bylo porovnat, jakou měrou ovlivňuje pevnostní vlastnosti gelcoatová vrstva. K tomuto účelu byl vybrán vzorek, který z předchozího měření vykazoval nejspokojivější vlastnosti. Při porovnání vzorků V7 a V11 se pevnost v poloze A u srovnávacího vzorku zvýší v průměru až na hodnotu 491 MPa.

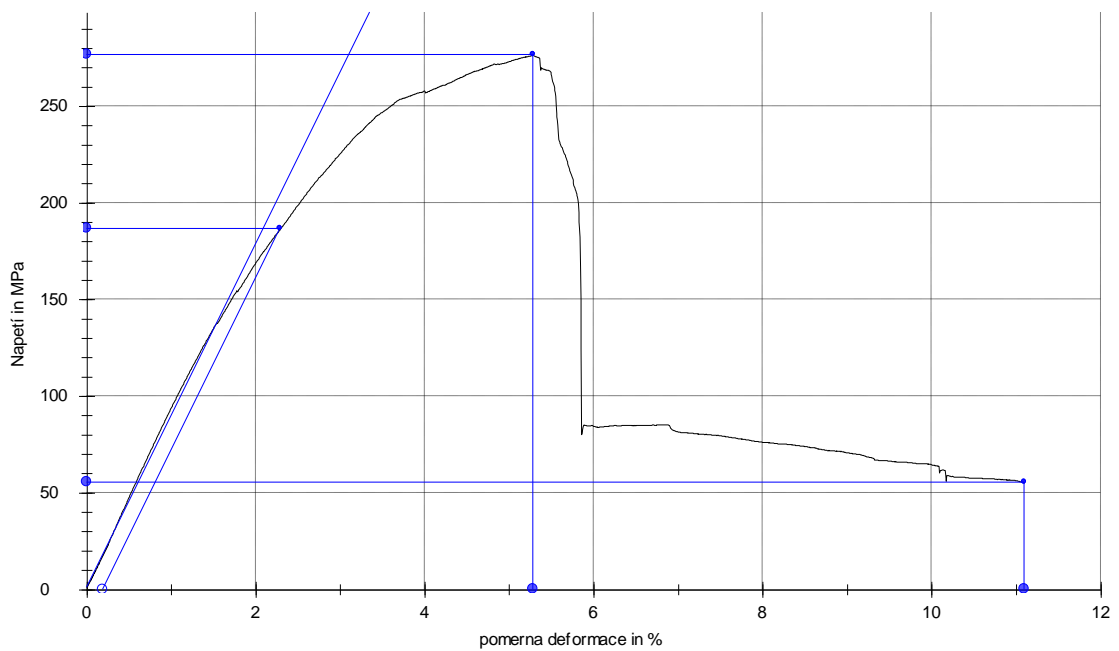
Dále byl vyroben vzorek V12 s použitím dvou vrstev bidiagonální tkaniny. U tohoto vzorku byla uplatněno polohování A dle obrázku 17. Cílem bylo prověřit jaký vliv má na pevnost slabá vrstva rovingu pootočeného k osnově o 90°. Ukázalo se, že tato vrstva nemá zásadní vliv na pevnost materiálu.



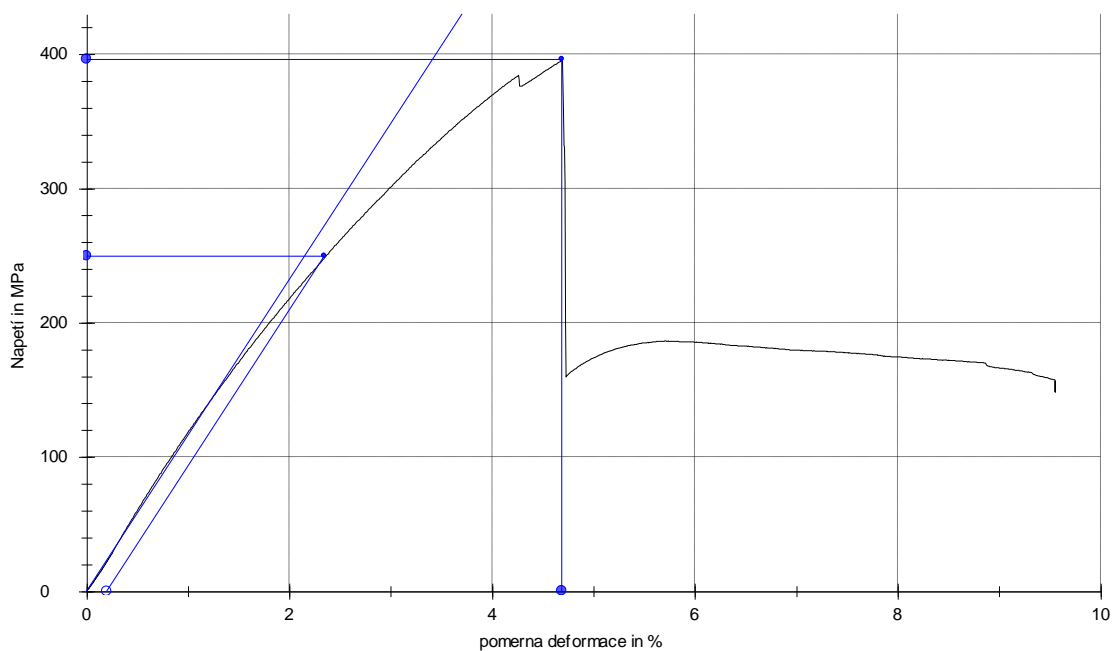
Obr. 22. Pevnostní ohybové vlastnosti vývojové pryskyřice srovnávacích vzorků bez gelcoatové vrstvy.

5.2.3.2 Průběh závislosti napětí na poměrné deformaci.

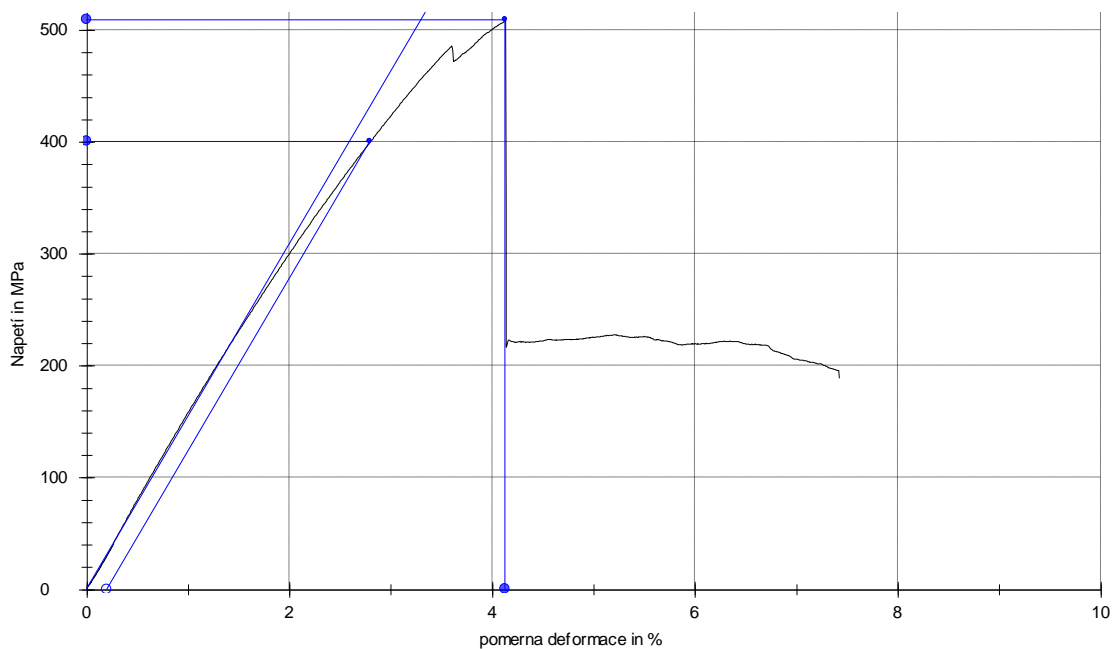
V následujících obrázcích 23 – 25, jsou uvedeny grafy závislosti napětí na poměrné deformaci pro vzorky 4, 7 a 11.



Obr. 23. Vzorek 4. Použitá pryskyřice Norpol Dion 850 – M850, výztužný materiál – dvě vrstvy triaxiální tkaniny.



Obr. 24. Vzorek 7. Použitá vývojová pryskyřice, výztužný materiál – dvě vrstvy triaxiální tkaniny.



Obr. 25. Vzorek 11. Použitá vývojová pryskyřice, výztužný materiál – dvě vrstvy triaxiální tkaniny. Vzorek je bez gelcoatové vrstvy.

5.3 Zkušební metoda dle směrnice UIC 564-2

Pro stanovení požární odolnosti podle směrnice UIC 564-2, byly odebrány vzorky o rozměrech 400 x 160 mm. Z každé desky dva, které byly následně specifikovány (př. V1a; V1b), aby při následném vyhodnocování nedošlo k záměně naměřených hodnot.

Jakým způsobem byly vzorky před odběrem polohovány, je znázorněno na obrázku 17.

Použité přístroje a pomůcky k měření a vyhodnocení:

- stopky,
- stojan,
- pipeta,
- etanol,
- kahan,
- PLANIX 5.

Měřené ohořelé plochy vzorků s matricí Norpol Dion 850 - M850.

Tab. 35. Naměřené ohořelé plochy vzorků s matricí Norpol Dion 850 - M850.

	V1/a	V1/b	V2/a	V2/b	V3/a	V3/b	V4/a	V4/b	V5/a	V5/b
	cm ²	cm ²	cm ²	cm ²	cm ²	cm ²	cm ²	cm ²	cm ²	cm ²
1	94,5	86,7	148,6	130,1	167,4	165,9	163,9	110,7	134,9	131,1
2	94,2	86,5	148,2	128,9	166,6	166,0	160,9	109,3	134,3	131,3
3	95,3	86,4	148,8	128,8	166,4	166,2	163,9	109,7	133,6	132,0
4	93,9	86,5	148,5	129,1	165,5	166,4	164,5	109,4	133,8	131,6
5	94,2	86,6	148,5	128,4	166,5	165,6	165,2	110,1	134,7	131,6
x	94,42	86,54	148,52	129,06	166,48	166,02	163,68	109,84	134,26	131,52
s	0,536	0,114	0,217	0,635	0,676	0,303	1,644	0,573	0,559	0,342
v	0,006	0,001	0,001	0,005	0,004	0,002	0,010	0,005	0,004	0,003

Měřené ohořelé plochy vzorků s vývojovou pryskyřicí.

Tab. 36. Naměřené ohořelé plochy vzorků s vývojovou matricí.

	V6/a	V6/b	V7/a	V7/b	V8/a	V8/b	V9/a	V9/b	V10/a	V10/b
	cm ²	cm ²	cm ²	cm ²	cm ²	cm ²	cm ²	cm ²	cm ²	cm ²
1	119,6	147,6	148,2	138,5	154,1	149,8	151,8	113,6	152,9	96,2
2	120,2	147,3	148,3	138,6	154,4	150,1	150,6	113,3	153,5	95,1
3	119,6	147,1	148,0	138,9	155,1	150,2	150,2	113,1	152,4	96,3
4	119,8	147,2	147,9	138,1	155,3	149,5	151,1	113,2	151,8	96,7
5	119,3	147,6	147,6	138,1	153,8	150,1	150,8	112,3	153,3	95,9
x	119,70	147,36	148,00	138,44	154,54	149,94	150,90	113,10	152,78	96,04
s	0,332	0,230	0,274	0,344	0,643	0,288	0,600	0,485	0,691	0,598
v	0,003	0,002	0,002	0,002	0,004	0,002	0,004	0,004	0,005	0,006

Tab. 37. Naměřené ohořelé plochy vzorků s vývojovou pryskyřicí, bez gelcoatové vrstvy.

	V11/a	V11/b	V12/a	V12/b
	cm ²	cm ²	cm ²	cm ²
1	125,7	144,6	134,8	129,9
2	125,9	144,9	135	129,6
3	125,6	145,7	134,5	129,8
4	125,6	143,9	134,7	130,8
5	125,4	144,6	134,5	129,3
x	125,64	144,74	134,7	129,88
s	0,182	0,650	0,212	0,563
v	0,001	0,004	0,002	0,004

5.3.1 Vyhodnocení

Tab. 38. Kritéria vyhodnocení protipožární odolnosti.

UHAŠENÍ DESKY (s) OHOŘELÁ PLOCHA (cm ²)	P ≤ 2	2 < P ≤ 10	P > 10
	S ≤ 100	100 < S ≤ 150	S > 150
	A	B _I	C _{III}
	B _{II}	B _{III}	C _{IV}
	C _I	C _{II}	C _V

Tab. 39. Vyhodnocení protipožární odolnosti vzorku 1.

		V1	
		a	b
UHAŠENÍ ETANOLOVÉHO PLAMENE	s	344	336
UHAŠENÍ VZORKU PO ETANOLOVÉM PLAMENI	s	136	1
PLOCHA POŠKOZENÁ PLAMENEM	cm ²	94,42	86,54
ODPADÁVÁNÍ HOŘÍCÍCH ČÁSTEČEK A KAPEK	ANO/NE	NE	NE
DOŠLO K PROHOŘENÍ VZORKU	ANO/NE	NE	NE
ZAŘAZENÍ DO SKUPINY	-	C _{III}	A

Tab. 40. Vyhodnocení protipožární odolnosti vzorku 2.

		V2	
		a	b
UHAŠENÍ ETANOLOVÉHO PLAMENE	s	323	297
UHAŠENÍ VZORKU PO ETANOLOVÉM PLAMENI	s	2	1
PLOCHA POŠKOZENÁ PLAMENEM	cm ²	148,52	129,06
ODPADÁVÁNÍ HOŘÍCÍCH ČÁSTEČEK A KAPEK	ANO/NE	NE	NE
DOŠLO K PROHOŘENÍ VZORKU	ANO/NE	NE	NE
ZAŘAZENÍ DO SKUPINY	-	B _{II}	B _{II}

Tab. 41. Vyhodnocení protipožární odolnosti vzorku 3.

		V3	
		a	b
UHAŠENÍ ETANOLOVÉHO PLAMENE	s	300	295
UHAŠENÍ VZORKU PO ETANOLOVÉM PLAMENI	s	26	2
PLOCHA POŠKOZENÁ PLAMENEM	cm ²	166,48	166,02
ODPADÁVÁNÍ HOŘÍCÍCH ČÁSTEČEK A KAPEK	ANO/NE	NE	NE
DOŠLO K PROHOŘENÍ VZORKU	ANO/NE	NE	NE
ZAŘAZENÍ DO SKUPINY	-	C_V	C_I

Tab. 42. Vyhodnocení protipožární odolnosti vzorku 4.

		V4	
		a	b
UHAŠENÍ ETANOLOVÉHO PLAMENE	s	349	336
UHAŠENÍ VZORKU PO ETANOLOVÉM PLAMENI	s	2	6
PLOCHA POŠKOZENÁ PLAMENEM	cm ²	163,68	109,84
ODPADÁVÁNÍ HOŘÍCÍCH ČÁSTEČEK A KAPEK	ANO/NE	NE	NE
DOŠLO K PROHOŘENÍ VZORKU	ANO/NE	NE	NE
ZAŘAZENÍ DO SKUPINY	-	C_I	B_{III}

Tab. 43. Vyhodnocení protipožární odolnosti vzorku 5.

		V5	
		a	b
UHAŠENÍ ETANOLOVÉHO PLAMENE	s	341	337
UHAŠENÍ VZORKU PO ETANOLOVÉM PLAMENI	s	1	2
PLOCHA POŠKOZENÁ PLAMENEM	cm ²	134,26	131,52
ODPADÁVÁNÍ HOŘÍCÍCH ČÁSTEČEK A KAPEK	ANO/NE	NE	NE
DOŠLO K PROHOŘENÍ VZORKU	ANO/NE	NE	NE
ZAŘAZENÍ DO SKUPINY	-	B_{II}	B_{II}

Tab. 44. Vyhodnocení protipožární odolnosti vzorku 6.

		V6	
		a	b
UHAŠENÍ ETANOLOVÉHO PLAMENE	s	400	328
UHAŠENÍ VZORKU PO ETANOLOVÉM PLAMENI	s	-1	-1
PLOCHA POŠKOZENÁ PLAMENEM	cm ²	119,7	147,36
ODPADÁVÁNÍ HOŘÍCÍCH ČÁSTEČEK A KAPEK	ANO/NE	NE	NE
DOŠLO K PROHOŘENÍ VZORKU	ANO/NE	NE	NE
ZAŘAZENÍ DO SKUPINY	-	B_{II}	B_{II}

Tab. 45. Vyhodnocení protipožární odolnosti vzorku 7.

		V7	
		a	b
UHAŠENÍ ETANOLOVÉHO PLAMENE	s	335	330
UHAŠENÍ VZORKU PO ETANOLOVÉM PLAMENI	s	-1	-1
PLOCHA POŠKOZENÁ PLAMENEM	cm ²	148	138,44
ODPADÁVÁNÍ HOŘÍCÍCH ČÁSTEČEK A KAPEK	ANO/NE	NE	NE
DOŠLO K PROHOŘENÍ VZORKU	ANO/NE	NE	NE
ZAŘAZENÍ DO SKUPINY	-	B_{II}	B_{II}

Tab. 46. Vyhodnocení protipožární odolnosti vzorku 8.

		V8	
		a	b
UHAŠENÍ ETANOLOVÉHO PLAMENE	s	334	323
UHAŠENÍ VZORKU PO ETANOLOVÉM PLAMENI	s	-1	0
PLOCHA POŠKOZENÁ PLAMENEM	cm ²	154,54	149,94
ODPADÁVÁNÍ HOŘÍCÍCH ČÁSTEČEK A KAPEK	ANO/NE	NE	NE
DOŠLO K PROHOŘENÍ VZORKU	ANO/NE	NE	NE
ZAŘAZENÍ DO SKUPINY	-	C_I	B_{II}

Tab. 47. Vyhodnocení protipožární odolnosti vzorku 9.

		V9	
		a	b
UHAŠENÍ ETANOLOVÉHO PLAMENE	s	293	317
UHAŠENÍ VZORKU PO ETANOLOVÉM PLAMENI	s	0	0
PLOCHA POŠKOZENÁ PLAMENEM	cm ²	150,9	113,1
ODPADÁVÁNÍ HOŘÍCÍCH ČÁSTEČEK A KAPEK	ANO/NE	NE	NE
DOŠLO K PROHOŘENÍ VZORKU	ANO/NE	NE	NE
ZAŘAZENÍ DO SKUPINY	-	C_I	B_{II}

Tab. 48. Vyhodnocení protipožární odolnosti vzorku 10.

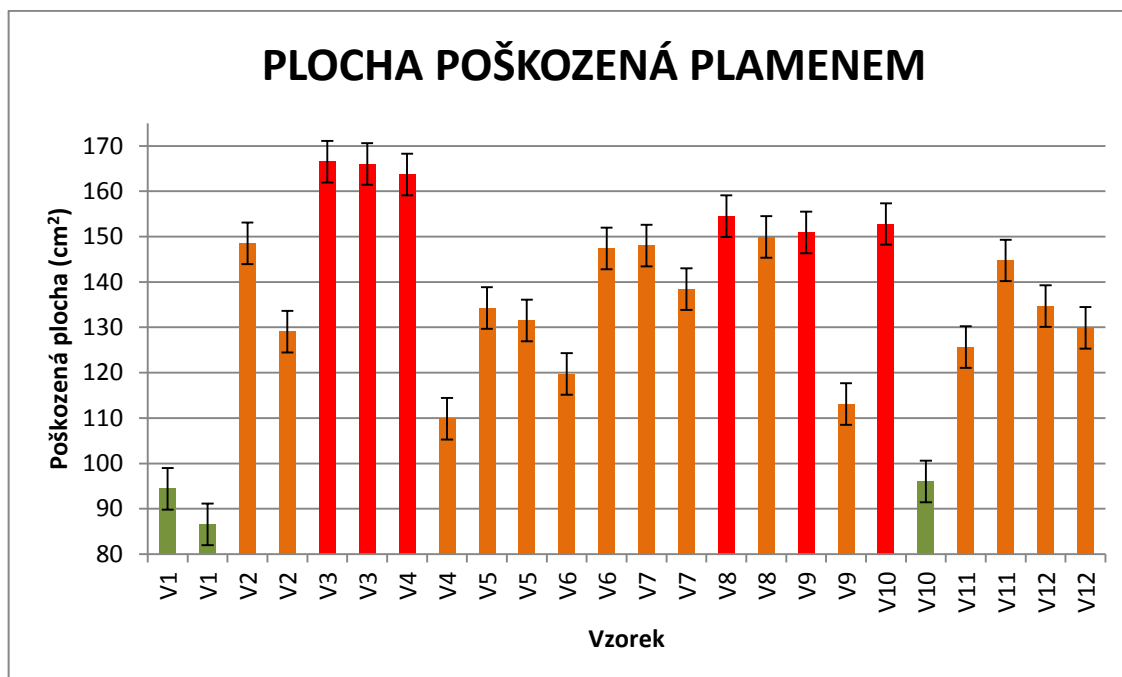
		V10	
		a	b
UHAŠENÍ ETANOLOVÉHO PLAMENE	s	330	334
UHAŠENÍ VZORKU PO ETANOLOVÉM PLAMENI	s	-1	-1
PLOCHA POŠKOZENÁ PLAMENEM	cm ²	152,78	96,04
ODPADÁVÁNÍ HOŘÍCÍCH ČÁSTEČEK A KAPEK	ANO/NE	NE	NE
DOŠLO K PROHOŘENÍ VZORKU	ANO/NE	NE	NE
ZAŘAZENÍ DO SKUPINY	-	C_I	A

Tab. 49. Vyhodnocení protipožární odolnosti vzorku 11.

		V11	
		a	b
UHAŠENÍ ETANOLOVÉHO PLAMENE	s	324	313
UHAŠENÍ VZORKU PO ETANOLOVÉM PLAMENI	s	-1	-1
PLOCHA POŠKOZENÁ PLAMENEM	cm ²	125,64	144,74
ODPADÁVÁNÍ HOŘÍCÍCH ČÁSTEČEK A KAPEK	ANO/NE	NE	NE
DOŠLO K PROHOŘENÍ VZORKU	ANO/NE	NE	NE
ZAŘAZENÍ DO SKUPINY	-	B_{II}	B_{II}

Tab. 50. Vyhodnocení protipožární odolnosti vzorku 12.

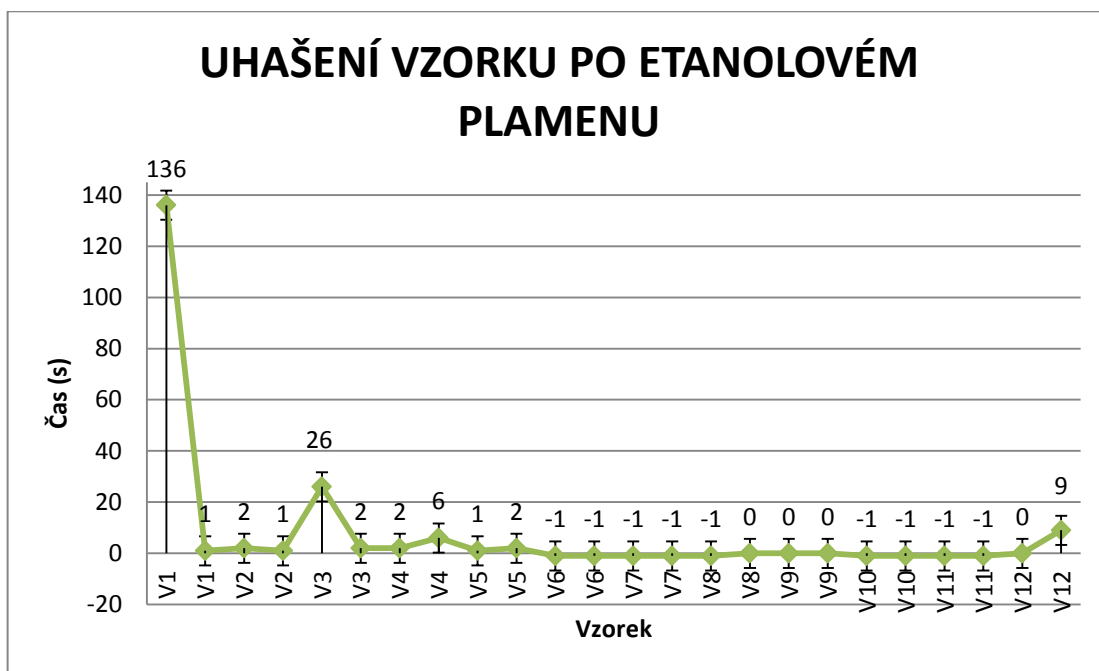
		V12	
		a	b
UHAŠENÍ ETANOLOVÉHO PLAMENE	s	327	330
UHAŠENÍ VZORKU PO ETANOLOVÉM PLAMENI	s	0	9
PLOCHA POŠKOZENÁ PLAMENEM	cm ²	134,7	129,88
ODPADÁVÁNÍ HOŘÍCÍCH ČÁSTEČEK A KAPEK	ANO/NE	NE	NE
DOŠLO K PROHOŘENÍ VZORKU	ANO/NE	NE	NE
ZAŘAZENÍ DO SKUPINY	-	B_{II}	B_{III}



Obr. 26. Grafické znázornění požárem poškozené plochy dle posuzovacích kritérií.

Z grafického vyjádření velikosti ohořelé plochy (obr. 26) je zjevné, že drtivá většina vzorků vykazuje značné velikosti požárem poškozených ploch. V zásadě se jedná o ne-

příznivý jev. V důsledku ztrát pevnostních vlastností v oblasti spáleniny se toto místo stává po požáru oslabeným. Čím větší ohořelá část je, tím nestabilnější se konstrukce stává.



Obr. 27. Naměřené časy uhašení vzorku po etanolovém plamenu.

Ze srovnání velikosti ohořelé plochy jednoznačně neplyne převaha výhodnějších vlastností ani u jedné pryskyřice.

Na základě srovnání uhašení plamene desky po uhašení etanolového plamene je situace o něco čitelnější. U vývojové pryskyřice se projevila neochota materiálu dále hořet, dojde-li ke snížení intenzity zdroje ohně.

5.4 Stanovení kyslíkového čísla

Hodnota kyslíkového čísla se udává v objemových procentech. Podle dosahovaných hodnot limitního kyslíkového čísla (LOI – Limited Oxygen Index) se materiály dle různých světových norem zařazují do skupin.

V následující tabulce jsou tyto normy uvedeny. Spolu s jejich značením i rozsah hodnot LOI platných pro danou třídu bezpečnosti.

Tab. 51. Normy a značení tříd.

ASTM 2863 LIMITED OXYGEN INDEX (LOI)	UK BS 476 PART 6,7	GERMANY 4102 5510		FRANCE NF P 92-501	USA ASTM E84 UL94			EUROCLASS SINGLE BURNING ITEM (SBI)
41 - 50	Class 0	Class A2	S4	M1	25	5V	0	B
34,5 - 41	Class 1	Class B1	S4	M2	50	0	1	B/C
28,5 - 34,5	Class 2	Class B2	S3	M3	100	0	2	C/D
22 - 28,5	Class 3	Class B3	S2	M4	>100	1	3	D/E
19 - 22	Class 4	-	-	M5	>100	2	4	-

Tab. 52. Třídění dle německé normy 4102.

Třída a značení		Hořlavost
TŘÍDA A	A1	Nehořlavý materiál
	A2	
TŘÍDA B	B1	Nesnadno hořlavý materiál
	B2	Hořlavý materiál
	B3	Snadno hořlavý materiál

Tab. 53. Dle hodnot LOI zařazení do bezpečnostních tříd v různých zemích.

Značení vzorků	LOI (%)	UK BS 476 Part 6,7	Germany 4102, 5510		France NF P 92- 501	USA ASTM E84 UL94			Euroclass (SBI)
V1	26,2 - 26,4	Class 3	Class B3	S2	M4	> 100	1	3	D/E
V2	24,2 - 24,4	Class 3	Class B3	S2	M4	> 100	1	3	D/E
V3	24,4 - 24,6	Class 3	Class B3	S2	M4	> 100	1	3	D/E
V4	25,4 - 25,6	Class 3	Class B3	S2	M4	> 100	1	3	D/E
V5	24,4 - 24,6	Class 3	Class B3	S2	M4	> 100	1	3	D/E
V6	25	Class 3	Class B3	S2	M4	> 100	1	3	D/E
V7	31,1	Class 2	Class B2	S3	M3	100	0	2	C/D
V8	28,6	Class 2	Class B2	S3	M3	100	0	2	C/D
V9	28,6	Class 2	Class B2	S3	M3	100	0	2	C/D
V10	29,4 - 30,2	Class 2	Class B2	S3	M3	100	0	2	C/D
V11	32 - 34	Class 2	Class B2	S3	M3	100	0	2	C/D
V12	33,3	Class 2	Class B2	S3	M3	100	0	2	C/D

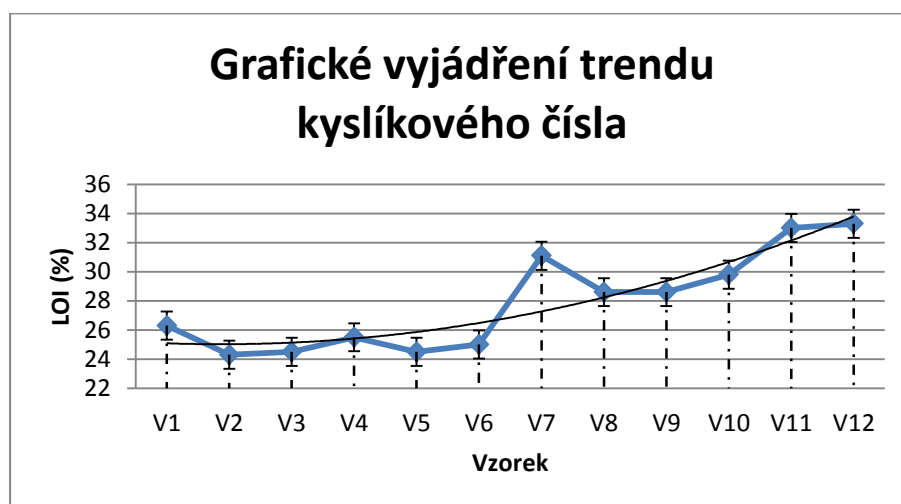
5.4.1 Vyhodnocení

Vzorky byly rozřazeny do skupin podle tabulky 51. Ani jedna z testovaných směsí nevykazuje nejvyšší třídu požární bezpečnosti.

U vzorků V1 – V6 se nacházíme v poměrně nízké skupině požární odolnosti. Takový materiál, podle vhodnosti aplikace by se použil na vnější části kolejových vozidel.

Tedy tam, kde nejsou velké nároky na požární odolnost. V případech, kdy se jedná o vozidla určená pro přepravu metrem, anebo taková, která jsou používána na tratích s tunely, se toto pravidlo nevztahuje. U těchto typů vozidel jsou kladeny zvýšené nároky na protipožární vlastnosti obecně.

Ostatní vzorky vykazují vlastnosti o třídu lepší. Z pohledu vhodnosti aplikace v praxi, je možno tento materiál použít na vnitřní prostory traťových vozidel. Vyjma stropních a nadokenních prostor.



Obr. 28. Grafické vyjádření trendu kyslíkového čísla.

5.5 Stanovení obsahu skla kalcinační metodou

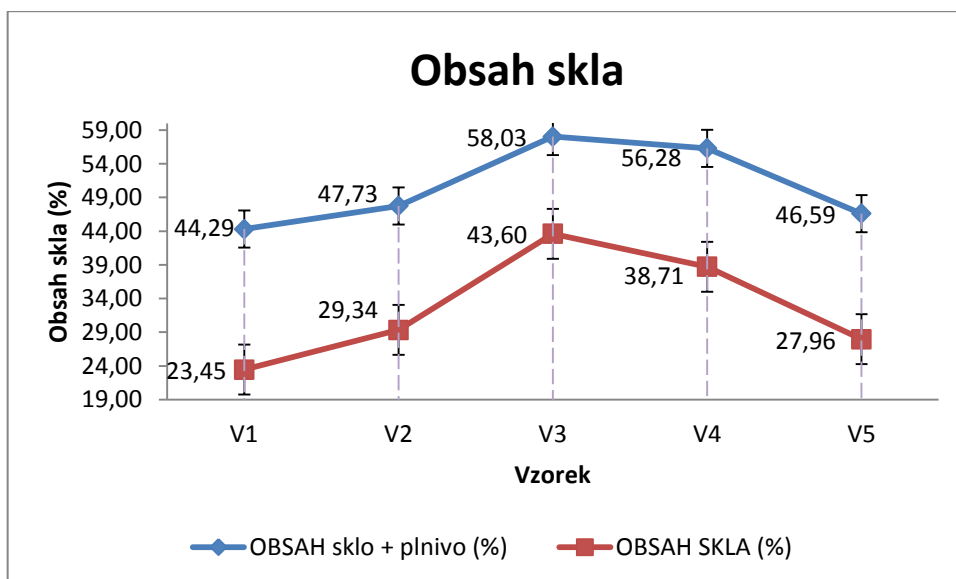
Princip zkoušky spočívá ve vystavení vzorku zvýšené teplotě po dostatečně dlouhou dobu. Následně jsou porovnány počáteční hmotnosti jednotlivých vzorků s hmotnostmi po spálení. U takto provedené zkoušky získáme obsah skla a plniva (nespalitelná složka).

U vybraných vzorků (V1 – V5) se výše uvedený postup rozšířil o odfiltrování plniva. Následně se vzorky propraly a sušily. Opětovným porovnáním hmotností s původními se vyhodnotil podíl samotného skla ve vzorcích, viz tabulka 54.

Výztužný materiál ovlivňuje vlastnosti konečného produktu. Čím většího podílu usměrněné čisté výztuže je možno technologií RTM docílit, tím lepší mechanické vlastnosti je možno zajistit.

Tab. 54. Vyhodnocení obsahu skla s pryskyřicí
Norpol Dion 850–M850.

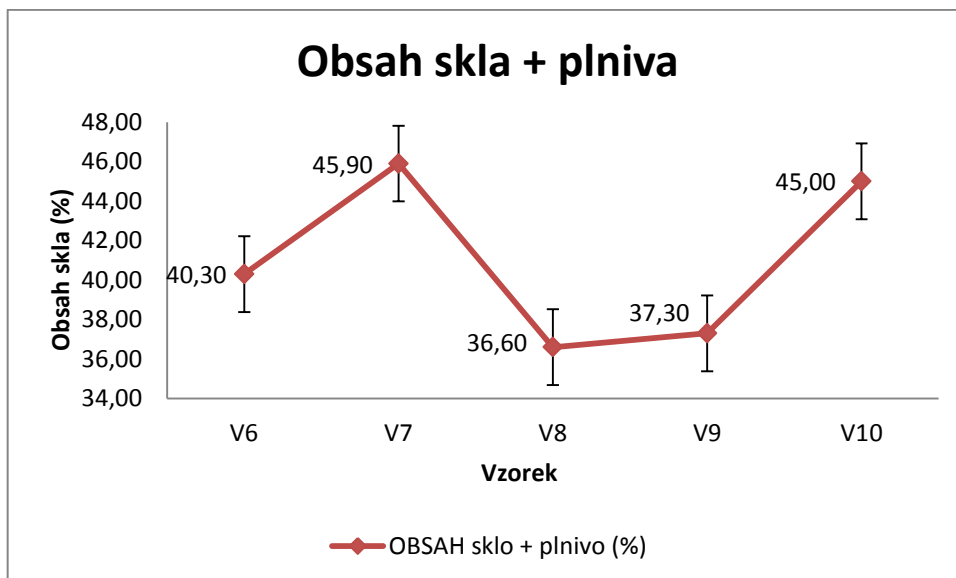
Vzorek	Obsah skla + plniva (%)	Obsah skla (%)
V1	44,29	23,45
V2	47,73	29,34
V3	58,03	43,60
V4	56,28	38,71
V5	46,59	27,96



Obr. 29. Grafické znázornění obsahu skla pro vzorky V1 – V5.

Tab. 55. Vyhodnocení obsahu skla
s vývojovou pryskyřicí.

Vzorek	Obsah skla + plniva (%)
V6	40,30
V7	45,90
V8	36,60
V9	37,30
V10	45,00



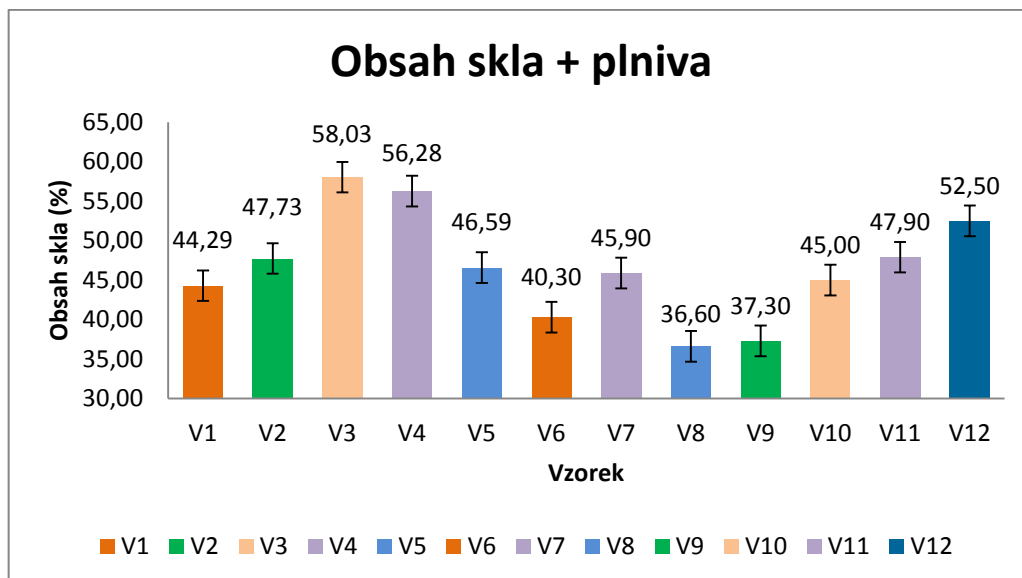
Obr. 30. Grafické znázornění obsahu skla pro vzorky V6 – V10

Tab. 56. Vyhodnocení obsahu skla s vývojovou pryskyřicí, bez gelcoatové vrstvy.

Vzorek	Obsah skla + plniva (%)
V11	47,90
V12	52,50



Obr. 31. Grafické znázornění obsahu skla u vzorků bez gelcoatové vrstvy.



Obr. 32. Grafické porovnání obsahu skla všech vzorků.

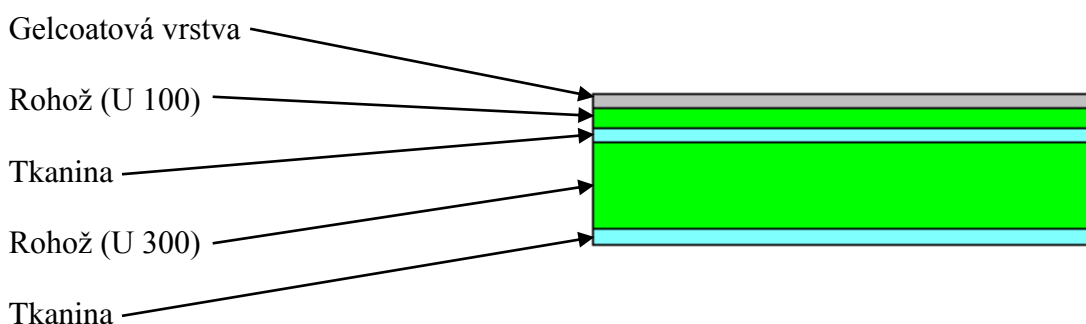
Na obrázku 32 je grafické znázornění obsahu skla i s popelem. Popel zapříčiňuje zkreslení výsledků, jak je patrné z obrázku 29. U komerční pryskyřice o to více, že je středně plněná hydroxidem hlinitým.

Obsah skla se určoval především proto, aby se stanovilo, jakých procent výztužné složky je možno touto technologií, při daných výztužných materiálech, dosáhnout.

6 STUDIUM VLIVU OBSAHU VÝSTUŽE NA POŽÁRNÍ VLASTNOSTI

Proces hoření je sám o sobě velice složitý. V teoretické části byla objasněna problematika hoření a spalovacího cyklu. Při vyhodnocování vlivu výztuže na protipožární vlastnosti se setkáváme s komplexní problematikou, kterou je nutno brát z více úhlů pohledu a zohlednit všechny dostupné informace.

6.1 Shrnutí



Obr. 33. Schéma uložení vrstev výztuže pro vzorky 7, 10 a 11.

Výhoda sklo-výztuže spočívá v několika základních vlastnostech tohoto materiálu. Zprv je to bod tání skla, který se pohybuje okolo 1000 °C. To znamená, že v době kdy dochází k rozkladu matrice, skleněná složka stále odolává. Jelikož sklo snáší dlouhodobě teploty až 450 °C je velká pravděpodobnost, že k rozkladu této složky vůbec nedojde, a tedy nepodpoří proces hoření.

Na protipožární odolnosti se podílejí všechny složky kompozitní desky. Vyžaduje se samozhášivá úprava jak matrice, tak i povrchové vrstvy (gelcoat, popřípadě laky a nátěry). Od výztužné složky se očekává, že bude podporovat již získané vlastnosti.

7 EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ VYBRANÝCH TECHNOLOGIÍ



Vezmeme-li k srovnání technologie lisování, kladení prepregů, RTM, vakuovou infuzi a ruční kladení, tak spojnicí mezi nimi budou výrobní ukazatelé. Vybranými výrobními ukazateli jsou produktivita technologie, náklady na materiál, náklady na zhotovení forem, časová náročnost technologií a sériovost.

Jelikož cílem této práce není návrh a optimalizace konkrétního výrobku, ale zkoumání vlastností v rámci vyvíjené pryskyřice, nebude posuzována pracnost. A to z toho důvodu, že se odvíjí od složitosti jednotlivých výrobků. V rámci získání co nejkorektnějších výsledků se bude vycházet ze zkušeností spolupracující společnosti, která se zabývá především výrobou dílů kolejových vozidel.

7.1 Produktivita

Produktivita je úzce propojena s časovou náročností přípravy formy a ukládání jednotlivých vrstev výztuže popřípadě pomocných materiálů dle postupového plánu. Je zřejmé, že čím kratší doba příprav je před prosycováním pryskyřicí, tím bude i výroba produktivnější. Zásadní vliv na časovou náročnost má složitost výrobku. Proto uvedené pořadí v tab. 57 se u technologie kladení prepregů, ručního laminování a vakuové infuze může v konkrétních případech lišit.


Tab. 57. Srovnání produktivity a časové náročnosti.

	Produktivita (-)	Časová náročnost přípravy formy před laminací (řádově čas)	
+	Lisování SMC	minuty	-
	RTM	10 minut	
	Kladení prepregů	hodiny	
	Ruční laminování	10 minut - hodiny	
-	Vakuová infuze	hodiny	+

7.2 Náklady na materiál

Jelikož se nezaměřuji na optimalizaci výroby, budu se v této části zabývat pouze zhodnocením materiálových nákladů používaných u vybraných technologií. Do úvahy nebudou zařazeny náklady spojené s povrchovými úpravami formy, aplikace gelcoatové vrstvy a ani fixní náklady výroby. Všechny nutné propočty budou vztaženy na 1 m².

Tab. 58. Srovnání nákladů vázaných na materiál.

Náklady vázané na materiál	
+	Kladení prepregů
	RTM
	Vakuová infuze
	Lisování SMC
-	Ruční laminování

Tab. 59. Ceny materiálů platné - duben 2013.

Materiál	cena za jednotku (Kč)	
Fenolický prepreg	225	m ²
Lisovací prepreg	350	m ²
BIDIAGONÁL	75	kg
TRIAXIÁL	60	kg
QUADRIAXIÁL	90	kg
UNIFILO	90	kg
Živice	72	kg
Živice vývojová	110-130	kg
Voština	750	m ²
Voština hliníková	520	m ²
Těsnící páska	12	m
Vakuová folie	8	m ²
Rozváděcí	18	m ²
Separční tkanina	15	m ²

Z vybraných technologií je nejdražší kladení prepregů. Fenolická pryskyřice se uplatňuje v aplikacích s vysokými nároky na protipožární odolnost. Uplatní-li se tato živice při výrobě prepregů, výsledkem je vysoký podíl výstužné složky tedy i výborné mechanické vlastnosti. Protipólem těmto výhodám je cena samotného prepregu.

Vytvoříme-li jednoduchý příklad, kdy propočet budeme vztahovat na jeden m² a tloušťku desky 3 mm, pak pro uvedenou technologii kladení prepregů dostaneme náklady na materiál 2375 Kč, protože prepreg o gramáži 500 g/m² vytvoří po vytvrzení tloušťku 0,3 mm, k realizaci 3 mm potřebujeme 10 vrstev, přičemž cena jedné činí 225 Kč plus náklady na pomocný materiál 124 Kč.

V praxi se spíše setkáváme s produkty, jejichž tloušťka se nepohybuje v milimetrech ale centimetrech. Běžně se vyrábí díly se 3 – 4 vrstvami prepregů, mezi něž se vkládá voština.

Vztáhneme-li opět propočít na 1 m² a 4 vrstvy prepregů a zvolíme voštinu, která nám zajistí konečnou tloušťku výrobku 3 cm. Klesnou náklady na materiál na 1544 Kč. Stejná tloušťka jen z prepregů by se pohybovala v řádu desetitisíců korun.

Tab. 60. Cenové srovnání materiálových nákladů u vybraných technologií.

Technologie	Materiál	Cena celkem za materiál (Kč)	Poznámka
Kladení preregů	prepreg	2375	Spotřeba prepregu je navržena na 3 mm tloušťky výsledné desky. Neuvažuje se povrchová úprava ani nanesení gelcoatové vrstvy. Náklady ještě narostou nutností vytvářet výrobky několik hodin v autoklávu při teplotě okolo 120 °C.
	odtrhovací vrst- va		
	těsnící páska		
	vakuová folie		
	rozdávěcí		
RTM	výztuž	min. 553	V tomto případě byl propočít proveden jak pro komerční, tak pro vývojovou pryskyřici. Konkrétní hodnoty jsou v tabulce, která je součástí příloh. Vyšší ceny se dosahuje při použití vývojové pryskyřice.
	pryskyřice	max. 848	
Vakuová infuze	vakuová folie	514,48	
	rozdávěcí		
	odtrhovací vrst- va		
	výztuž		
	pryskyřice		
Lisování SMC	materiál	350	Průměrná cena.
Ruční kladení	výztuž	306,48	
	pryskyřice		

Pozn. Všechny propočty byly vztaženy na výrobek o ploše 1m^2 . Přičemž předpokládaná tloušťka laminátu je 3 mm. Nejsou uvažovány žádné povrchové úpravy ani nanesení gelcoatové vrstvy.

7.3 Náklady na zhotovení forem

Cena forem se přímo odvíjí od nároků při jejich použití. Některé technologie mají specifické nároky na formu. Například technologie lisování vyžaduje ocelovou dvoudílnou formu, kterou je nutno vyhřívat.

Dutiny forem, pro všechny technologie, musí být leštěny, protože kvalita jejího povrchu se odráží v kvalitě pohledové strany výrobku samého. V následující tabulce 61 je sestupně seskládáno finanční zatížení výroby forem.

Tab. 61. Srovnání finanční náročnosti zhotovování forem.

Náklady na zhotovení forem	
+	Lisování SMC
	RTM
	Kladení prepregů
	Vakuová infuze
-	Ruční laminování

Tab. 62. Vhodnost technologie v závislosti na velikosti série.

Vhodnost technologie v závislosti na velikosti série.	
Technologie	Velikost série (řádově ks)
Lisování SMC	10 000
RTM	100 - 1000
Vakuová infuze	100
Ruční laminování	10
Kladení prepregů	10

7.4 Souhrnné zhodnocení

Ekonomické zhodnocení se nachází v samých základech zavádění nového výrobku. Popřípadě při optimalizaci již zavedené výroby.

Výběr optimální technologie bude závislý na:

- požadovaných vlastnostech konečného výrobku,
- velikosti poptávky (sériovost výrobku),
- velikosti výrobku.

Tyto body jsou pomyslnými základními pilíři, které jsou spolu vzájemně pevně provázány. Mimo jiné jsou přímo ovlivňovány ukazateli uvedenými v této kapitole.

Globálně se bude jednat o postup:

1. Velikost poptávaného množství - bude-li se zavádět výrobek, kde velikost série bude řádově v desítkách, vyloučí se nám tak například technologie lisování, která v návaznosti na návratnost nákladů na formu vyžaduje produkci v desetitisících.
2. Požadované mechanické vlastnosti – z tohoto hlediska se do problematiky promítnou omezující podmínky technologií. Zásadní vliv na mechanické vlastnosti má procento výztužné složky. Navíc se zde projeví zkušenosti technologa.
3. Velikost výrobku – nejnázorněji si problém s velikostí výrobku můžeme představit u technologií, které vyžadují vytvrzení v autoklávu. V tomto případě velikost vyhřívané komory bude rozhodovat o maximálních rozměrech výrobku zhotoveného touto technologií.

Navržení vhodné výrobní technologie se bude vždy nacházet na pomezí jistého kompromisu mezi náklady na výrobu a mechanickými vlastnostmi. Přičemž výsledné vlastnosti laminátu by měly mít větší váhu při konečném rozhodnutí.

ZÁVĚR

Skladby materiálů zkoumané v rámci této diplomové práce jsou navrhovány pro uplatnění především u dílů a karoserií kolejových vozidel, vyráběných technologií RTM.

Z bezpečnostního hlediska jsou kladeny dvě zásadní omezující podmínky. Na jedné straně je pevnostní hledisko na druhé protipožární odolnost.

Jak již bylo zmíněno, francouzská norma vyžaduje, aby materiály vykazovaly pevnost v ohybu minimálně 150 MPa. Tuto skutečnost vezmeme jako omezující podmínku ze strany pevnosti. U vzorků, které tuto podmínku splní, vyhodnotíme protipožární vlastnosti.

Tab. 63. Srovnání vlastností vzorků, které splňují pevnostní podmínku alespoň v jednom směru namáhání.

Vzorek	Orientace vzorku dle tabulky 18.	σ_{fM} (MPa)	LOI (hmot. %)	Vybraná třída požární odolnosti	Obsah skla + plniva (%)
V2	A	106	24,2-24,4	S2	47,73
	B	152			
V3	A	118	24,4-24,6	S2	58,03
	B	177			
V4	A	266	25,5-25,6	S2	56,28
	B	128			

V tabulce 63 jsou vybrané vzorky, které splňují pevnostní podmínku alespoň v jednom směru namáhání. Pro všechny výše uvedené vzorky platí, že jejich matici tvoří komerční pryskyřice.

Charakteristická výztuž těchto vzorků je pro:

- V2 = 1x quadraxiální
- V3 = 2x quadraxiální
- V4 = 2x triaxiální

Nejcitlivějším ukazatelem, který udává představu o protipožárních vlastnostech materiálu, je kyslíkové číslo (LOI). U komerční pryskyřice, dle hodnot LOI, získáváme vlastnosti, které vyhovují menším protipožárním nárokům. Materiály s touto skladbou a vlastnostmi by našly své uplatnění u méně náročných aplikací. Podmínkou je zvolení vhodného směru výztuže vzhledem k namáhání dílu. Výhodou je menší finanční náročnost, která je spjata především s nižší cenou pryskyřice.

Tab. 64. Srovnání vlastností vzorků, která splňují pevnostní podmínku obousměrně.

Vzorek	Orientace vzorku dle tabulky 18.	σ_{fM} (MPa)	LOI (hmot. %)	Vybraná třída požární odolnosti	Obsah skla + plniva (%)
V7	A	398	31,1	S3	45,9
	B	177			
V10	A	184	29,4-30,2	S3	45
	B	218			

Charakteristická výztuž těchto vzorků je:

- V7 = 2x triaxiální
- V10 = 2x quadraxiální

V tabulce 64 jsou uvedeny vzorky, které splňují stanovenou pevnostní podmínku v obou směrech namáhání. Matrice vzorků je vývojová, její předpokládaná cena je vyšší, než u komerční, ale na druhou stranu přináší uspokojivější výsledky. Nejen, že podporuje pevnostní charakteristiky kompozitu, ale navíc posouvá o třídu výš protipožární odolnost.

Ve výše uvedené tabulce jsou zahrnuty pouze vzorky, které mají gelcoatovou vrstvu. V níže uvedené tabulce 65 jsou uvedeny vzorky bez gelcoatové vrstvy.

Vzorky, které nejsou opatřeny gelcoatovou vrstvou vykazují ještě uspokojivější vlastnosti, jak pevnostní, tak i mírné zlepšení vlastností protipožárních. Na druhé straně těchto výhod je skutečnost, že výrobků, u kterých by nebyla požadována alespoň jedna pohledová strana, moc nenajdeme.

Tab. 65. Srovnání vlastností vzorků bez gelcoatové vrstvy, která splňují pevnostní podmínku obousměrně.

Vzorek	Orientace vzorku dle tabulky 18.	σ_{fM} (MPa)	LOI (hmot. %)	Vybraná třída požární odolnosti	Obsah skla + plniva (%)
V11	A	491	32-34	S3	47,9
	B	205			
V12	A	180	33,3	S3	52,5
	B	216			

Charakteristická výztuž těchto vzorků je:

- V11 = 2x triaxiální
- V12 = 2x bidiagonální

Z výsledků měření získáváme povědomí o předpokládaných vlastnostech materiálu a je možno dle požadavků na výrobek, vybrat optimální kombinaci složení.

U aplikací v dopravním průmyslu jsou přesně stanoveny minimální protipožární vlastnosti jednotlivých částí vozidla. Na výběru vhodného složení kompozitu se budou podílet jednak tyto nároky na požární bezpečnost, tak požadované mechanické vlastnosti výrobku.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] EHRENSTEIN, G. W. *Polymerní kompozitní materiály*. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009, 351 s. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [2] JANČÁŘ, J. *Úvod do materiálového inženýrství polymerních kompozitů*. Vyd. 1. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, 2003, 193 s. ISBN 8021424435.
- [3] VOJTĚCH, D. *Materiály a jejich mezní stavy*. Vyd. 1. V Praze: Vysoká škola chemicko-technologická, 2010, 204 s. ISBN 978-80-7080-741-5.
- [4] BAREŠ, R. *Kompozitní materiály*. Vyd. 1. Praha: SNTL, 1988, 325 s.
- [5] KOŘÍNEK, Z. *Kompozity* [online]. [cit. 2013-01-03]. Dostupné z: <http://www.volny.cz/zkorinek/>
- [6] ČESKÝ OBRANNÝ STENDART, *Výběr materiálů pro vojenské použití z hlediska jejich požárních vlastností*. Vyd. 1. Úřad pro obranu a standartizaci, katalogizaci a státní ověřování jakosti. 2007, 50 s., [online]. Dostupné z: <http://www.oos.army.cz/>
- [7] MÜNSTER, L. *Modifikace hořlavosti polymerních materiálů a hodnocení efektivnosti těchto modifikací*, 2011, 57 s. Bakalářská práce (Bc.). Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta technologická, Ústav inženýrství polymerů, 2011-06-01.
- [8] MOURITZ, A. P. a A. GIBSON. *Fire properties of polymer composite materials*. Dordrecht: Springer, c2006, xii, 394 s. ISBN 978-1-4020-5355-9.
- [9] ALTIMA BOHEMIA. [online] Dostupné z: www.altimabohemia.cz
- [10] VRBA, J. *Mechanika kompozitů*, Vysoké učení technické v Brně, 2008, 94 s. [online]. Dostupné z: http://www.vutbr.cz/www_base/priloha.php?dpid=52474
- [11] SOJKA, J.; VÁŇOVÁ, P. *Základy progresivních konstrukčních materiálů*. VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2010, 194 s. ISBN 978-80-248-2578-6.
- [12] RC COMPANY. [online] Dostupné z: www.rccompany.com
- [13] AERO VODOCHODY. [online] Dostupné z: www.aero.cz

- [14] ČSN ISO 4589-2. *Plasty – Stanovení hořlavosti metodou kyslíkového čísla, Část 2: Zkouška při teplotě okolí*. Praha: Český normalizační institut, 1998.
- [15] ČSN EN ISO 1172. *Textilní sklo – Vyztužené prepregy (předimpregnované lamináty) lisovací směsi a lamináty – Stanovení obsahu textilního skla a minerálního plniva – Kalcinační metoda*. Praha: Český normalizační institut, 1999.
- [16] ČSN EN ISO 178. *Plasty – Stanovení ohybových vlastností*. Praha: Česká normalizační institut, 2011
- [17] ČSN EN 60695 – 8 – 1. *Zkoušení požárního nebezpečí – Část 8 – 1: Uvolněné teplo – Všeobecný návod*. Praha: Český normalizační institut, 2009.
- [18] ČSN EN ISO 5659 – 1. *Plasty – Vývoj dýmu – Část 1: Stanovení optické hustoty – návod*. Praha: Český normalizační institut, 2000.
- [19] ČSN EN ISO 13943. *Požární bezpečnost – Slovník*. Praha: Český normalizační institut, 2011
- [20] FORM s. r. o., Horní Lideč, *Versuchsmethode für das Festlegen der Feuerreaktion von festen nichtthermoplastischen Werkstoffen, [Experimentální metoda pro stanovení reakce na oheň pro materiály, které nejsou z termoplastů.]* 2013, s. 8.
- [21] KUČERŤÍK, J. *Termická analýza – dynamická mechanická analýza (DMA)*. [online], 2011-02-16, [cit. 2013-04-23]. Dostupné z WWW: <http://www.chempoint.cz/kucerik-3>
- [22] NF F 01-281. *French standard, Railway rolling stock, Fibre reinforced thermosetting plastics*. 1989, s. 24.
- [23] ZAJÍČKOVÁ, M. *Zhodnocení metod pro stanovení obsahu skla v PVB recyklátu*. Zlín, 2011, 74s. Diplomová práce (Ing.). Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta technologická, Ústav inženýrství polymerů, 2011-06-08.
- [24] GURIT, Zürich. *Guide to Composites*, 2013, 73 s.
- [25] CHOMARAT, Le Cheylard. *SOLUTIONS FOR CLOSED MOLDING*, 2010, 8 s.

- [26] SAERTEX, Brochterbecker Damm, *Success with individual solutions*. 2012, 24 s.
- [27] KUČEŘÍK, J. *Termická analýza – Diferenční kompenzační kalorimetrie (DSC)*. [online], 2011-02-15, [cit. 2013-04-23]. Dostupné z WWW: <http://www.chempoint.cz/kucerik-2>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

cm	Centimetry
E	Modul pružnosti
FST	Fire, Smoke, Toxicity - protipožární vlastnosti
H·	Vodíkový radikál
HM	Vysokomodulární uhlíková vlákna
HT	Vysokopevnostní uhlíková vlákna
m_c	Hmotnost kompozitu
m_f	Hmotnost vláken
mm	Milimetr
m_m	Hmotnost matrice
MPa	Megapascal
Nmm	Newton milimetr
RTM	Resin transfer moulding - nízkotlaké vstřikování
S_c	Celková plocha průřezu kolmého na směr výztuže
S_f	Plocha, kterou zaujímají vlákna v řezu kolmém na směr výztuže
S_m	Plocha průřezu maticí
tex	Jemnost příze (km/g)
V_c	Objem kompozitu
v_f	Objemový podíl vláken
V_f	Objem vláken v objemu kompozitu
V_m	Objem matrice
w_f	Hmotnostní podíl vláken
σ_{fM}	Napětí při mezi pevnosti
ε_{fM}	Poměrné prodloužení při mezi pevnosti

μm

Mikrometr

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1. Příklad použití kompozitních materiálů v praxi; a) Závodní kajak [12],	14
Obr. 2. Silové poměry v příčném řezu dlouhovláknového kompozitu	16
Obr. 3. Nenasyčená polyesterová pryskyřice [1]	19
Obr. 4. Epoxidová pryskyřice	20
Obr. 5. Vinylesterová pryskyřice	21
Obr. 6. Příklady výztužných systémů a) neusměrněná krátká vlákna, b) usměrněná krátká vlákna, c) rohož, d) jednosměrné	22
Obr. 7. Vazby tkanin: a) plátňová vazba, b) keprová vazba, c) atlasová vazba.	23
Obr. 8. Multiaxiální tkaniny	24
Obr. 9. Schéma výroby skleněných vláken	25
Obr. 10. Výchozí surovina aromatický polyamid	27
Obr. 11. Schéma technologie RTM	30
Obr. 12. Spalovací cyklus	33
Obr. 13. Jednotlivé zóny ohně.	34
Obr. 14. Schéma znázorňující postup degradace přes tloušťku termosetického laminátu.	35
Obr. 15. Schéma bobtnajícího procesu [7]	39
Obr. 16. Výroba vzorků technologií RTM. A – příprava spodní části formy na nástřík gelcoatové vrstvy, B – nástřík gelcoatové vrstvy, C – gelcoatová vrstva, D – utěsnění.....	49
Obr. 17. Rozvržení vzorků. A – pro lamináty vyztužené triaxiální a quadraxiální	51
Obr. 18. Orientace odebraných vzorků vůči osnově	51
Obr. 19. Schéma měřicího zařízení. A – fotografie, B – schéma z normy ČSN EN ISO 178.....	52
Obr. 20. Pevnostní ohybové vlastnosti vzorků s pryskyřicí Norpol Dion 850-M850.	61
Obr. 21. Pevnostní ohybové vlastnosti vzorků s vývojovou pryskyřicí.	61
Obr. 22. Pevnostní ohybové vlastnosti vývojové pryskyřice srovnávacích vzorků bez gelcoatové vrstvy.....	63
Obr. 23. Vzorek 4. Použitá pryskyřice Norpol Dion 850 – M850, výztužný materiál – dvě vrstvy triaxiální tkaniny	64
Obr. 24. Vzorek 7. Použitá vývojová pryskyřice, výztužný materiál – dvě vrstvy triaxiální tkaniny.....	64

Obr. 25. Vzorek 11. Použitá vývojová pryskyřice, výztužný materiál – dvě vrstvy triaxiální tkaniny. Vzorek je bez gelcoatové vrstvy.	65
Obr. 26. Grafické znázornění požárem poškozené plochy dle posuzovacích kritérií.....	70
Obr. 27. Naměřené časy uhašení vzorku po etanolovém plamenu.	71
Obr. 28. Grafické vyjádření trendu kyslíkového čísla.	73
Obr. 29. Grafické znázornění obsahu skla pro vzorky V1 – V5.....	74
Obr. 30. Grafické znázornění obsahu skla pro vzorky V6 – V10.....	75
Obr. 31. Grafické znázornění obsahu skla u vzorků bez gelcoatové vrstvy.	75
Obr. 32. Grafické porovnání obsahu skla všech vzorků.	76
Obr. 33. Schéma uložení vrstev výztuže pro vzorky 7, 10 a 11.	77

SEZNAM TABULEK

Tab. 1. Vlastnosti skleněných vláken.	26
Tab. 2. Porovnání vysokopevnostních a vysokomodulárních vláken.....	26
Tab. 3. Porovnání vlastností	27
Tab. 4. Vlastnosti přírodních vláken.....	27
Tab. 5. Příklad některých technologií dělených podle podobného znaku technologie výroby.....	29
Tab. 6. Složení vzorků s isoftalovou nenasycenou polyesterovou maticí.	46
Tab. 7. Návrh pěti vzorků s vývojovou maticí.	47
Tab. 8. Návrh srovnávacích vzorků bez gelcoatové vrstvy.	48
Tab. 9. Naměřené hodnoty ohybu vzorku 1 (orientace A).	53
Tab. 10. Naměřené hodnoty ohybu vzorku 1 (orientace C).....	53
Tab. 11. Naměřené hodnoty ohybu vzorku 2 (orientace A).	53
Tab. 12. Naměřené hodnoty ohybu vzorku 2 (orientace B).....	54
Tab. 13. Naměřené hodnoty ohybu vzorku 3 (orientace A).	54
Tab. 14. Naměřené hodnoty ohybu vzorku 3 (orientace B).....	54
Tab. 15. Naměřené hodnoty ohybu vzorku 4 (orientace A).	55
Tab. 16. Naměřené hodnoty ohybu vzorku 4 (orientace B).....	55
Tab. 17. Naměřené hodnoty ohybu vzorku 5 (orientace A).	55
Tab. 18. Naměřené hodnoty ohybu vzorku 5 (orientace B).....	56
Tab. 19. Naměřené hodnoty ohybu vzorku 6 (orientace A).	56
Tab. 20. Naměřené hodnoty ohybu vzorku 6 (orientace C).....	56
Tab. 21. Naměřené hodnoty ohybu vzorku 7 (orientace A).	57
Tab. 22. Naměřené hodnoty ohybu vzorku 7 (orientace B).....	57
Tab. 23. Naměřené hodnoty ohybu vzorku 8 (orientace A).	57
Tab. 24. Naměřené hodnoty ohybu vzorku 8 (orientace B).....	58
Tab. 25. Naměřené hodnoty ohybu vzorku 9 (orientace A).	58
Tab. 26. Naměřené hodnoty ohybu vzorku 9 (orientace B).....	58
Tab. 27. Naměřené hodnoty ohybu vzorku 10 (orientace A).	59
Tab. 28. Naměřené hodnoty ohybu vzorku 10 (orientace B).....	59
Tab. 29. Naměřené hodnoty ohybu vzorku 11. (orientace A).	59
Tab. 30. Naměřené hodnoty ohybu vzorku 11 (orientace B).....	60
Tab. 31. Naměřené hodnoty ohybu vzorku 12 (orientace A).	60

Tab. 32. Naměřené hodnoty ohybu vzorku 12 (orientace B).....	60
Tab. 33. Výpis z materiálového listu S32EY470-00910-01270-464000.....	62
Tab. 34. Výpis z materiálového listu V104876-00820-01270-000000	62
Tab. 35. Naměřené ohořelé plochy vzorků s matricí Norpol Dion 850 - M850.....	66
Tab. 36. Naměřené ohořelé plochy vzorků s vývojovou matricí.....	66
Tab. 37. Naměřené ohořelé plochy vzorků s vývojovou pryskyřicí, bez gelcoatové vrstvy.....	66
Tab. 38. Kritéria vyhodnocení protipožární odolnosti.....	67
Tab. 39. Vyhodnocení protipožární odolnosti vzorku 1.	67
Tab. 40. Vyhodnocení protipožární odolnosti vzorku 2.	67
Tab. 41. Vyhodnocení protipožární odolnosti vzorku 3.	68
Tab. 42. Vyhodnocení protipožární odolnosti vzorku 4.	68
Tab. 43. Vyhodnocení protipožární odolnosti vzorku 5.	68
Tab. 44. Vyhodnocení protipožární odolnosti vzorku 6.	68
Tab. 45. Vyhodnocení protipožární odolnosti vzorku 7.	69
Tab. 46. Vyhodnocení protipožární odolnosti vzorku 8.	69
Tab. 47. Vyhodnocení protipožární odolnosti vzorku 9.	69
Tab. 48. Vyhodnocení protipožární odolnosti vzorku 10.	69
Tab. 49. Vyhodnocení protipožární odolnosti vzorku 11.	70
Tab. 50. Vyhodnocení protipožární odolnosti vzorku 12.	70
Tab. 51. Normy a značení tříd.	72
Tab. 52. Třídění dle německé normy 4102.....	72
Tab. 53. Dle hodnot LOI zařazení do bezpečnostních tříd v různých zemích.....	72
Tab. 54. Vyhodnocení obsahu skla s pryskyřicí Norpol Dion 850–M850.	74
Tab. 55. Vyhodnocení obsahu skla s vývojovou pryskyřicí.	74
Tab. 56. Vyhodnocení obsahu skla s vývojovou pryskyřicí, bez gelcoatové vrstvy.	75
Tab. 57. Srovnání produktivity a časové náročnosti.....	78
Tab. 58. Srovnání nákladů vázaných na materiál.	79
Tab. 59. Ceny materiálů platné - duben 2013.....	79
Tab. 60. Cenové srovnání materiálových nákladů u vybraných technologií.	80
Tab. 61. Srovnání finanční náročnosti zhotovování forem.....	81
Tab. 62. Vhodnost technologie v závislosti na velikosti série.....	81

Tab. 63. Srovnání vlastností vzorků, které splňují pevnostní podmínku alespoň v jednom směru namáhání.....	83
Tab. 64. Srovnání vlastností vzorků, která splňují pevnostní podmínku obousměrně.	84
Tab. 65. Srovnání vlastností vzorků bez gelcoatové vrstvy, která splňují pevnostní podmínku obousměrně.	84

SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha č. 1: Materiálový list gelcoatu.
- Příloha č. 2: Materiálový list komerční pryskyřice.
- Příloha č. 3: Materiálový list rohože UNIFILO.
- Příloha č. 4: Materiálový list triaxiální tkaniny.
- Příloha č. 5: Materiálový list bidiagonální tkaniny.
- Příloha č. 6: Materiálový list quadraxiální tkaniny.
- Příloha č. 7: Dostupné informace k vývojové pryskyřici.
- Příloha č. 8: Tabulka materiálových nákladů.

PŘÍLOHA P I: MATERIÁLOVÝ LIST GELCOATU.



BÜFA-FIRESTOP S 250-V

Výrobce: BÜFA GELCOAT PLUS GmbH , Spolková republika Německo

Charakteristika : Samozhášivý gelcoat na bázi speciální směsi elastifikovaných polyesterů isoftalového typu, pro ruční nanášení.
Gelcoat je předurčený; obsažený systém aditiv zajišťuje samozhášivost a nízký vývin kouře v případě požáru.
Doporučená tloušťka gelcoatové vrstvy 400-600 μm .

Gelcoat je prostý halogenovaných sloučenin, neobsahuje ani žádné sloučeniny na bázi fosforu a dusíku.

Oblast použití: BÜFA-FIRESTOP S 250-V je určen ke zhotovení povrchů dílců především v dopravě (díly aut, vozidel hromadné přepravy, lodí), obkladové stavební panely apod.
Gelcoat je obvykle používán ve spojení s pryskyřicí BÜFA-FIRESTOP 8175-W-1.
Takto zhotovené dílce vyhovují požárně-technickým bezpečnostním nárokům, kladeným například na vozidla hromadné přepravy osob a interiéry budov.

Posouzení dle DIN 5510 díl 2:

Třída hořlavosti:	S 4
Třída vývinu kouře:	SR 2
Třída odkapávání:	ST 2

Výsledky posouzení dle dalších norem:

BS 476 díl 6 a 7:	Třída 2
NF F 16-101:	F 0
NF P 92-501:	M 2

(Atest Spolkového institutu pro kolejová vozidla)

Vlastnosti v dodávaném stavu:

Vlastnost	Zkušební předpis	Hodnota
Hustota při 20 °C	DIN 53 217/2	1,25-1,35g/cm ³
Viskozita Brookfield D II Sp 5 rpm 5 při 20 °C - pro štětec		30000-40000 mPa.s
Obsah styrenu		22-25 %
Bod vzplanutí	DIN 53 213	27 °C
Skladovatelnost (uzavřené originální obaly, 20 °C)		3 měsíce

Vytvrzovací charakteristika: dle DIN 16 945 6.2.2.1

100 g BÜFA-FIRESTOP S 250-V + 2 ml PEROXAN ME 50 L

Želatinační doba	10 - 15 minut
Vytvrzovací doba	25 - 30 minut
T _{max}	90 - 120 °C

Vlastnosti ve vytvrzeném stavu:

Vlastnost	Zkušební předpis	Hodnota
Pevnost v tahu	DIN 53 455	52 MPa
E modul v tahu	DIN 53 455	2400 MPa
Protažení do přetržení	DIN 53 455	8,2 %
Tvarová stálost za tepla	ISO 75/A	57 °C

Iniciační systém: PEROXAN ME 50 L 2%

Odstíny: BÜFA-FIRESTOP S 250-V je dodáván v odstínech dle RAL

Poznámka: K dosažení optimálních vlastností gel-coatové vrstvy lze hotové dílce dotvrdit po dobu 6 hodin při teplotě 60 °C.

Skladování

Gelcoat uchovávejte v uzavřených nádobách, chráněných před světlem a teplem. Chraňte před přímým slunečním zářením.

Při správném skladování v rozmezí teplot + 5 až + 25°C je gelcoat použitelný nejméně 3 měsíce od data expedice.

Bezpečnost a ochrana zdraví při práci, hygiena:

Nenasycený polyester je hořlavinou II. třídy nebezpečnosti. Pracoviště musí být označeno výstražnou tabulkou „*Nebezpečí požáru*“ a vybaveno hasícími přístroji (sníh, pěna). Dále musí být zabezpečeno účinné větrání.

Na pracovišti musí být prostředky první pomoci.

Při práci s pryskyřicí a jakoukoli manipulací je nutno používat osobní ochranné pomůcky, tj. ochranný pracovní oděv, nepropustné rukavice, čepice, ochranné brýle nebo štít. Při nedostatečném větrání je třeba použít ochrannou masku s filtrem zachycujícím organické páry a plyny (styren). Na pracovišti je zakázáno jíst, pít, kouřit a používat otevřený oheň.

Důležité zásady hygieny:

- 1) Pracovní oděv a osobní ochranné pomůcky musí být udržovány v čistotě. Nefunkční a poškozené pomůcky je třeba vyměnit.
- 2) Po práci je nutno omýt obličej, ruce a nechráněné části těla. Totéž je nutno provést před jídlem, pitím, zapálením cigarety jakož i před použitím toalety.
- 3) Pokud došlo k potřísnění pokožky, je třeba pryskyřici odstranit, postižená místa omýt mýdlem a vodou, potřísnit regeneračním krémem.

První pomoc:

- 1) Zasažení oka
 - vyplachovat oko proudem čisté vlažné vody 15 minut
 - vyhledat lékařskou pomoc
 - v žádném případě nepoužívat k ošetření oka masti !
- 2) Potřísnění pokožky
 - odstraňte znečištěný oděv
 - pokožku důkladně omyjte mýdlem a tekoucí vodou
 - ošetřete regeneračním krémem
 - při větším rozsahu potřísnění vyhledejte lékaře
- 3) Nadýchání
 - vyveďte postiženého na čerstvý vzduch
 - postižený se nesmí fyzicky namáhat
 - při příznacích otravy vyhledejte lékaře

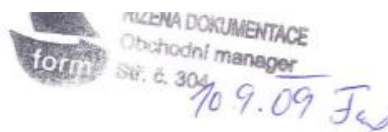
4) Požití

- vypláchněte ústa velkým množstvím vody
- vypijte větší množství vlažné vody a vyvolejte zvracení
- vyhledejte lékařskou pomoc

Výše uvedené údaje se opírají o naše současné znalosti a zkušenosti, neosvobozují však zpracovatele vzhledem k množství možných vlivů při zpracování od provádění vlastních zkoušek a pokusů.

Právně závazné ujištění o určitých vlastnostech anebo vhodnosti pro konkrétní účel použití nelze z těchto údajů vyvodit. Povinnosti, resp. práva vyplývající z používání tohoto materiálu zajišťuje uživatel v rámci vlastní odpovědnosti.

PŘÍLOHA P II. MATERIÁLOVÝ LIST KOMERČNÍ MATRICE.



REICHOLD

PRODUCT BULLETIN

10. leden 2005

Technický list

DION® FR 850-M850

Nehořlavá polyesterová pryskyřice
pro ruční laminaci a stříkání

POPIS

DION® FR 850-M850 je isoftálová nenasyčená polyesterová pryskyřice.

DION® FR 850-M850 je pryskyřice obsahující hydroxid hlinitý pro potlačení hořlavosti.

DION® FR 850-M850 neobsahuje žádné halogeny.

DION® FR 850-M850 obsahuje urychlovač a thixotropní přísady.

DION® FR 850-M850 je zvláště vhodný pro výrobky, kde je požadována min. kouřivost spolu s ostatními parametry hořlavosti.

DION® FR 850-M850 obsahuje spec. přísady potlačující odpar styrenu do pracovního prostředí. Pryskyřice obsahuje parafin, který zaručuje nelepivost povrchu laminátu po vytvrzení.

Prodloužená doba skladování nebo nevhodné podmínky skladování mohou způsobit sedimentaci plniva, proto je nutné před aplikací dokonale rozmíchat.

APLIKACE

DION® FR 850-M850 je vhodná pro ruční laminaci, laminaci stříkáním a další strojní aplikace.

CHARAKTERISTIKA

VÝHODY

- Retardace hoření pomocí hydroxidu hlinitého
- Neobsahuje halogenové prvky
- Všestrannost
- Výroba a kontrola kvality dle ISO 9001

- Snižuje vznik dýmu při hoření
- Možno použít i na místech citlivých na korozi
- Vhodná pro ruční kladení a stříkání
- Stabilní kvalita všech šarží

The information herein is general information designed to assist customers in determining whether our products are suitable for their applications. Our products are intended for sale to industrial and commercial customers. We require customers to inspect and test our products before use and to satisfy themselves as to contents and suitability for their specific applications. 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 any protection from any law or patent to be inferred. All patent rights are reserved. The exclusive remedy for all proven claims is limited to 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 CZ s.r.o., Veleslavínova 3, 400 11 Ústí nad Labem, Czech Republic, Tel. +420-47-270 7777, Fax +420-47-270 7710.

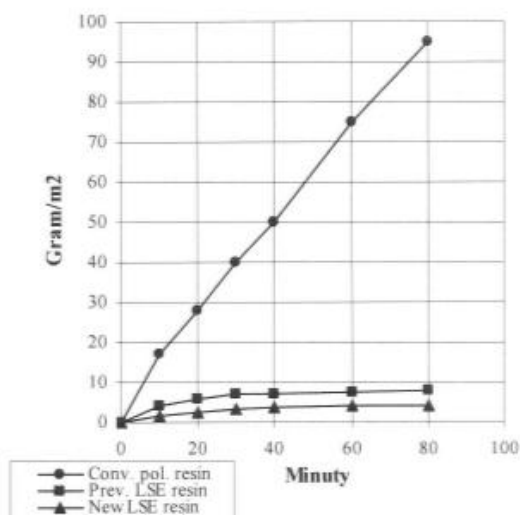
DION® FR 850-M850
10. leden 2005
Str. 1/4

Pokud laminace probíhá v několika stupních s různým vytvrzením několika vrstev, musí být každá operace ukončena normálním poměrem pryskyřice/skleněná výtlač. Pokud jsou na vytvrzeném laminát místa s přebytkem pryskyřice, musí být před další laminací obroušena. Pokud na povrchu laminátu je zachován normální poměr pryskyřice/sklo musí další laminace pokračovat max. po 48 hodinách, chceme-li se vyhnout obroušení povrchu. (dle Det norske Veritas)
 Další prodleva mezi laminováním, nebo nevhodné podmínky mohou způsobit dílčí separaci vrstev.

ZLEPŠENÍ PRACOVNÍHO PROSTŘEDÍ

Diagram byl získán laboratorním měřením a proto neodpovídá zcela situaci ve výrobě. Jak ale ukázala praxe, lze dosáhnout značného zlepšení pracovního prostředí záměnou běžné pryskyřice za pryskyřici POLILYTE LSE (se sníženou emisí styrenu)

EMISE STYRENU



The information herein is general information designed to assist customers in determining whether our products are suitable for their applications. Our products are intended for sale to industrial and commercial customers. We require customers to inspect and test our products before use and to satisfy themselves as to contents and suitability for their specific applications. 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 any protection from any law or patent to be inferred. All patent rights are reserved. The exclusive remedy for all proven claims is limited to replacement of our materials and in no event shall we be liable for special, incidental or consequential damages.

VLASTNOSTI
FYZIKÁLNÍ VLASTNOSTI PŘI 23°C

Vlastnost	Jednotka	Hodnota	Metoda
Viskosita - Brookfield LVF 2/12 - Kužel & deska	mPa s(cP) mPa s(cP)	1400 – 1800 350 – 400	ASTM D 2196-86 ISO 2884-1999
Obsah netěkavých látek	% hm.	69 ± 2	B070
Obsah organických rozpouštědel	kg/kg pryskyřice	31 ± 2	
Obsah celkového org. uhlíku	kg/kg pryskyřice	0,37	
Obsah netěkavých látek v obj. %	% obj.	40	
Bod vzplanutí	°C	34	ASTM D 3278-95
Geltime: 1% NORPOL PEROXIDE 1 (MEKP)	minuty	40 – 50	G020
Reaktivita při 25°C: 1% NORPOL PEROXIDE 1			DIN 16945
-25 - 35°C	minuty		
-25 – max. teplota	minuty		
Max. teplota	°C		
Skladovatelnost od data výroby	měsíců	6	-

MECHANICKÉ VLASTNOSTI VE VYTVRZENÉM STAVU

Plně dotvrzeno

Vlastnosti	Jednotka	Hodnota	Hodnota (rohož)	Hodnota (rohož)	Metoda
Obsah skla	%	-	25 – 30	30 – 35	
Pevnost v tahu	MPa	55	100	120	ISO 527-1/2-1993
E-modul v tahu	MPa	6500	9200	11500	ISO 527-1/2-1993
Protážení při přetržení	%	1,2	2,4	2,3	ISO 527-1/2-1993
Pevnost v ohybu	MPa	90	160	200	ISO 178-2001
E-modul v ohybu	MPa	6200	9000	9700	ISO 178-2001
Rázová houževnatost, P4J	mJ/mm ²	7,5	80	90	ISO 179-2001

The information herein is general information designed to assist customers in determining whether our products are suitable for their applications. Our products are intended for sale to industrial and commercial customers. We require customers to inspect and test our products before use and to satisfy themselves as to contents and suitability for their specific applications. 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 any protection from any law or patent to be inferred. All patent rights are reserved. The exclusive remedy for all proven claims is limited to 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 CZ s.r.o., Veleslavínova 3, 400 11 Ústí nad Labem, Czech Republic, Tel. +420-47-270 7777, Fax +420-47-270 7710.

DION® FR 850-M850
10. leden 2005
Str. 3/4

Tvarová stálost za tepla	°C	83	-	-	ISO 75-1/2-1993
Tvrdość die Barcola	934-1	50	50 – 55	50 – 55	ASTM D 2583-87
Kyslíkový index (OI)	%	25	25	-	ASTM D 2863
Test AEB	mm	10	10	-	ASTM D 635-74
Test ATB	sec	80	60	-	ASTM D 635-74
Šíření plamene po povrchu		Class 2	Class 2	-	BS 476 part 7

SKLADOVÁNÍ

Aby se zajistila maximální stabilita a uchovaly optimální vlastnosti, mají být pryskyřice skladovány v uzavřených nádobách při teplotách pod 24°C a mimo dosah zdrojů tepla a přímého slunečního záření. Před aplikací musí být pryskyřice vyhřáta nejméně na 18°C, aby se zajistilo správné vytvrzení a manipulace. Skladovací prostory a nádoby musí být v souladu s místními požárními a stavebními předpisy. Obalové materiály, které se používají pro skladování polyesterových pryskyřic nesmí obsahovat měď a její slitiny. Skladovat odděleně od oxidujících materiálů, peroxidů a solí kovů. Sudy musí být skladovány mimo jakýchkoli zdrojů plamene nebo hoření. Skladované množství je nutno udržovat na rozumné míře.

BALENÍ

Nevrátne 220 kg kovové sudy. Kontejnery IBC 1000 kg. Automobilové cisterny

BEZPEČNOST
PŘED PRVNÍM POUŽITÍM TOHOTO VÝROBKU JE NUTNÉ SE PEČLIVĚ SEZNÁMIT S BEZPEČNOSTNÍM LISTEM

Vše je uvedeno v Bezpečnostním listě, se kterým je nutno se před prvním použitím výrobku seznámit. Bezpečnostní list je nutno obdržet před první dodávkou zboží od dodavatele.

Výrobky POLYLITE, NORPOL, DION, HYDREX, jsou klasifikovány a označeny jako **Xn – Zdraví škodlivý**.

POZNÁMKA

Údaje o vlastnostech výrobku a jeho zpracování byly získány laboratorním měřením a aplikačními zkouškami. Tento prospekt však může jen právně nezávazně poradit, zpracování výrobku je nutno přizpůsobit konkrétním podmínkám

The information herein is general information designed to assist customers in determining whether our products are suitable for their applications. Our products are intended for sale to industrial and commercial customers. We require customers to inspect and test our products before use and to satisfy themselves as to contents and suitability for their specific applications. 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 any protection from any law or patent to be inferred. All patent rights are reserved. The exclusive remedy for all proven claims is limited to 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 CZ s.r.o., Veleslavínova 3, 400 11 Ústí nad Labem, Czech Republic, Tel. +420-47-270 7777, Fax +420-47-270 7710.

DION® FR 850-M850
10. leden 2005
Str. 4/4

PŘÍLOHA P III. MATERIÁLOVÝ LIST ROHOŽE UNIFILO.



OCV™ Reinforcements

PRODUCT INFORMATION

Unifilo® for Closed Molds

U614, U801, U809, U812, U813, U814, U816, U817, U822, U850, U852, U854

PRODUCT DESCRIPTION

Unifilo® is an Advantex® glass continuous filament mat consisting of randomly oriented strands in multiple layers held together with a suitable binder and with a silane coupling agent. The Advantex® glass fiber combines the electrical and mechanical properties of traditional E-glass with the acid corrosion resistance of E-CR glass.

- U801 can be used for:
 - parts produced by foaming polyurethane, at low density
 - complex parts molded at low pressure
- U809 is especially suited for Polyurethane foam reinforcement and widely used in LNG carrier thermal insulation
- U614, U812, U813, U814, U816, U817, U822, can be used for:
 - parts molded by RTM, L-RTM, infusion or wet compression with UP, VE, EP and PU resins
 - gypsum parts with improved fire resistance and mechanical properties
- U850, U852, U854 are suited especially for molding with highly filled resins. Super performances met by infusion thanks to the core in 50 tex.



© Istock 2009

PRODUCT REFERENCE

Example : U850 450 – 138

- U : Continuous strand mat (Unifilo®)
- 850 : Product classification code
- 450 : Nominal weight per unit area (g/m²)
- 138 : Roll width (cm)

FEATURES AND PRODUCT BENEFITS

- | | |
|--|--|
| • U614(*): closed molds mat | • Easy unrolling, cutting and handling |
| • U801: low binder content | • Good adaptability to complex shapes |
| • U809: very low binder content | • Even dispersion in PU matrix during foam expansion |
| • U812 to U822: rising binder content and rigidity | • Easy unrolling, cutting and handling |
| • U850, U852, U854: core made with higher strand tex | • Outstanding resin flow |

(*) Advantex® glass / Available only for NA Market

TECHNICAL CHARACTERISTICS (NOMINAL VALUES)

REF.	SIZING	BINDER TYPE	SOLUBILITY IN STYRENE	LINEAR WEIGHT OF BASIC STRANDS (TEX)	LOSS ON IGNITION (%)	MOISTURE CONTENT (%)
				Iso 1889	Iso 1887	Iso 3344
U614	Silane	Polyester	Low	36	4.5	< 0.15
U801				25	1.6	< 0.15
U812				25	2.2	< 0.15
U822				25	2.0	< 0.15
U813				25	3.5	< 0.15
U814				25	4	< 0.15
U816				25	6	< 0.15
U850				25/50/25	6	< 0.15
U852				25/50/25	2.5	< 0.15
U854				25/50/25	4	< 0.15
U809				25	0.9	< 0.15
U817				25	7	< 0.15

Unifilo® for Closed Molds

U614, U801, U809, U812, U813, U814, U816, U817, U822, U850, U852, U854

VISUAL CHARACTERISTICS OR POSSIBLE DEFECTS

Type A: coarse strands
 Type B: cluster of glass fiber
 Type C: water spots
 Type D: binder spots, dirt and foreign matters (diameter below 30 mm)
 Type E: hole
 Maximum number of defects allowed: each 100 lm Unifilo® roll section may contain at most 5 of the above listed defects.

PRODUCT AVAILABILITY

Available widths from 50 to 300 cm

ROLL WIDTH (cm)	STANDARD WEIGHTS (g/m ²)	DIAMETER (cm)	APPROXIMATE DIMENSIONS OF FULL* ROLL, 100 CM WIDE <full roll>: a roll having a guaranteed length of at least 90% of the value indicated above.									
			Nominal length (m)									
			U801	U812 U822	U813 U814	U816 U817	U850	U854	U852	U859	U854	
100	100	55			600							
	150				360							
	22.5		235	250	250	260	270	250	260			
	30.0		190	200	205	210	220	205	210			
	45.0		125	130	135	140	135	135	140			
	60.0		80	85	90	90	100	90	95			
	90.0		65	70	75	75	85	75	75			
			Nominal weight (kg)									
100	100	55			60							
	150				54							
	22.5		52	57	57	59	61	57	59			
	30.0		57	60	62	63	66	62	63			
	45.0		56	59	61	63	70	61	63	56		
	60.0		48	51	54	57	63	54	57	51		
	90.0		59	63	78	68	77	78	68			

PACKAGING

- Each roll of Unifilo® is wound up onto a cardboard tube of 0.7 kg/m with 103 mm internal diameter, then individually wrapped with a transparent protective film.
- Pallet type:
 - Rolls ≤ 205 cm width: standard pallet (vertical rolls 14 x 114cm)
 - Rolls > 205 cm width: wooden crate (horizontal rolls).
- Pallet protection:
 - Standard pallet = shrink-wrapped (cardboard base and cover)
 - Wooden crate = each roll packaged in a polyethylene bag.

LABELING

- Each roll carries an information label with product reference.
- Each pallet carries also an information label with: product reference, gross and net weights, the number of rolls on the pallet and their net weight.

STORAGE

Unifilo® mat must be stored in its original packaging in a place with no humidity and heat. The best conditions are temperatures between 15 and 35°C and a relative humidity level between 35 and 85%. If the product is stored at lower temperature (below 15°C), we recommend to condition it inside the workshop for at least 24 hours prior using, to prevent condensation.

On site stacking of pallets is possible on (1/1) only. Please use a plywood plank between the two pallets to avoid damage the lower pallet.

Contact

Unifilo.ocvamericas@owenscorning.com

Unifilo.ocvemea@owenscorning.com

Unifilo.ocvap@owenscorning.com



OCV™ Reinforcements

**OWENS CORNING
 COMPOSITE MATERIALS, LLC**
 ONE OWENS CORNING PARKWAY
 TOLEDO, OHIO 43659
 1.800.GET.PINK™
 www.owenscorning.com
 www.ocvreinforcements.com

**EUROPEAN OWENS CORNING
 FIBERGLAS, SPRL.**
 166, CHAUSSEE DE LA HULPE
 B-1170 BRUSSELS
 BELGIUM
 +32.2.674.82.11

**OWENS CORNING - OCV ASIA PACIFIC
 SHANGHAI REGIONAL HEADQUARTERS**
 2F OLIVE LVO. MANSION
 620 HUA SHAN ROAD
 SHANGHAI 200040
 CHINA
 +86.21.62489922

This information and data contained herein is offered solely as a guide in the selection of a reinforcement. The information contained in this publication is based on actual laboratory data and field test experience. We believe this information to be reliable, but do not guarantee its applicability to the user's process or assume any responsibility or liability arising out of its use or performance. The user agrees to be responsible for thoroughly testing any application to determine its suitability before committing to production. It is important for the user to determine the properties of its own commercial compounds when using this or any other reinforcement. Because of numerous factors affecting results, we make no warranty of any kind, express or implied, including those of merchantability and fitness for a particular purpose. Statements in this publication shall not be construed as representations or warranties or as inducements to infringe any patent or violate any law safety code or insurance regulation.

Pub. No. 10010967-B. Owens Corning reserves the right to modify this document without prior notice. ©2009 Owens Corning.
 Unifilo_U800_vv_06-2008_Rev4

PŘÍLOHA P IV. MATERIÁLOVÝ LIST TRIAXIÁLNÍ TKANINY.



SAERTEX® GmbH & Co. KG
 Brochterbecker Damm 52
 D-48369 Saerbeck
 phone: +49 (0) 2574 902-0
 fax: +49 (0) 2574 902-209
 e-mail: info@saertex.com

DATASHEET

(acc. to EN 13473-1)

STYLE NO.

S32EY470-00910-01270-464000

DESCRIPTION OF STYLE TRIAXIAL-GLASS-FABRIC

Z ↑	CONSTRUCTION	AREAL-WEIGHT [g/m ²]	TOLERANCE [+/--%]	MATERIAL	LINEAR DENSITY tex	X / Y →
	<i>upper side</i>					
	0°	425	5	E-Glass	1200	
	+45°	243	5	E-Glass	300	
	-45°	243	5	E-Glass	300	
<i>lower side</i>						
	STITCHING:	6	5	PES 76 dtex		

BINDER: Tricot-Warp

GAUGES: 5

WIDTH: 1270

mm or in tapes

TOTAL AREAL WEIGHT: 917

g/m²

TOTAL TOLERANCE: 5,0 %

18.07.2011 PK

Rev. 07/2011

PŘÍLOHA P V. MATERIÁLOVÝ LIST BIDIAGONÁLNÍ TKANINY.



SAERTEX® GmbH & Co. KG

Brochterbecker Damm 52

D-48369 Saerbeck

phone: ++49/2574/902-0

fax: ++49/2574/902-209

e-mail: info@saertex.com

DATASHEET

STYLE NO.

S32EX010-00980-01270-283000

DESCRIPTION OF STYLE

BIDIAGONAL-GLASS-FABRIC

CONSTRUCTION	AREAL-WEIGHT [g/m ²]	TOLERANCE [+/--%]	MATERIAL	LINEAR DENSITY tex
-45°	476	5	E-Glass	900
90°	29	5	E-Glass	300
+45°	476	5	E-Glass	900
STITCHING:	6	5	PES 76 dtex	

BINDER: Warp

GAUGES: 5

WIDTH: 1270

mm or in tapes

TOTAL AREAL WEIGHT: 988

g/m²

TOTAL TOLERANCE: 5,0

%

Threads of stabilization in 0° (E-Glass 34tex)

PŘÍLOHA P VI. MATERIÁLOVÝ LIST QUADRAXIÁLNÍ TKANINY.



SAERTEX® GmbH & Co. KG
 Brochterbecker Damm 52
 D-48369 Saerbeck
 phone: +49 (0) 2574 902-0
 fax: +49 (0) 2574 902-209
 e-mail: info@saertex.com

DATASHEET

(acc. to EN 13473-1)

SAMPLE NO.

V104876-00820-01270-000000

DESCRIPTION OF SAMPLE QUADRAXIAL-GLASS-FABRIC

CONSTRUCTION	AREAL-WEIGHT [g/m ²]	TOLERANCE [+/- %]	MATERIAL	LINEAR DENSITY tex
<i>upper side</i>				
0°	213	5	E-Glass	600
+45°	200	5	E-Glass	300
90°	201	5	E-Glass	300
-45°	200	5	E-Glass	300
<i>lower side</i>				

STITCHING:	6	5	PES 76 dtex
------------	---	---	-------------

BINDER: Tricot-Warp

GAUGES: 5

WIDTH: 1270

mm or in tapes

TOTAL AREAL WEIGHT: 820

g/m²

TOTAL TOLERANCE: 5,0

%

11.08.2011 JT

Rev. 07/2011

PŘÍLOHA P VII. DOSTUPNÉ INFORMACE K VÝVOJOVÉ PRYSKYŘICI

Vývojový pryskyřice matrice pro kompozitní systémy se sníženou hořlavostí. Číslo projektu FR – T13433

- polyesterový systém se zabudovaným retardérem hoření

Fyzikální vlastnosti pryskyřice FR 4/12 PLP 2

	FR 4/12 PLP 2
Vlastnosti PES	
Číslo kyselosti (mg KOH.g-1)	82,5
Hydroxilové číslo (mg KOH.g-1)	-
Mw (g.mol-1)	1600
Mn (g.mol-1)	600
Rozrok ve styrenu	
Číslo kyselosti (mg KOH.g-1)	6,41
Hydroxilové číslo (mg KOH.g-1)	50,63
Mw (g.mol-1)	17000
Mn (g.mol-1)	1900
epoxidový index (mol.kg-1)	0
Sušina (%)	51,3
Viskozita Brookfield LV 3/12, 20	800
Kyslíkové číslo	27,5

Čistá pryskyřice vs. pryskyřice s aditivem.

Směs	LOI (%)
FR 4/12 PLP	31,7
FR 4/12 PLP 70 %; 30 % ATH	26,4
FR 4/12 PLP 70 %; 30 % MgO	21,5
FR 4/12 PLP R2	29,0
FR 4/12 R2, 30% FR CROS 489	32,2

Porovnání iniciačního systému Geltime vs. reaktivita.

Iniciační systém		Geltime	Reaktivita	
MEKP	Fe	RT (min)	Tmax(°C)	Čas (min)
1%	0,20%	37	104	140
1%	0,50%	18	170	35
2%	0,20%	29	172	39
2%	0,50%	11	190	20
1%	0,09% V	36	98	53

PŘÍLOHA P VIII: TABULKA MATERIÁLOVÝCH NÁKLADŮ

	Materiál	cena za jednotku	Přepočten vý- ztuže na 1 m2 (Kč)	spotřeba	jednotky	cena	cena celkem		poznámka
Kladení preregů	prepreg	225 Kč/m2	-	10 ks	ks	2250	2374		Spotřeba prepregu je navržena na 3 mm tloušťky výsledné desky. Neuvažuje se povrchová úprava ani nanesení gelcoatové vrstvy. Náklady ještě narostou nutností vytvrzovat výrobky několik hodin v autoklávu při teplotě okolo 120 °C.
	odtrhávací vrstva	15 Kč/m2	-	2 m2	m2	30			
	těsnící páska	12 Kč/m	-	5 m	m2	60			
	vakuová folie	8 Kč/m2	-	2 m2	m2	16			
	rozdávěcí	18 Kč/m2	.	1 m2	m2	18			
RTM	výztuž	BD 75 Kč/kg	69,16	3	ks	207,48	594,5	834,5	Propočty jsou provedeny pro všechny tři druhy multiaxální výztuže. Červeně jsou označeny výpočty s komerční pryskyřicí, modře s vývojovou pryskyřicí.
		TR 60 Kč/kg	55,05	3	ks	165,15	552,2	792,2	
		QD 90 Kč/kg	73,8	3	ks	221,4	608,4	848,4	
		Unifilo 90 Kč/kg	27	1	ks	27			
	pryskyřice	komerční 72 Kč/kg	-	5	kg	360			
		vývojová 120 Kč/kg	-	5	kg	600			
Vakuová infuze	vakuová folie	8 Kč/m2	-	2	m2	16	514,48		
	rozdávěcí	18 Kč/m2	-	1	m2	18			
	odrhová vrstva	15 Kč/m2	-	2	m2	30			
	výztuž	Unifilo 90 Kč/kg	27	1	kg	27			
		BD 75 Kč/kg	69,16	3	kg	207,48			
	pryskyřice	72 Kč/kg	-	3	kg	216			
Lisování	materiál	cca 350 Kč/m2	-	1	ks	350	350		

Ruční kladení	výztuž	Unifilo 90 Kč/kg	27	1	ks	27	306,48	
		BD 75 Kč/kg	69,16	3	ks	207,48		
	pryskyřice	72 Kč/kg	-	1	kg	72		