

# **Mechanické a fyzikální vlastnosti kompozitů na bázi akrylátových vysoce plněných matic**

Bc. Ladislav Zapletal

---

Diplomová práce  
2012

 Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická

---

**Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně**

**Fakulta technologická**

**Ústav výrobního inženýrství**

**akademický rok: 2011/2012**

## **ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE**

**(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)**

**Jméno a příjmení: Bc. Ladislav ZAPLETAL**

**Osobní číslo: T10545**

**Studijní program: N 3909 Procesní inženýrství**

**Studijní obor: Výrobní inženýrství**

**Téma práce: Mechanické a fyzikální vlastnosti kompozitů na bázi akrylátových vysoceplněných matric**

**Zásady pro vypracování:**

- 1. Kompozitní materiály, jejich rozdělení a vlastnosti.**
- 2. Přehled polymerních matric.**
- 3. Plniva a jejich vliv na vlastnosti kompozitních materiálů.**
- 4. Experimentální studium vybraných vlastností plněných akrylátových matric.**
- 5. Vyhodnocení výsledků a závěr.**

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

- [1] JANČÁŘ, J.: Úvod do materiálového inženýrství kompozitu, Brno, 1999.
- [2] DAŘOUREK, K.: Kompozitní materiály – modely a vlastnosti. TU v Liberci, 2005
- [3] KOŘÍNEK, Z.: Kompozity. dostupné na: [www.volny.cz/korinek](http://www.volny.cz/korinek)
- [4] EHRENSTEIN, G. W.: Polymérní kompozitní materiály. Scientia Praha, 2009
- [5] BAREŠ, R. A.: Kompozitní materiály. SNTL Praha, 1988.
- [6] HULL, D.: An Introduction to composite materials, Cambridge, 1990.
- [7] REINHART, T. J.: Engineered materials handbook. Composites. Vol. 1., ASM INTERNATIONAL, 1987.

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

Ústav výrobního inženýrství

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

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

Ve Zlíně dne 2. února 2012

  
doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.  
*děkan*



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

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby <sup>1)</sup>;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3 <sup>2)</sup>;
- beru na vědomí, že podle § 60 <sup>3)</sup> odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 <sup>3)</sup> odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Ve Zlíně .....

.....

---

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

(1) Vysoká škola nevýdělečně zveřejňuje disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce, u kterých proběhla obhajoba, včetně posudků oponentů a výsledku obhajoby prostřednictvím databáze kvalifikačních prací, kterou spravuje. Způsob zveřejnění stanoví vnitřní předpis vysoké školy.

(2) Disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce odevzdané uchazečem k obhajobě musí být též nejméně pět pracovních dnů před konáním obhajoby zveřejněny k nahlázení veřejnosti v místě určeném vnitřním předpisem vysoké školy nebo není-li tak určeno, v místě pracoviště vysoké školy, kde se má konat obhajoba práce. Každý si může ze zveřejněné práce pořizovat na své náklady výpisy, opisy nebo rozmnoženiny.

(3) Platí, že odevzdáním práce autor souhlasí se zveřejněním své práce podle tohoto zákona, bez ohledu na výsledek obhajoby.

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

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

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

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

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

(3) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení jsou oprávněny požadovat, aby jim autor školního díla z výdělku jím dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence podle odstavce 2 přiměřeně přispěl na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložily, a to podle okolností až do jejich skutečné výše; přitom se přihlídně k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

## **ABSTRAKT**

Diplomová práce se zabývá vlivem různého plnění matrice kompozitů na mechanické a fyzikální vlastnosti. Práce obsahuje úvod do problematiky kompozitních materiálů, rozdělení jednotlivých komponentů kompozitů a jednotlivé technologie výroby kompozitních materiálů.

Praktická část je zaměřena na mechanické a fyzikální zkoušky, mechanické zkoušky tahové a ohybové, kdy byly použity kompozity s 25 hm. %, 50 hm. %, 75 hm. % a 100 hm. % plněním a na fyzikální zkoušku viskozity dle Brookfielda a stanovení hořlavosti metodou kyslíkového čísla.

Klíčová slova: kompozitní materiál, matrice, vlákno, mechanické, fyzikální

## **ABSTRACT**

This thesis examines the influence of various performance matrix on the mechanical and physical properties. The work includes introduction to composite materials, the distribution of individual components and various composites manufacturing technology of composite materials.

The practical part is focused on mechanical and physical tests, mechanical tensile and bending tests, which were used in composites with 25%, 50%, 75% a 100% performance and on physical examination Brookfield viscosity and determination of burning behaviour by oxygen index.

Keywords: composite material, matrix, fibre, mechanical, physical

## PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji vedoucímu diplomové práce paní Doc. Ing. Soňi Rusnákové, Ph.D. za odborné vedení, jak při teoretické, tak i při experimentální části, rady, konzultace a připomínky, které mi pomohly při zpracování mé diplomové práce. Dále mé poděkování patří i všem ostatním, kteří mi při vypracování mé práce pomohli.

### Motto

„Překážky jsou ony obávané věci, které spatříte,  
když odvrátíte pohled od svého cíle.“

*Henry Ford*

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

Ve Zlíně .....

.....

Bc. Ladislav Zapletal

# OBSAH

<b>ÚVOD</b> .....	<b>11</b>
<b>I TEORETICKÁ ČÁST</b> .....	<b>12</b>
<b>1 KOMPOZITNÍ MATERIÁL</b> .....	<b>13</b>
1.1 ROZDĚLENÍ KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ.....	13
1.1.1 Částicové kompozity.....	14
1.1.2 Vláknové kompozity.....	15
1.2 MATRICE .....	15
1.2.1 Polymerní matrice .....	16
1.2.1.1 Nenasycené polyestery.....	16
1.2.1.2 Vinylesterové pryskyřice.....	17
1.2.1.3 Houževnaté epoxidové pryskyřice.....	17
1.2.1.4 Epoxidové pryskyřice.....	18
1.3 VÝZTUHY.....	18
1.3.1 Forma výztuží.....	19
1.3.2 Skleněná vlákna .....	20
1.3.3 Uhlíková vlákna.....	21
1.3.4 Polymerní vlákna.....	21
1.3.5 Přírodní vlákna z rostlin .....	22
<b>2 TECHNOLOGIE VÝROBY KOMPOZITŮ</b> .....	<b>24</b>
2.1 RUČNÍ KLADENÍ .....	24
2.2 METODA VAKUOVÉHO VAKU .....	25
2.3 METODA TLAKOVÉHO VAKU .....	26
2.4 VYTVRZOVÁNÍ V AUTOKLÁVU .....	26
2.5 NAVÍJENÍ .....	27
2.6 METODA NANÁŠENÍ KOMPOZITU DO FORMY SPREJEM.....	28
2.7 METODA LISOVÁNÍ SE VSTRÍKEM MATRICE (RTM).....	29
2.8 METODA LISOVÁNÍ VE FORMĚ.....	30
2.9 LISOVÁNÍ Z PREPREGŮ.....	31
2.10 TAŽENÍ KOMPOZITNÍCH PROFILŮ (PULTRUZE).....	31
2.11 KONTINUÁLNÍ LAMINACE FRC .....	32
2.12 ODSTŘEDIVÉ LITÍ FRC.....	33
<b>3 VYUŽITÍ KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ</b> .....	<b>35</b>
3.1 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY V LETECTVÍ.....	35
3.2 POZEMNÍ DOPRAVA .....	35
3.2.1 Automobilový průmysl.....	35
3.2.2 Lodní doprava.....	36



3.3	FARMACEUTICKÉ APLIKACE.....	37
3.4	ENERGETIKA .....	37
3.5	SPORTOVNÍ POTŘEBY.....	38
3.6	ARMÁDA.....	38
3.6.1	Neprůstřelné vesty .....	39
3.6.2	Přilby .....	40
3.7	STAVEBNICTVÍ .....	40
<b>4</b>	<b>MECHANICKÉ VLASTNOSTI KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ A JEJICH ZKOUŠENÍ.....</b>	<b>42</b>
4.1	MECHANICKÉ VLASTNOSTI .....	42
4.1.1	Tuhost (modul pružnosti).....	42
4.1.2	Pevnost.....	42
4.1.3	Tvrdost.....	42
4.1.4	Houževnatost.....	42
4.2	TAHOVÁ ZKOUŠKA .....	43
4.3	OHYBOVÁ ZKOUŠKA.....	45
<b>5</b>	<b>FYZIKÁLNÍ ZKOUŠENÍ KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ .....</b>	<b>47</b>
5.1	HOŘENÍ.....	47
5.1.1	Retardéry hoření .....	47
5.1.1.1	Retardéry hoření na bázi hydroxidů kovů alkalických zemin .....	48
5.1.1.2	Retardéry hoření na bázi sloučenin bromu (BFR).....	49
5.1.1.3	Retardéry hoření na bázi fosforu.....	49
5.1.2	Metody zkoušení hořlavosti .....	50
5.1.2.1	Metoda stanovení kyslíkového čísla „LOI“ (ČSN ISO 4589-2).....	50
5.1.3	Testovací metoda UL 94 (Metodika americké organizace Underwriters Laboratories) .....	51
5.1.3.1	UL 94 V vertikální uspořádání zkoušky.....	51
5.1.3.2	UL 94 HB horizontální uspořádání zkoušky .....	51
5.2	VISKOZITA .....	52
5.2.1	Doba gelace .....	53
<b>II</b>	<b>PRAKTICKÁ ČÁST.....</b>	<b>55</b>
<b>6</b>	<b>CÍL DIPLOMOVÉ PRÁCE.....</b>	<b>56</b>
<b>7</b>	<b>VÝROBA ZKUŠEBNÍCH TĚLES.....</b>	<b>57</b>
7.1	VÝROBA ZKUŠEBNÍCH TĚLES PRO TAHOVOU A OHYBOVOU ZKOUŠKU .....	57
<b>8</b>	<b>POUŽITÉ MATERIÁLY.....</b>	<b>59</b>
8.1	RETARDÉR HOŘENÍ ATH (HYDROXID HLINITÝ).....	59
8.1.1	Obecný popis retardéru ATH .....	59
8.1.2	Popis retardéru ATH (Hydroxid hlinitý) .....	59
8.1.3	Pryskyřice NORESTER 880 .....	60
8.1.4	Unifilo .....	61
8.1.5	Multiaxiální tkanina Saertex 988 g/m <sup>2</sup> .....	61

8.1.6	Redukovadlo viskozity BYK 966 .....	61
<b>9</b>	<b>POPIS A TECHNICKÉ PARAMETRY POUŽITÝCH ZAŘÍZENÍ .....</b>	<b>62</b>
9.1	ZKUŠEBNÍ STROJ ZWICK .....	62
<b>10</b>	<b>VÝSLEDKY PROVEDENÝCH ZKOUŠEK .....</b>	<b>64</b>
10.1	ZKOUŠKA TAHEM .....	64
10.1.1	Stanovení tahových vlastností vzorků s 25 hm. % plněním.....	64
10.1.2	Stanovení tahových vlastností vzorků s 50 hm. % plněním.....	65
10.1.3	Stanovení tahových vlastností vzorků se 75 hm. % plněním.....	66
10.1.4	Stanovení tahových vlastností vzorků se 100 hm. % plněním.....	67
10.2	ZKOUŠKA OHYBEM.....	70
10.2.1	Stanovení ohybových vlastností vzorků s 25 hm. % plněním.....	70
10.2.2	Stanovení ohybových vlastností vzorků s 50 hm. % plněním.....	71
10.2.3	Stanovení ohybových vlastností vzorků se 75 hm. % plněním .....	72
10.2.4	Stanovení ohybových vlastností vzorku se 100 hm. % plněním .....	73
10.3	ZKOUŠENÍ HOŘLAVOSTI.....	76
10.3.1	Metoda stanovení kyslíkového čísla „LOI“ (ČSN ISO 4589-2).....	76
10.4	STANOVENÍ VISKOZITY NA PŘÍSTROJI BROOKFIELD LFV.....	79
10.4.1	Stanovení viskozity bez přísady redukovadla viskozity .....	81
10.4.2	Stanovení viskozity s přísadou redukovadla viskozity .....	81
<b>11</b>	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>83</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....</b>	<b>89</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....</b>	<b>91</b>
	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ.....</b>	<b>93</b>
	<b>SEZNAM TABULEK .....</b>	<b>95</b>
	<b>SEZNAM PŘÍLOH .....</b>	<b>96</b>

## ÚVOD

Kompozitem je nazýván materiál, ve kterém jsou specifickým způsobem kombinovány dva nebo více komponenty o výrazně se lišících fyzikálních a chemických vlastnostech. Kompozity mohou být typu kov-kov, keramika-kov, keramika-polymer, keramika-keramika a polymer-polymer. Největšího průmyslového rozšíření dosáhly ve světě kompozity na bázi organických pryskyřic vyztužených různými typy keramických/anorganických vláken. Hlavním důvodem tohoto stavu je energetická nenáročnost jejich výroby ve srovnání s kovovými či keramickými kompozity a tradičními materiály (ocel, cement) a nízké teploty finálního zpracování (80-180°C). Nejvýznamnější předností kompozitů s organickými matricemi je synergická kombinace snadné tvarovatelnosti nepevné pryskyřice s pevností a tuhostí vyztužujících vláken. Polymerní kompozity nabízejí nízkou měrnou hmotnost, vysokou pevnost při statickém i dynamickém namáhání a vynikající odolnost vůči působení korozivních prostředí. Při použití skleněných či organických výztuží mají kompozitní materiály i vynikající izolační vlastnosti (tepelné, elektrické) a prakticky nulový útlum elektromagnetického záření. [2]

Kromě vzpomínaných vlastností je další důležitá vlastnost reakce na hoření, ve všeobecnosti existují způsoby jako zvýšit odolnost kompozitů vůči hoření, nejběžnější způsoby jsou vhodné kombinace výztuží a speciálních plniv. Vzhledem k poměrně široké škále dostupných materiálů na trhu je nutné sledovat tyto materiály a nacházet nejvhodnější kombinace materiálového složení, technologie výroby a konkrétní aplikace kompozitního výrobku se sníženou hořlavostí. Proto se tato diplomová práce zabývá testováním systému polymerní matrice, vyztužujících složek materiálu a speciálního plniva. Hodnotí se vybrané mechanické a fyzikální vlastnosti.

Vybraná materiálová kombinace je vhodná pro výrobu kompozitu uzavřenou technologií RTM. Touto prací bylo v záměru přispět k zlepšení poznatků nebo k vývoji produktivnějších technologií, na rozdíl s dosud využívanými technologiemi ručního kladení.

## **I. TEORETICKÁ ČÁST**

## 1 KOMPOZITNÍ MATERIÁL

Kompozit je název pro heterogenní materiál složený nejméně ze dvou různých materiálových složek, jehož vlastnosti nedosahuje nejen žádná složka kompozitu samostatně, ale mnohdy ani vlastností, které by se daly předpokládat prostým součtem vlastností těchto složek. Působení pevných a tuhých vláken s poddajnou nebo křehkou kovovou, polymerní nebo keramickou maticí umožňuje konstruovat kompozity s vysokou pevností, tuhostí a houževnatostí, jejichž vlastnosti přesahují vše, co bylo kdy dosaženo u tradičních monolitních seriálů. Bez existence kompozitů by byl další technický pokrok ve všech oborech, zejména v leteckém, kosmickém a automobilním průmyslu nemyslitelný.

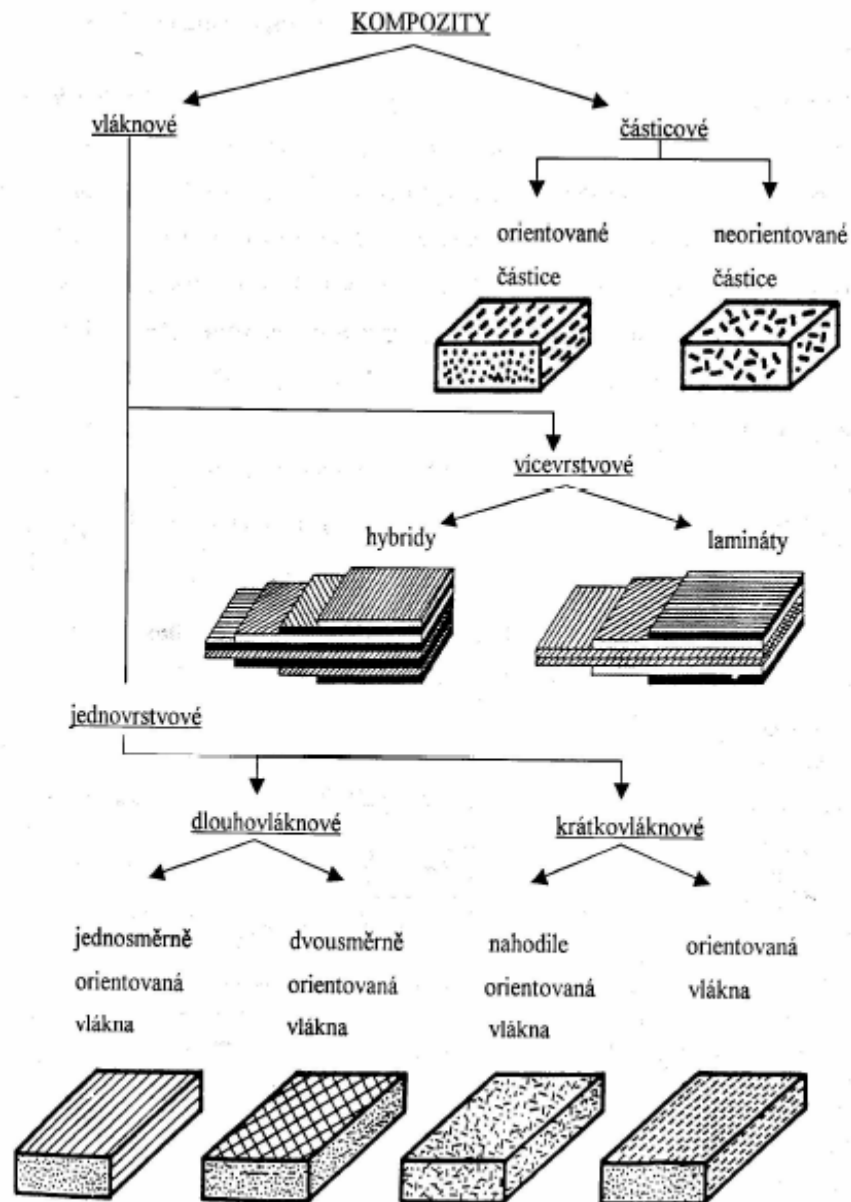
Za kompozity nelze považovat plasty, které obsahují malá množství příměsí, dodaných při výrobě plastů z ekonomických důvodů nebo z důvodů usnadnění výroby, pokud tyto příměsi podstatně neovlivňují mechanické, fyzikální, chemické nebo další vlastnosti těchto plastů.

Další významnou vlastností kompozitu je výrazné makroskopické rozhraní mezi jednotlivými složkami, které kompozit tvoří, a které se u kompozitů nazývají fáze. Základní materiálovou složkou (fází) kompozitu je matrice, v které je uložena výztuž, která rozhodujícím způsobem zvyšuje především mechanické nebo fyzikální parametry kompozitu. Kompozity mohou mít matici polymerní, kovovou nebo keramickou. Mezi keramiku se v dnešní době zařazuje i sklo, sklokeramika, grafit a beton. [3, 8]

### 1.1 Rozdělení kompozitních materiálů

Většina dosud vyvinutých kompozitních materiálů je vyráběna pro zlepšení mechanických vlastností, jako je pevnost, tuhost, tažnost a vysokoteplotní odolnost. Kompozity vyztužené

částicemi se nazývají částicové kompozity. Kompozity vyztužené vlákny se pak pochopitelně nazývají vláknové kompozity. [3]



Obr. 1 Schéma rozdělení kompozitů [10]

### 1.1.1 Částicové kompozity

Částice nejsou při zlepšování lomové odolnosti kompozitu příliš účinné, avšak částice kaučukovité povahy zlepšují v křehkých polymerních maticích odolnost lomu. Částice se rov-

něž podílejí na přenosu namáhání, ale v mnohem menším rozsahu než vlákna ve vláknových kompozitech, ležící ve směru zatížení. Částice jsou tedy účinné při zlepšování tuhosti kompozitu, ale nenabízejí možnost podstatného zvýšení tahové pevnosti. Např. tvrdé částice, umístěné v křehkých maticích, redukují pevnost v důsledku koncentrací napětí v přilehlém maticovém materiálu. Částicová plniva jsou však široce využívána k zlepšení vlastností maticových materiálů, např. pro úpravu tepelné a elektrické vodivosti, zlepšení chování při zvýšených teplotách, k redukci tření, zvýšení odolnosti vůči opotřebení a otěru, pro zlepšení obrobitelnosti, zvýšení povrchové tvrdosti a k redukci smrštění. V mnoha případech jsou používány pouze ke snížení nákladů. Mnoho komerčně důležitých elastomerů je plněno černými sazemí nebo křemennou moučkou pro zlepšení jejich pevnosti a snížení obrusu, přičemž si podržují potřebnou roztažnost. [11]

### 1.1.2 Vláknové kompozity

Vláknové kompozity rozdělujeme podle způsobu uložení vláken na materiály s uspořádaným systémem výztuže kontinuálních vláken (dlouhá vlákna) a s náhodně uloženými diskontinuálními vlákny (krátká vlákna). Kompozit s uspořádaným systémem výztuže má anizotropní vlastnosti, které jsou dané způsobem uložení vláken. Při nahodilém uložení vláken, kdy se předpokládá, že je počet vláken ve všech směrech přibližně stejný, se považuje takový materiál za izotropní nebo za pseudoizotropní. Vlákna rozdělujeme podle charakteru na kovová, skleněná, uhlíková, polymerní a whiskery [11].

## 1.2 Matrice

Matrice je spojitá složka, která zastává funkci pojiva výztuže a chrání většinou křehká vlákna. Polymerní matrice jsou výrazně poddajnější než vlákna, pevnost v tahu je u všech matic menší než pevnost v tahu vláken. Pokud by tomu tak nebylo, nesplňoval by materiál podmínku kompozitu, kterou je zlepšení vlastností obou složek. Matrice jsou polymerní, kovové a keramické. Volba matrice je velmi důležitá pro výsledné vlastnosti materiálu. Úkolem matrice je zaručení geometrického tvaru, zavedení a přenos sil, ochrana vláken (přenos namáhání na vlákna, převedení namáhání z vlákna na vlákno, zajištění geometrické polohy vláken a tvarové stálosti výrobku, ochrana vlákna před vlivy okolí. [5]

### 1.2.1 Polymerní matrice

Pro kompozity s kontinuálními vlákny jsou nejpoužívanější matrice polymerní, buď reaktoplastické nebo termoplastické. Nejpoužívanější matrice jsou nenasycené polyestery (UP), vinylestery (VE) a epoxidy (EP) a z termoplastů polypropylen (PP) a polyamidy (PA). Reaktoplasty a aromatické termoplasty s vysokou teplotou tvarové stálosti se vzhledem k své ceně používají především ve vojenském průmyslu (například spodní kompozitní díly tryskových letadel s kolmým startem musí mít matici s vysokou tepelnou odolností), případně pro výrobu špičkových zařízení (družice, raketoplány, střely s plochou dráhou letu a pod).

Směsi pro hromadnou výrobu dílů lisováním a pryskyřice pro injektážní a infuzní technologie mají specifické nároky na kinetiku vytvrzovacích procesů reaktoplastů (co nejrychlejší reakce, nízká viskozita). Snaha zkrátit dobu vytvrzování a zároveň odstranit z výrobního procesu zdravotně závadné těkavé látky vede k používání i dražších typů reaktoplastů na bázi uretanů (hybridní uretanové pryskyřice, tzv. akrylamaty). Snaha o recyklovatelnost materiálu kompozitních dílů vyráběných ve velkých sériích (automobilový průmysl) vede k nahrazování reaktoplastů termoplasty. Většinou se uplatňují levnější typy termoplastů (polypropyleny a polyamidy), vyztužené krátkými skleněnými vlákny. Lze je zpracovávat vstříkovaním na běžných vstřikovacích strojích. Také při vysokých nárocích na chemickou odolnost nebo houževnatost kompozitu jsou reaktoplasty nahrazovány termoplasty. Z termoplastů vyztužených vlákny lze vyrobit desky, které lze tvarovat za tepla. Skladovatelnost polotovarů je oproti polotovarům s nevytvrzeným reaktoplastem neomezená. Stejně výhody mají i prepregy s termoplastickým pojivem. V hromadné dopravě osob a ve stavebnictví zvětšené nároky na bezpečnost si vynucují používání nehořlavých matric s malým vývinem netoxického kouře. Těmto podmínkám vyhovují především levné fenolické pryskyřice. Nehořlavé aromatické termoplasty nacházejí uplatnění i v konstrukci letadel (vnitřní obklady, prvky interiéru), přestože jejich cena je značně vysoká. [3, 5, 7]

#### **Vybrané druhy nejpoužívanějších polymerních matric:**

##### *1.2.1.1 Nenasycené polyestery*

Nenasycené polyestery patří k nejpoužívanějším pryskyřicím. Nemodifikované nenasycené polyesterové pryskyřice mají velké smrštění při vytvrzování a to až 8%, jsou křehké a snad-



no v nich vznikají mikrotrhlínky. Elektrické vlastnosti jako je nevodivost a hodnota relativní permitivity mají dobré, stejně jako odolnost proti ultrafialovému záření. Pryskyřice z nenasycených polyesterů dobře smáčejí vlákna, ale pevnost vazby mezi matricí a vlákny je menší než u epoxidových pryskyřic. Pro dosažení menšího smrštění při vytvrzování a kvalitnějšího povrchu je nutno použít směsi pryskyřice s plnivý nebo práškovými termoplasty, ovšem tyto přísady mají za následek také snižování tekutosti, a proto se jich používá jen ve směsích určených pro lisování. Ideální vlastnosti pro středně sériovou až hromadnou výrobu mají pryskyřice bez těkavých složek, dodávané v podobě pasty nebo tuhé látky, s krátkým časem vytvrzování (do 5 minut), které za teploty vytvrzování mají zpočátku menší viskozitu a nevyžadují tedy při lisování velké tlaky. [5]

#### ***1.2.1.2 Vinylesterové pryskyřice***

Jsou to nenasycené estery epoxidových pryskyřic. Vyrábějí se buď z bisfenolu anebo jako novolakové vinylesterové pryskyřice. Obsahují reaktivní rozpouštědlo (obvykle styren). Kompozity s vinylesterovými pryskyřicemi mají větší mezilaminární smykovou pevnost a větší houževnatost než kompozity s nenasycenými polyestery. Oproti nenasyceným polyesterům má pryskyřice lepší odolnost proti korozi, vyšší teplotu skelného přechodu, vyšší cenu, pomalejší reakci při vytvrzování. [5]

#### ***1.2.1.3 Houževnaté epoxidové pryskyřice***

Jednofázové vytvrzené epoxidové pryskyřice mají malou lomovou houževnatost a tudíž malou odolnost proti vzniku a šíření trhlin. Zvýšení lomové houževnatosti lze dosáhnout více způsoby, například přidáním reaktivních tekutých kaučuků, speciálně modifikovaných inženýrských termoplastů, reaktivních rozpouštědel, neorganických částic, dvoufázových „coreshell“ nanokuliček. Inženýrské termoplasty zase musí být speciálně modifikované pro zvýšení soudržnosti s epoxidovou matricí, jinak se houževnatost pryskyřice naopak může ještě zmenšit. Tzv. „core-shell“ kuličky jsou kuličky o průměru 50-500  $\eta$  m, které mají zesíťované elastomerní jádro pokryté tvrdou slupkou z termoplastu, tyto modifikátory zvyšují houževnatost beze ztráty jiných termomechanických vlastností. Nejčastěji se používá jádro z butadienakrylátového kaučuku v polymerní slupce. Lomová energie takto modifikované epoxidové pryskyřice je téměř třikrát vyšší, než u nemodifikovaného epoxidu. [5]

#### 1.2.1.4 Epoxidové pryskyřice

Jsou to nejvšestrannější reaktoplasty pro konstrukční použití. V závislosti na chemické struktuře pryskyřice a použitém tvrdidlu a případných modifikujících složkách mají nejširší rozsah vlastností. V porovnání s ostatními reaktoplasty mají dobrou houževnatost, odolnost proti únavě a tečení, výbornou adhezi k vláknům, uspokojivou teplotní odolnost, výtečnou chemickou odolnost, dobré elektrické vlastnosti a malé smrštění při vytvrzování. Podle molekulové hmotnosti se jedná o kapaliny až tuhé nelepivé látky. Přidáním reaktivních ředidel, případně modifikátorem pro zvýšení houževnatosti, lze užité technologické vlastnosti výsledné směsi měnit v širokém rozmezí. Vytvrzovací reakce u epoxidových pryskyřic je stupňovité povahy, probíhá velmi pomalu, takže obvykle nevznikají problémy s exotermickou povahou vytvrzovacího procesu. Další výhodou je, že při vytvrzování epoxidových pryskyřic se neuvolňují vedlejší produkty, takže pro získání kompozitu bez dutin (bublin) není potřeba vysokého tlaku. V případě potřeby urychlení vytvrzovacího procesu lze použít urychlovače – obvykle benzyldimethylamin. Epoxidy jsou použitelné pro všechny technologie, ale jsou dražší než polyestery a vinylestery. [5]

### 1.3 Výztuhy

Vláknové výztuže prodělaly poměrně bouřlivý rozvoj především v 60. a 70. letech, kdy byla na trh uvedena první komerční uhlíková vlákna (vysoký modul pružnosti až 600 GPa). Na konci 70. let se začala objevovat i další vlákna, která mají vysoký modul pružnosti v tahu (120-190 GPa) a navíc nejsou křehká. Mezi tato vlákna patří aramidová vlákna (aromatické polyamidy komerčně nazývané KEVLAR) a polyetylenová vlákna. Nejčastěji používanou výztuží v kompozitech vyráběných tažením i jinými technikami jsou skleněná vlákna. Hlavním technologickým strukturním parametrem řídícím vlastnosti výsledného kompozitu je tedy při daném typu vláken a pryskyřice obsah vláken. Z technologického hlediska je výhodnější udávat hmotnostní podíl vláken v kompozitu, který lze použít přímo pro dávkování ve výrobě. Při požadavcích na vysoký modul pružnosti a na vysokou pevnost FRC je tedy snahou dosáhnout co nejvyššího podílu vláken v kompozitu. Mimo kontinuální vlákna (roving) se také zhotovují výztuže ve formě tkané textilie či netkané rohože jak z dlouhých vláken, tak i ze sekaných vláken či z jejich kombinace. V pultruzi se nejčastěji používají vlákna skleněná, uhlíková, grafitová, méně vlákna kevlarová (aramidová). Specialitami jsou vlákna kovová a keramická jako karbid křemíku (SiC) či bor (B). [12]

### 1.3.1 Forma výztuží

Formy vláknových výztuží jsou pro většinu typů vláken stejné a odpovídají potřebám výrobců kompozitů či jiných zpracovatelů. Individuální vlákna a jejich prameny jsou z výroby navinuté na bubnech. Pramenec tvoří svazek mající běžně 200 - 400 vláken. Pro výrobky, kde převládá jeden rozměr (tyčovina, jednosměrný prepreg, atd.) se používá převážně tohoto typu vyztužujících vláken. Pokud jsou však na kompozitní výrobky kladeny požadavky týkající se namáhání ve více než jednom směru a vrstvení jednosměrných lamin není z technologických důvodů výhodné (pultruze, navíjení, RTM), jsou jako výztuže používána rovna, tkaniny, pleteniny a rohože. Dalším důvodem používání takového typu výztuží je rychlejší růst tloušťky stěny výrobku při výrobě, snadnější manipulace a zvýšení odolnosti proti šíření křehkých lomů. Vlastnosti FRC obsahujícího tento typ výztuže se stávají více kvazi izotropní na úkor zvyšující se tloušťky stěny výrobku. [2]

Terminologicky se používají následující formy výztuže:

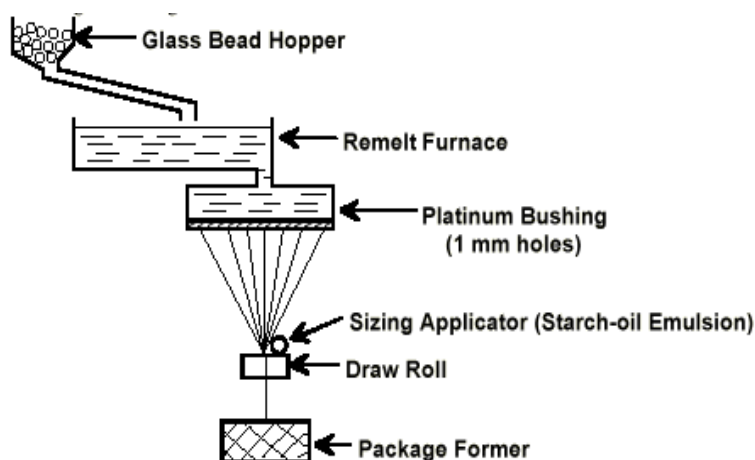
- Prepreg - je polotovár složený z rovingu, které pojí částečně vytvrzená pryskyřice. Výhodou je, že vlákna drží tvar a přilnou k formě. Tím je jejich zpracování výrazně ulehčeno. [2]
- Roving - Tento pojem zahrnuje formu výztuže ve tvaru nekonečných vláken bez krutu. Jejich společným znakem je pramenec tvořený individuálními vlákny navinutý na cívku. Tvoří základ většiny pultrudovaných výrobků. [2]
- Vyztužující rohož - Tato netkaná výztuž se vyrábí z nasekaných rovingů (krátká a středně dlouhá vlákna) jejich slabým naimpregnováním pryskyřicí nebo termoplastem a tepelným slisováním do ploché kontinuální rohože. [2]
- Tkanina - Stejným způsobem jako běžné textilie se z rovingů vyrábí tato tkaná výztuž. Výrobky mají různou plošnou hmotnost, jsou tkány různými způsoby vazeb. Výhodou ve srovnání s netkanou výztuží je větší obsah vláken a tudíž vyšší tuhost a pevnost výsledného kompozitu. [2]
- Povrchová rohož, která má velmi jemnou strukturu a nízkou plošnou hmotnost. Velmi často je vyrobena z polyesteru a nemá pro mechanické vlastnosti kompozitního profilu žádný vliv. Má především estetické účely, protože je možno ji dezénovat, což vede k možnosti kontinuální výroby kompozitů s předem upraveným

povrchem. Jako důležitá komponenta slouží tyto povrchové roušky i z důvodů zvýšení odolnosti FRC proti vlivům UV záření. [2]

- Pletené výztuže – Pletení vláknitých výztuží umožňuje výrobu komplikovaných dvou i třírozměrných útvarů. Lze ovšem použít pouze velice ohebná vlákna, protože při pletení ok dochází k jejich deformaci. Rizikem použití pletených výztuží je možnost křehkého lomu materiálu v oblasti s přebytkem pryskyřice. V pletených výztužích je navíc pouze malá část vláken orientována ve směru předpokládaného namáhání. Ve všech těchto výrobcích lze různé typy výztuží (roving, rohož, tkanina) nebo druhy vláken (sklo, Kevlar, uhlík) kombinovat a vyrábět tak hybridní kompozity (smíšená výztuž). [2]

### 1.3.2 Skleněná vlákna

Používají se především ve spojení s polymerní matricí. S hustotou přibližně  $2,5 \text{ g/cm}^3$  jsou těžší než vlákna grafitová nebo polymerní, ale poměr mezi cenou, hmotností a vlastnostmi je předurčuje pro masovou výrobu. Vykazují také nízkou tepelnou roztažnost (méně než polovinu roztažnosti oceli), což je ve spojení s vhodnou matricí výhodné pro výrobu tepelně namáhaných materiálů. Mezi nevýhody patří malá odolnost proti únavě a nízká adheze k matrici. Tu lze zvýšit povrchovou úpravou, která ovšem snižuje pevnost kompozitu. Skleněná vlákna jsou vyráběna tažením z taveniny. [5]



Obr. 2 Schéma výroby skleněných vláken [13]

### 1.3.3 Uhlíková vlákna

Vlákna s obsahem 90 – 95 % uhlíku mají oproti skleněným vláknům téměř desetinásobnou tuhost, ale jejich pevnost je nižší. Výhodou je, že i když je nižší pevnost, neklesá až do 1000°C. Jejich poměrně drahá výroba (nejlevnější dvojnásobek, pro speciální aplikace až 100 násobek ceny skleněných vláken) je vykoupena dobrou odolností proti únavě. Jsou však jen málo ohebná a výrobek je poměrně křehký. Hustota je 1,8 – 2 g/cm<sup>3</sup>, jsou tedy lehčí než vlákna skleněná. Vlákna jsou navíc tepelně odolná. Do 1000 °C nepotřebují zvláštní ochranu, pokud jsou chráněna proti oxidaci, jsou stabilní až do 2000°C. Tato vlákna vykazují jen minimální teplotní roztažnost a za normální teploty jsou chemicky inertní. Zajímavá je také jejich schopnost vést elektrický proud. Zatímco elektrická vodivost je funkcí obsahu uhlíku, tepelná vodivost je určena i teplotou výroby a uspořádáním krystalu. Tohoto jevu je využíváno při hodnocení kvality vláken. Vyšší obsah uhlíku mají vlákna grafitová, s čímž souvisí jejich lepší elektrická a tepelná vodivost. Uhlíková vlákna jsou sice lehčí a mají lepší adhezi k pryskyřicím, ale nemají takovou pevnost a snáze absorbují vzdušnou vlhkost. Uhlíková vlákna lze vyrábět několika postupy. V průmyslové výrobě je nejrozšířenější teplotní oxidace organických vláken. [1, 5]

#### Hlavní druhy uhlíkových vláken

- karbonizovaná vlákna
- vysokomodulová grafitizovaná vlákna
- vlákna vysoce pevná, se středním modulem pružnosti
- dutá uhlíková vlákna
- vlákna s vysokým modulem pružnosti
- diskontinuální vlákna porušená tahem
- mletá uhlíková vlákna
- recyklovaná uhlíková vlákna

### 1.3.4 Polymerní vlákna

Polymerní vlákna s nižším obsahem uhlíku, nemají tak vysokou pevnost jako grafitová vlákna, ale poměr mezi pevností a hustotou, která je pouze 1g/cm<sup>3</sup>, je lepší. Též poměr tu-

host/hustota hovoří pro tato polymerní vlákna. Před překročením pevnosti jsou schopna vysokého prodloužení. Nevýhodou je v některých aplikacích jejich nízká teplotní odolnost (kevlar degraduje bez speciální ochrany při 175°C). Škodí jim též UV záření za přítomnosti kyslíku. Jsou ovšem odolná vůči chemikáliím. Přestože nejsou teplotně odolná tak jako grafitová vlákna, jejich lepší ohebnost a nízká teplotní vodivost je předurčuje k výrobě „nehořlavých“ obleku. Nehořlavé obleky bývají navíc vystaveny extrémním teplotám pouze po krátkou dobu, a tak jsou bez problému schopny ochránit jejich nositele, protože doba, po které dochází k degradaci vláken, je za této teploty v řádu hodin. Pevnost kevlaru se navíc, na rozdíl od jiných vláken, nemění s délkou. Pro tepelně náročné aplikace vystavené vysokým teplotám je třeba vlákna chránit, nebo používat jejich speciální odnože. Mezi takové teplotně odolné materiály lze zařadit aramid, který krátkodobě odolává teplotám do 2500°C a dlouhodobě 450°C. [1, 5]

### 1.3.5 Přírodní vlákna z rostlin

Organická přírodní vlákna jsou získávána z pěstovaných rostlin. Hustoty, hodnoty tuhosti a pevnosti uvádí následující tabulka.

Tab. 1 Vlastnosti přírodních vláken [5]

Vlákno	Hustota [g/ cm <sup>3</sup> ]	Pevnost v tahu [GPa]	Modul pružnosti E [GPa]	Mezní prodloužení [%]
Konopí	1,52	0,46	70	1,7
Juta	1,3	0,442	60	2,0
Len	1,52	0,84	100	1,8
Bavlna	1,52	0,2-0,8	27	6-12

Přírodní vlákna jsou nyní používána jako výztuž tvarovaných velkoplošných dílů pro interiéry osobních automobilů (u nás dřevěné piliny, obsahující vlákna celulózy).

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
- výztuž je biodegradabilní
- povrch výrobku má přírodní vzhled
- vlákna nezpůsobují opotřebení zpracovatelských strojů (šneků, tavné komory a formy)
- použitím výztuže z přírodních vláken klesne cena výrobku.

## 2 TECHNOLOGIE VÝROBY KOMPOZITŮ

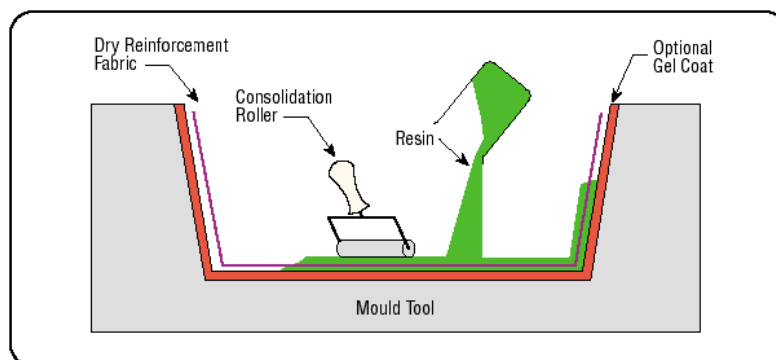
### 2.1 Ruční kladení

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

- povrchová úprava formy separačním činidlem
- gel coat pokud je třeba
- katalyzovaná pryskyřice
- výztuž
- další vrstva pryskyřice je válečkem vtlačena do výztuže a je přitom vytlačen přebytek vzduchu tvořícího bubliny
- tyto dva kroky jsou opakovány tak dlouho, až je vytvořena požadovaná tloušťka stěny
- vytvrzení v klidu
- vyjmutí z formy

Výhodami ručního kladení jsou především jednoduchost technologie, minimální náklady na nástroje a prakticky neomezená variabilita tvarů a velikostí. Flexibilita konstrukce, možnost jednoduše aplikovat gel coat a jednoduché dokončovací operace jsou největšími výhodami tohoto výrobního procesu. Nevýhodou je nereprodukovatelnost odpadu, který lze jen těžko znovu zpracovat, relativně velký objem odpadu, náročnost na lidskou práci, pouze jeden kvalitní povrch, malá produktivita a kvalita výrobku silně závislá na zkušenosti a schopnostech pracovníka. Touto technikou byly vyrobeny lodě, skladovací nádrže, rovné plochy, bazény a různé prototypy. [14]





Obr. 3 Technologie ručního kladení [6]

## 2.2 Metoda vakuového vaku

Tato metoda je pouze zlepšením metody ručního kladení v poslední fázi vytvrzování. Tenký vzduch nepropouštějící film je položen na volný povrch ručně kladeného kompozitu, forma je evakuována a tlakem filmu dojde k vytlačení přebytečných bublin. Postupné kroky této metody jsou následující:

- ruční nakladení laminátu
- fólie je položena přes volný povrch kompozitního dílce
- prostor formy je evakuován
- ručně je film dotlačen na kompozit a všechen přebytečný vzduch je vytlačen ven
- vytvrzení FRC
- film je stržen z laminátu a výrobek je dokončen.

Výhodami tohoto výrobního postupu je možnost připravit materiály s minimálním obsahem vzduchových bublin, umožňuje dosáhnout vyššího obsahu výztuži, všechny výhody ručního kladení jsou zachovány, je vynikající pro sendvičové struktury. Nevýhodami jsou velký obsah odpadu, vyžaduje velmi zručnou pracovní sílu a celý proces je velmi pomalý. Navíc není možno zarovnat okraje výrobku ještě před jeho vytvrzením, což prodražuje celý proces. Hlavními aplikacemi jsou vojenské a letecké součásti, kde cena nehraje hlavní roli a důležité jsou především fyzikální vlastnosti. [14]

### 2.3 Metoda tlakového vaku

Tato metoda je pouze zlepšením metody vakuového patle přidávkem tlakového vaku. Tenký vzduch nepropouštějící film je položen na volný povrch ručně kladeného kompozitu, forma je evakuována a tlakem filmu dojde k vytlačení přebytečných bublin. Navíc je přes vakuový pytel převlečen tlakový, který jeho účinky ještě zlepšuje. Postupné kroky této metody jsou následující:

- ruční naklazení laminátu
- fólie je položena přes volný povrch kompozitního dílce
- prostor formy je evakuován, nad formou je vytvořen přetlak cca 0,3 MPa
- ručně je film dotlačen na kompozit a všechen přebytečný vzduch je vytlačen ven
- vytvrzení FRC
- film je stržen z laminátu a výrobek je dokončen.

Výhodami tohoto výrobního postupu je možnost připravit materiály s minimálním obsahem vzduchových bublin, umožňuje dosáhnout vyššího obsahu výztuží, všechny výhody ručního kladení jsou zachovány, je vynikající pro sendvičové struktury. Je dobrá i pro cylindrické díly a je schopná kvalitních dílů, které mají různé konkávní i konvexní části. Nevýhodami jsou velký obsah odpadu, vyžaduje velmi zručnou pracovní sílu a celý proces je velmi pomalý. Navíc není možno zarovnat okraje výrobku ještě před jeho vytvrzením, což prodražuje celý proces. Tlakový vak je poměrně drahý. Hlavními aplikacemi jsou vojenské a letecké součásti, kde cena nehraje hlavní roli a důležité jsou především fyzikální vlastnosti, které jsou stejné jako u vakuového vaku. [14]

### 2.4 Vytvrzování v autoklávu

Jedná se o vytvrzení kompozitu pomocí tepla a tlaku v uzavřené nádobě (autoklávu) s přesně říditelnými parametry vytvrzování. Postupné kroky v tomto procesu jsou:

- příprava laminátu ve formě jako u metody vakuového pytle
- přesnost takto připraveného výrobku do autoklávu
- působením tepla a tlaku v autoklávu je kompozit vytvrzen

- součástka je vyndána, vakuový pytel stržen a výrobek je dokončen.

Výhodami je další zvýšení obsahu výztuží, mohou být použita jádra na odlehčení kompozitů, mohou být v jednom kroku zabudovány další součásti, najednou může být vytvrzeno mnoho částí v jednom autoklávu.

Nevýhodami je vysoká cena autoklávů, metoda je velmi pracná a velikost vyráběných dílů je diktována velikostí autoklávu. Rovněž formy musí být z lepších materiálů a jsou tudíž dražší než v předchozích metodách. Je produkováno poměrně hodně odpadu. Typickými produkty jsou součásti křídel letadel, nosy letadel, trysky raket, elektronické součásti, teplotní štíty, atd. [14]

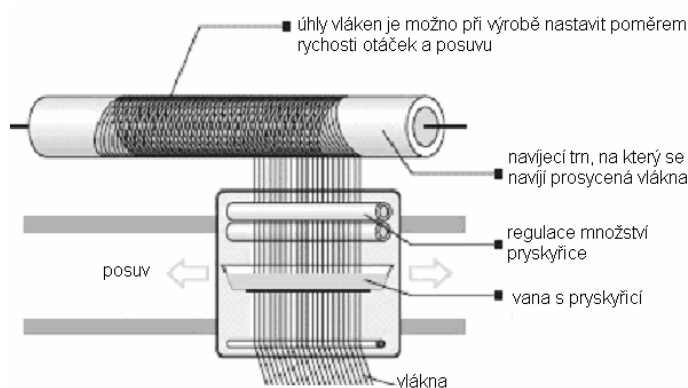
## 2.5 Navíjení

Tato technologie je založena na kontinuálním navíjení svazku vláken či jinak upravených výztuží na kruhovou, smrštitelnou formu. Vlákna jsou navíjena buď již navlhčena pryskyřicí, nebo se provlčují až po navinutí. Požadovaných vlastností kompozitu se dosahuje přesným uspořádáním a orientací pramenců vláken a výztuží. Vytvrzení se provádí na jádře, které je potom z vytvrzeného výrobku vyňato. Postup této technologie je následující:

- Do rotačního zařízení je upnuto jádro, které je buď vyjímatelné, nebo se po ukončení procesu stane součástí výrobku
- jsou navinuty výztuže za předem naprogramovaného předpětí, složení, orientace, atd.
- navíjená stopa je měněna podle požadavků designu a výpočtu vlastností tak dlouho, až je výrobek hotov
- kompozit je i s jádrem vložen do pece, kde se vytvrzuje při neustálé rotaci
- po vytvrzení je jádro vyndáno a výrobek je dokončen.

Výhoda je použití nejlevnější formy výztuže - rovingu. Proces má poměrně velmi dobrou produktivitu a může být vysoce automatizovaný. Hodí se především pro výrobu potrubí, kolen, zásobníků paliv. Poskytuje výrobky s vynikajícími fyzikálními vlastnostmi. Není žádný limit na délku vyráběných trubek, s výhodou se tohoto procesu používá pro výrobu tlakových nádob. Jsou vyráběny i celá tělesa vagonů pouliční dráhy, zásobníky až do průměru 18 m byly touto technikou vyrobeny. Vynikající vlastnosti potrubí takto vyrobeného se využívají pro dopravní spojení vrtných plošin s pozemními skladovacími terminály. Použití je i

pro vyztužení pušek a pro sportovní potřeby (hůlky, rybářské pruty). Nevýhodami je vysoká cena navijecích strojů, nesnadné odstraňování vnitřních forem a poměrně nízká produktivita u výroby tlakových nádrží, kde je nutno používat některé speciální postupy. [5, 6]



Obr. 4 Technologie navíjení [5]

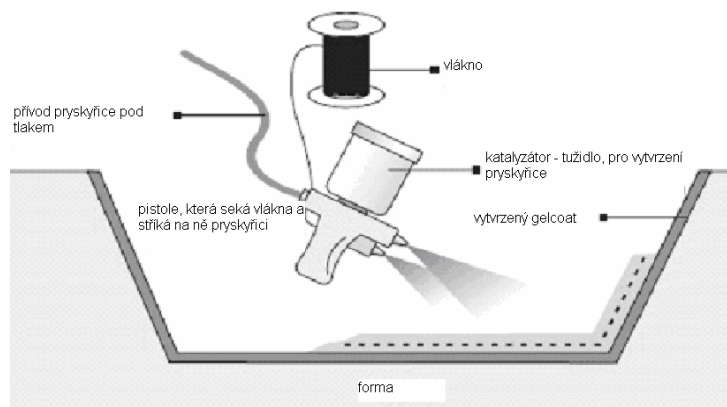
## 2.6 Metoda nanášení kompozitu do formy sprejem

Tato metoda spočívá v tom, že se na povrch formy nastříká katalyzovaná směs krátkých skleněných vláken a matrice, je slisována a vytvrzena. Celý proces se skládá z následujících kroků:

- příprava povrchu formy
- správné namíchání katalyzátorů, aditiv, vláken, atd.
- nastříkání směsi ve větraném prostoru
- nastříkaná směs je zaválečkována a udusána ručně
- vytvrzení a dokončení.

Výhodou tohoto výrobního postupu je jeho přenosnost, nízká cena zařízení (cca 5-8 tisíc USD), pokud je proces automatizován je produktivita poměrně dobrá a reprodukovatelnost výrobků rovněž. Není žádné omezení velikosti výrobku.

Nevýhodami jsou především nesnadné dosažení přesných tolerancí a vlastnosti materiálů jsou horší než u předchozích technologií. Požadavky na kvalitní a schopnou pracovní sílu jsou poměrně vysoké. Využití takto vyrobených kompozitů je stejné jako u ručního kladení s tím, že touto metodou jsou navíc vyráběny velké díly, jako jsou panely, lodě, zásobníky. [5, 6]



Obr. 5 Technologie nanášení kompozitu do formy sprejem [5]

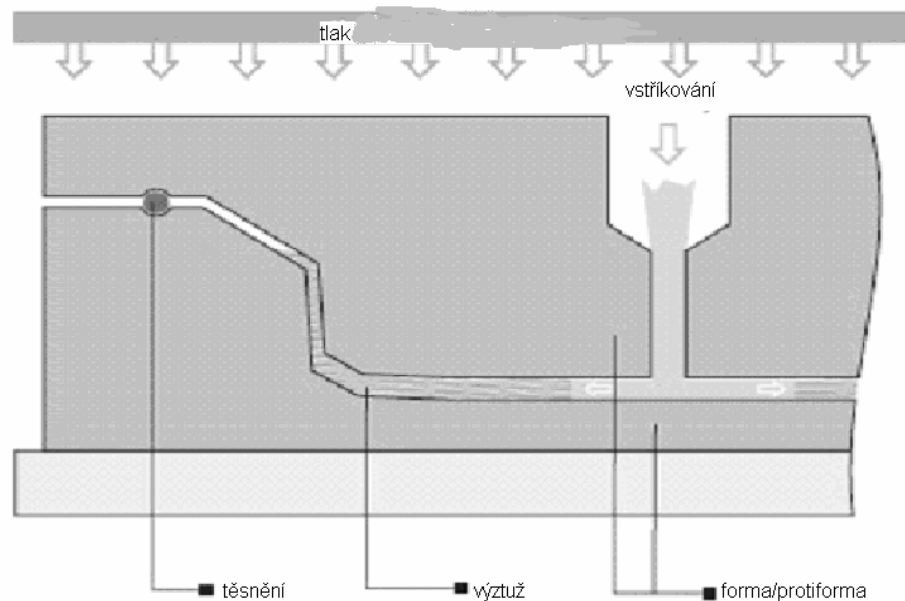
## 2.7 Metoda lisování se vstříkem matrice (RTM)

Tato metoda patří do skupiny metod pracujících s uzavřenou formou. Do této formy je vložena suchá výztuž, forma je uzavřena a je do ní pod tlakem vstříknuta katalyzovaná pryskyřice. Vytvrzování se děje většinou při pokojové teplotě. Postup výroby je následující:

- obě strany formy jsou nejdříve navoskovány (separace) a poté je nanesen gel coat
- po vytvrzení gel coatu je do formy vložena suchá výztuž podle schématu daného typem výrobku
- do uzavřené formy je potom vstříknuta pryskyřice pod tlakem 0,2-0,35 MPa tak, aby došlo k úplnému prosycení výztuže a pryskyřice začala vytékat odtokovými otvory, tyto otvory jsou potom uzavřeny a forma je uzavřená ponechána až do úplného vytvrzení
- forma je otevřena a díl je vytažen
- výrobek je dokončen.

Výhodou RTM metody je to, že je možno vyrobit kompozitní díly, které mají po obou stranách dobrý povrch, přičemž například barva může být na každé straně jiná. Velmi přesně je také možno řídit tloušťkové tolerance. Jelikož se jedná o nízkotlaký proces při pokojové teplotě, je možno použít nástroje vyrobené z plastů a tím se významně celý proces zefektivňuje. Další výhodou je snadné vlamínování různých přírub a jiných součástí. Vyrábí se i poměrně velké plošné výrobky 5-19 m<sup>2</sup>. Mezi nevýhody patří nutnost velmi těžkých a drahých kovových forem, není možno dosáhnout vysokého obsahu skla, proto jsou fyzikální vlast-

nosti těchto materiálů nižší než u jiných procesů a většinou se FRC díly vyrobené touto metodou nepoužívají v konstrukčních aplikacích jako nosné prvky. [5, 6]



Obr. 6 Technologie vysokotlakého nanášení [14]

## 2.8 Metoda lisování ve formě

Tento proces je vhodný pro masovou výrobu FRC dílů. V této metodě jsou ve formě umístěny najednou všechny komponenty, jako je pryskyřice, výztuže, aditiva, plniva barviva, vnitřní mazadla, separační činidla, atd. Při uzavření formy vyšším tlakem materiál teče a vyplňuje prostor formy ve tvaru konečného výrobku. Potom je FRC vytvrzen. Základními vstupními materiály jsou BMC (Bulk molding compound = premix), SMC (Sheet Molding Compound), prepreg a preform pryskyřicí. Výrobní kroky obsahují:

- vyhřívaná forma je vložena do lisu s předepsanou kapacitou, tlakem, rychlostí uzavírání, teplotou, atd.
- vstupní materiál je vložen do otvoru formy a forma je uzavřena
- po vytvrzení je forma otevřena a výrobek vyňat, forma je znovu naplněna pro další výrobní cyklus.

## 2.9 Lisování z prepregů

Prepreg je zkrácený název pro preimpregnovanou vyztužující tkaninu. Prepreg tedy obsahuje přesný poměr pryskyřice a výztuže a je ve formě velmi tenkých (0,1-0,5 mm) vrstev, které se mohou předem navrženým způsobem ve formě klást, aby bylo dosaženo požadovaného prostorového uspořádání výztuže a tím i požadovaných fyzikálních vlastností. Touto metodou jsou produkovány velmi reprodukovatelné, homogenní díly, které obsahují velmi přesně a rovnoměrně výztuž i matrici. Postup vkládání do formy je stejný jako u ručního kladení. Výhodami použití prepregu je velmi přesné a předem definované uložení výztuže, což má za důsledek velmi dobré a izotropní vlastnosti hotového dílce.

Nevýhodou je především vyšší cena prepregu ve srovnání se samotnou pryskyřicí a samotnou výztuží, poměrně veliký odpad, nutnost skladovat prepregy při nízkých teplotách. Tento proces je většinou limitován pro aplikace v letectví a kosmonautice pro jeho vysokou finanční náročnost. Typickými produkty jsou radarové dómy (radomy), klapky náběhové a brzdové, dveře, vstupní panely, kryty komunikačních přístrojů, kryty turbín, atd. [5, 6]

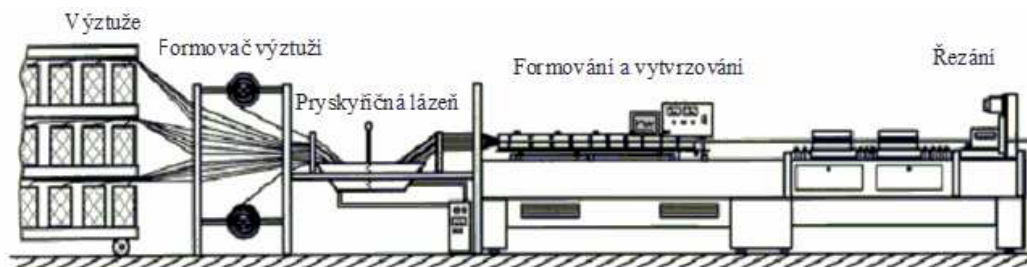
## 2.10 Tažení kompozitních profilů (pultruze)

Tato technologie je založena na tažení svazků vláken, rohoží a tkanin pryskyřičnou lázní, kde dochází k prosycení výztuže. V následném kroku je prosycená výztuž tvarována do požadovaného průřezu a zároveň je celý kompozit vytvrzen v kontinuální vytvrzovací hlavě. Výrobní kroky pultruze jsou:

- soustava vláken, rohoží a roun je tažena s předepsaným předpětím
- výztuž je tažena do pryskyřičné lázně
- vstup do předtvarovacího prostoru, tvarovací a vytvrzovací hlavy (v případě velké tloušťky stěn je třeba modifikovat vytvrzování zapojením mikrovlnného předehřívacího zařízení
- za vytvrzovací hlavou je tažné zařízení, které je nositelem pohybu celé linky
- za tažícím zařízením je pila, která automaticky řeže profil na požadovanou délku.

Největšími výhodami pultruze jsou FRC velmi dobrých vlastností, prakticky neomezená variabilita tvaru průřezů, nekonečná délka vyrobeného profilu, vysoká produktivita, mini-

mální nároky na lidskou práci, vysoký stupeň automatizace, vysoká reprodukovatelnost fyzikálních vlastností. Mezi nevýhody patří poměrně velké investiční náklady na pořízení technologie, relativně drahý provoz, nutnost velmi kvalitního řídicího systému. [1, 5, 6]



Obr. 7 Schéma výroby pultruzí [1]

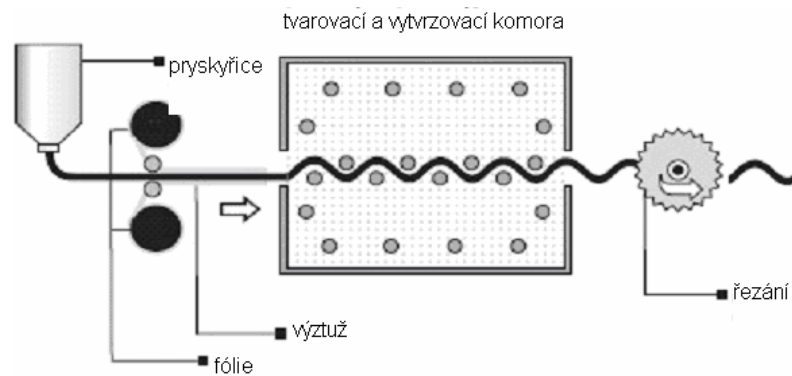
## 2.11 Kontinuální laminace FRC

Tato metoda je jedna z nejstarších a byla v plné míře rozvinuta i v ČR. Celý proces spočívá v tom, že se na kontinuální lince pohybující se nějakou předem stanovenou rychlostí depone výztuž, pryskyřice i všechny katalyzátory a aditiva i s vakuovým pytlek, celá směs se kontinuálně tvaruje a následně i vytvrzuje, čímž do jisté míry připomíná pultruzi. Jednotlivé výrobní kroky je možno shrnout do následujícího schématu:

- příprava povrchu formy (separační medium)
- nanesení pryskyřice na pohybující se pás
- nanesení výztuží
- densifikace materiálu systémem válečků
- simultánní aplikace tepla pro vytvrzení FRC
- řezání vytvrzeného profilu a odstranění separační fólie.

Mezi hlavní výhody patří možnost vyrábět „nekonečnou“ délku FRC profilu o daném průřezu, je možno vyrábět různé tloušťky, nízké jsou náklady a minimální odpad nastává při naběhnutí kontinuální výroby. Mezi nezanedbatelné výhody tohoto procesu patří i oboustranně kvalitní povrch. Vysoká cena výrobního zařízení je jednou z hlavních nevýhod tohoto procesu výroby FRC. Je třeba vyrábět kontinuálně a ve velkých objemech, aby se investice do technologie vrátila. Velmi nesnadno se mění tvar vyráběného dílu. Hlavními aplikacemi jsou střešní krytiny, různé dělicí příčky, kapotáže klimatizace, atd. [1, 5, 6]





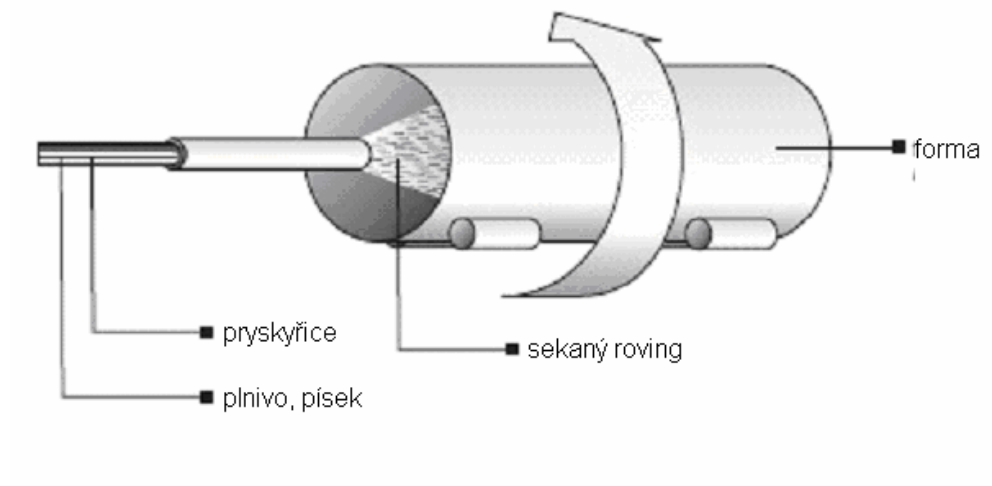
Obr. 8 Technologie kontinuálního laminování [1]

## 2.12 Odstředivé lití FRC

Toto je poměrně nový způsob výroby FRC výrobků založený na principu působení odstředivé síly, vyrábějí se tak především válcové nebo oválné dlouhé předměty v délkách až 9m. Nanášení pryskyřice a její densifikace jsou prováděny odstředivou silou v průběhu rotace formy. Jednotlivé výrobní kroky je možno rozdělit následujícím způsobem:

- výztuž je vložena do formy pokryté separačním materiálem
- forma začne rotovat kolem podélné osy a je do ní vpravena pryskyřice
- potřebná rychlost pro dosažení dostatečného tlaku na pryskyřici je nastavena
- forma je zahřátá na teplotu vytvrzování a FRC je vytvrzen
- rotace formy je zastavena a výrobek je vyjmut

Tato metoda má mnoho výhod, jako je například minimum nutných nástrojů, proces je snadno automatizovatelný s vynikající uniformitou výroby. Je možno dosáhnout poměrně dobrých povrchů na obou stranách výrobku, odpad je minimální a FRC s minimálním obsahem defektů může produkovat prakticky negramotná výrobní síla. Nevýhodami je jednak poměrně vysoká cena technologického zařízení a nutnost vyrobit formy, které jsou velmi přesně vybalancovány i pro vysoké úhlové rychlosti otáčení. Nejčastěji jsou touto metodou vyráběny trubky, paraboly radarů a velké skladovací nádoby. [1, 5, 6]



*Obr. 9 Technologie odstředivého lití [1]*

## 3 VYUŽITÍ KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ

### 3.1 Kompozitní materiály v letectví

Použití kompozitních materiálu přináší výraznou úsporu hmotnosti a tím i paliva. Tyto materiály jsou navíc odolné vůči „únavě“. Nevýhodou může být cena, kterou nevyváží ani již zmíněná úspora paliv. Úspora hmotnosti není přímo úměrná obsahu kompozitu, ale postupně klesá. Nahrazování vyššího podílu klasických materiálu kompozity je velice náročné na vývoj. Pro finančně vyváženou výrobu je proto nutné najít vhodný podíl kompozitu v konstrukci. Nové kompozitní materiály jsou velice vhodné pro stavbu vojenských letadel pro jejich schopnost částečně pohltit záření radaru. Takový letoun je hůře odhalitelný. Z důvodu uvedených výše je použití kompozitních materiálu vhodné i pro výrobu vrtulníku. Firma Boeing používá kompozitu s polymerní a kovovou maticí i pro výrobu listu rotoru. [2, 6]



*Obr. 10 Celokompozitní trup dopravního letadla [6]*

### 3.2 Pozemní doprava

#### 3.2.1 Automobilový průmysl

Kompozitní materiály již nejsou v automobilech nijak výjimečné. Běžné je jejich použitím v reflektorech, přitlačných křídlech, difusorech a částech pohonného ústrojí. Kompozitních materiálů s keramickou maticí využívají někteří automobiloví výrobci v odvodech výfukových plynů. Již v roce 2005 činil podíl kompozitních materiálů průměrně 37,2 kg hmotnosti

automobilu. Ve sportovních a závodních automobilech je podíl kompozitních materiálů velmi vysoký. [2, 6]



*Obr. 11 Automobil Koenigsegg ccx s karoserií z uhlíkových vláken [6]*

### 3.2.2 Lodní doprava

Kompozitních materiálů je hojně využíváno pro stavbu kýlu lodí. Většinou se jedná o lodě sportovní, jachty a samozřejmě moderní armádní plavidla. Kompozitní materiály s polymerní matricí mají oproti kovovým materiálům výhodu vysoké odolnosti proti vodě. Jsou navíc lehčí, což přináší úsporu paliva. Ta vyplývá nejen ze samotné úspory hmotnosti, ale i z nižšího ponoru. Ponořená část klade větší odpor a loď brzdí. [2, 6]



*Obr. 12 Regata švédské armády s technologií stealth [6]*

### 3.3 Farmaceutické aplikace

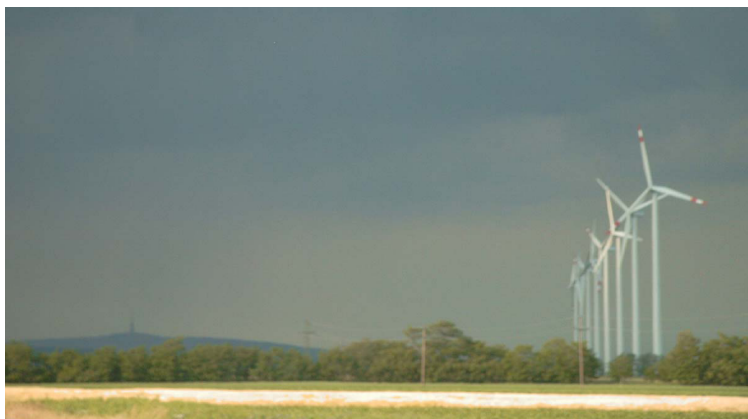
Ve farmacii je kompozitních materiálů využíváno k výrobě protéz. Zatímco použití kompozitu v zubních náhradách má hlavně estetické výhody (kompozit má strukturovaný povrch a tím přirozenější vzhled než klasická náhrada bez povrchových anomálií), v endoprotetice jsou důležité jejich mechanické vlastnosti a nízká hmotnost. Některé kloubní náhrady jsou taky vyrobeny z kompozitních materiálů. Kompozitní materiály jsou také využívány pro náhradu cév a jiných orgánů. [2, 6]



*Obr. 13 Endoprotéza [6]*

### 3.4 Energetika

Významná část odbytu kompozitních materiálů připadá na výrobu stožárů větrných elektráren a listů jejich rotoru. Některé nevodivé kompozity jsou vhodné pro výrobu izolací. Při stavbách elektrárenských zařízení je také kompozitu používáno na výrobu ochozu. Takový ochoz dosahuje pevnosti kovového, ale snižuje riziko úrazu elektrickým proudem, protože obsluha není „uzemněna“. [2, 6]



*Obr. 14 Lopatky větrných elektráren [6]*

### **3.5 Sportovní potřeby**

Pro výrobu sportovních potřeb je kompozitních materiálů využíváno velice. Je téměř nemožné najít sportovní odvětví, ve kterém žádný výrobce nenabízí kompozitní výrobky. Výroba sportovních potřeb z kompozitních materiálů je velice komplikovaná, ale vývoj jde rychle kupředu, protože se v tomto odvětví pohybuje významná část světového kapitálu. Výrobci sportovních potřeb neváhají vynaložit astronomické částky na vývoj a výrobu nových materiálů. Vyžadují to především složité 3D tvary, ze kterých není možné vyjmout standardní formu, nebo je nutné materiály spojovat. Takto je vyráběna řada sportovního zboží. [2, 6]

### **3.6 Armáda**

Kompozity mají kromě výborných mechanických vlastností další, pro armádu důležitou vlastnost, kterou je pohltivost radarových vln. Spolu s vhodným tvarem povrchu lze snížit množství odražených vln pod mez rozpoznatelnosti radarem (technologie stealth). Této technologie využívá americké letectvo v konstrukci letadel a švédská armáda v konstrukci lodí. Mechanická odolnost kompozitních materiálů je důležitá pro použití i u takových materiálů jako jsou pancíře. Pro pancéřování je již dlouho používáno keramických a kovových kompozitů. V současné době je zaváděno pancéřování, které obsahuje kompozit s uhlíkovým vláknem a polymerní matricí. Je-li tato vrstva vrchní, stěžuje také odhalení bojových vozidel. Pokud je vláknitého kompozitu použito jako vnitřní vrstvy, plní pouze funkci ochrannou. [2, 6]



*Obr. 15 Stíhací letadlo Stealth F117 US Army s kompozitním pláštěm [6]*

### **3.6.1 Neprůstřelné vesty**

Moderní neprůstřelné vesty jsou vyrobeny z kompozitu s kevlarovou výztuží. Pro speciální potřeby, jako je ochrana proti střelám s vysokou průrazností, je používáno i jiných vláken a svrchních plátů, či destiček z lehkých slitin, keramiky, nebo kompozitu s polymerní matricí. Jelikož je důležité, aby nositel vesty nebyl omezen v pohybu, není možné použít masivní a těžké výztuže. Klasická lehká vesta tudíž zastaví střelu, ale velká část energie je přenesena na tělo. Tím dochází k poškození žebér, v případě zásahu kalibrem dostatečné ráže, i dalších orgánů. Tomu se snaží výrobci předejít použitím materiálů pohlcujících energii střely. Jejich použité množství je opět limitováno již zmíněnými nároky na komfort nošení. [2, 6]



*Obr. 16 Kevlarová vesta*

### 3.6.2 Přilby

Zjednodušeně je možné přirovnat kompozitní přilby k ochranným vestám. I zde je použito kevlarových vláken jako součásti balistického materiálu a vnitřní vložky tlumící náraz. Samotná konstrukce je ovšem rozdílná. Kevlarová vlákna jsou vždy v pevné matici (u lehkých vest jsou vlákna v elastomeru, nebo volně a v pevné matici jsou pouze, pokud je použito kompozitních vyztužujících plátů). Vnitřek je tvořen tlumící hmotou a upínacím systémem. [2, 6]



*Obr. 17 Kevlarová helma*

### 3.7 Stavebnictví

Ve stavebnictví je kompozitních materiálů využíváno ve velkém množství a dlouho (tradičním zástupcem je železobeton). Nově je využíváno stavebních materiálů z moderních kompozitů, s výztuží z uhlíkových a skelných vláken v polymerní matici. Mezi jejich největší výhody patří samozřejmě poměr hmotnost/nosnost a odolnost povětrnostním vlivům. Uplatnění nachází též kompozity s a maticemi kovovými a keramickými. Keramické kompozity vynikají především teplotní odolností, což je ve stavebnictví ceněno z bezpečnostního hlediska. Kompozitních profilů je stále více používáno jako nosných prvků lávek a mostu. [2, 6]





*Obr. 18 Fotbalový stadion Allianz aréna v Mnichově [6]*



*Obr. 19 Kompozitní profil [6]*

## 4 MECHANICKÉ VLASTNOSTI KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ A JEJICH ZKOUŠENÍ

### 4.1 Mechanické vlastnosti

#### 4.1.1 Tuhost (modul pružnosti)

Tuhost vyjadřuje sílu, kterou je nutno vynaložit pro deformaci tělesa v pružné oblasti deformací. Mírou této síly je modul pružnosti ve smyku a v tahu. Závislost modulu pružnosti na směru namáhání je u jednotlivých typů namáhání rozdílná. Zatímco tahu a tlaku je modul pružnosti největší ve směru vlákna, u zatížení smykem je naopak ve směru vláken nejmenší, protože se při zatížení více uplatňuje tuhost matrice. [1]

#### 4.1.2 Pevnost

Pevnost materiálů se liší v návaznosti na jejich molekulární i nadmolekulární strukturu. Tvary tahových křivek se liší podle toho, zda daný polymer se nachází v oblasti teplot pod či nad teplotou skelného přechodu  $T_g$ . U amorfních polymerů pod  $T_g$  dochází k přetržení tělesa ihned po překonání pružné deformace. Některé semikrystalické polymery mají schopnost se dále zpevňovat po překonání meze kluzu a napětí na mezi pevnosti pak může být i několikrát větší než napětí na mezi kluzu. [1, 10]

#### 4.1.3 Tvrdost

Tvrdost je složitou veličinou, která souvisí jak s kvalitou povrchu, tak s vnitřními vlastnostmi polymeru. Zejména u elastomerů existují empirické vztahy přepočtu mezi tvrdostí a modulem pružnosti ve smyku. Literatura uvádí tvrdosti, které jsou obvykle používány pro charakterizaci elastomerů, dále tvrdosti HRC pro tvrdé polymerní materiály pod  $T_g$  a nejobsáhleji používané tvrdosti vtiskem kuličky. [1]

#### 4.1.4 Houževnatost

Houževnatost je důležitou vlastností materiálu, která vyjadřuje množství práce nutné na vznik nového povrchu. Tuto vlastnost materiálu lze nejlépe vystihnout hodnotou lomové houževnatosti a hnací síly trhliny  $G$ . Tyto údaje se naneštěstí v literatuře nevyskytují a jsou

předmětem dalších zkoušek. Většinou je nutné se omezit na údaje, které poskytují plastikářské zkušební metody, tj. rázová houževnatost metodou Charpy a Izod s vrubem a bez vrubu. Vzhledem k tomu, že pro vysoce houževnaté materiály je nutné použít tělesa s jiným tvarem vrubu než u méně houževnatých materiálů, je vzájemné srovnání na základě číselných údajů o vynaložených energiích složité. [1, 10, 15]

## 4.2 Tahová zkouška

Tato zkouška hodnotí pevnost materiálu při jeho tahovém namáhání. Zkušební tělísko se upne do trhacího stroje a je namáháno silou až do okamžiku jeho přetržení. Vlastnosti kompozitu se v různých místech liší a tahové napětí je rozloženo rovnoměrně, tím vznikají smyková napětí. Průřez tělíska se v průběhu zkoušky mění až do okamžiku dosažení rovnováhy mezi deformací a napětím. Při následném dalším zatěžování dojde k přetržení zkušebního tělíska. Z důvodu průběžné změny průřezu tělíska je obtížné stanovit skutečné napětí. V praxi se využívá tzv. smluvní napětí, což je velikost působící síly vztažená na počáteční průřez zkušebního tělíska. [1, 15, 16]

$$\sigma = \frac{F}{S} [\text{MPa}] \quad (1)$$

Tento způsob výpočtu je vyhovující u materiálů, u nichž dochází k malým deformacím (např. reaktoplasty). U elastomerních materiálů, u kterých dochází k prodloužení v řádu desítek procent, dojde k podstatnému zmenšení průřezu zkoušeného tělíska a tím i k velkému rozdílu počátečního a koncového napětí při zkoušce. Při trhání tělíska roste jeho původní délka z počáteční hodnoty  $l_0$  na hodnotu  $l$  - poměrné prodloužení ( $\varepsilon_l$ )

$$\varepsilon_l = \frac{l - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0} [-] \quad (2)$$

a zmenšuje se jeho průřez z hodnoty  $S_0$  na hodnotu  $S$  – poměrné zúžení ( $s$ ).

$$\varepsilon_s = \frac{S_0 - S}{S_0} = \frac{\Delta S}{S_0} [-] \quad (3)$$

Poměr relativního zúžení a relativního prodloužení charakterizuje Poissonovo číslo

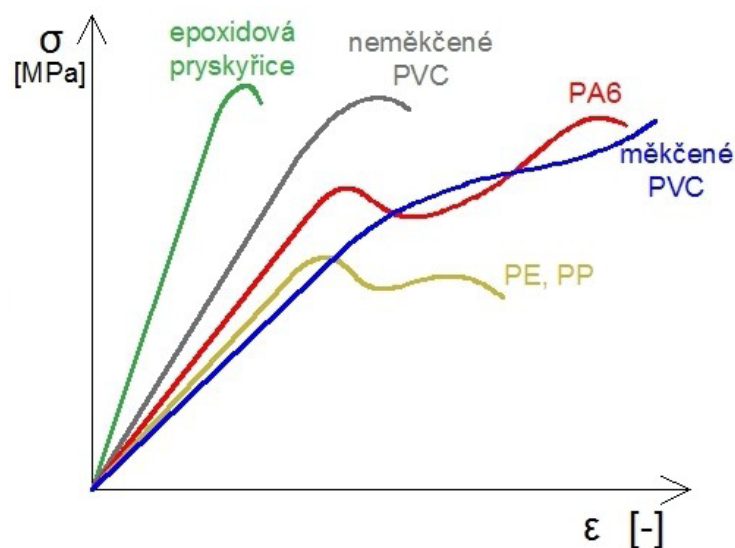
$$\mu = \frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_l} [-] \quad (4)$$

jehož teoretická maximální hodnota může dosáhnout až 0,5. Pro tahové zkoušky v počáteční části křivky do meze úměrnosti platí Hookův zákon (deformace je úměrná použité síle)

$$\varepsilon_l = K \cdot \sigma [-] \quad (5)$$

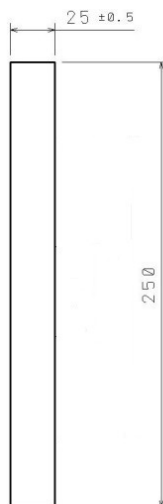
součinitel K udává poměrnou změnu délky při jednotkovém napětí. Je to cotg úhlu, který svírá tečna křivky napětí-ovného diagramu a osa popisující prodloužení zkušebního tělíska. Jeho převrácenou hodnotou dostaneme modul pružnosti E daného materiálu (Youngův modul)

$$\frac{1}{K} = E \Rightarrow \varepsilon_l = \frac{\sigma}{E} [-] \quad (6)$$



Obr. 20 Tahové křivky pro různé materiály

Vzorky pro tahové zkoušky se připravují dle normy ČSN EN ISO 527-4. Jejich tloušťka se volí dle použitého materiálu v rozmezí 1 až 6 mm.



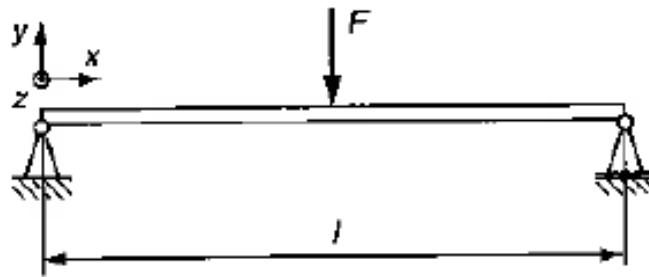
Obr. 21 Normované zkušební těleso

### 4.3 Ohybová zkouška

Zkouška ohybem dává důležité konstrukční podklady pro ty materiály, které jsou při aplikaci namáhány na ohyb, což je velmi častý případ. Jsou to nejen nosníky, ale např. samonosné střešní konstrukce z laminátů, obkladový materiál ve stavebnictví, který se prohýbá svou vlastní vahou, střešní krytiny apod. Ohybová zkouška také umožňuje stanovit modul pružnosti  $E$  u materiálů, u kterých to nelze dostatečně přesně určit z tahových nebo tlakových zkoušek. Podstata zkoušky spočívá v zatěžování tělesa volně podepřeného dvěma podpěrami přítlačným trnem uprostřed jejich rozpětí (tříbodový ohyb).

Zkušební vzorek, podepřený jako nosník dvěma podpěrami, je konstantní rychlostí prohýbán trnem působícím uprostřed rozpětí podpěr tak dlouho, dokud se vzorek nezlomí nebo dokud deformace nedosáhne předem stanovené hodnoty. Maximální smykové napětí leží mezi vrstvami uprostřed tloušťky tělesa.

Stanovené veličiny mají v první řadě význam srovnávací. Také je zde nutné sledovat druh porušení. Akceptovatelný druh porušení ohýbaného nosníku je porucha vzorku lomem vyvolaným tlakem nebo tahem. [15, 16]



Obr. 22 Schéma provedení tříbodové ohybové zkoušky [16]

Maximální ohybový moment:

$$M_{o \max} = \frac{F \cdot L}{4} [\text{N} \cdot \text{mm}] \quad (7)$$

Průhyb:

$$y = \frac{F \cdot L^3}{48 \cdot E \cdot J_z} [\text{mm}] \quad (8)$$

Maximální ohybové napětí:

$$\sigma_{o \max} = \frac{M_{o \max} \cdot e_{\max}}{J_z} [\text{MPa}] \quad (9)$$

Kde: L – vzdálenost podpěr [mm]

F – zatěžující síla [N]

$J_z$  – kvadratický moment průřezu profilu [mm<sup>4</sup>]

$e_{\max}$  – vzdálenost nejkrajnějšího vlákna profilu [mm]

E – modul pružnosti materiálu profilu [MPa]

## 5 FYZIKÁLNÍ ZKOUŠENÍ KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ

### 5.1 Hoření

Většina organických polymerů a pryskyřic má spalná tepla kolem 8-10 MJ/kg, což je činí relativně hořlavými. Hoření tuhých látek je poměrně komplikovaný a dosud ne plně objasněný proces a u polymerů je ještě komplikován jejich makromolekulární strukturou. K tomu, aby došlo k hoření je obvykle nutno, aby se u povrchu polymeru vytvořila požadovaná koncentrace nízkomolekulárních uhlovodíkových fragmentů termické degradace v plynné fázi. To vyžaduje, aby došlo v prvotním procesu vznícení k povrchové degradaci makromolekul. Tato degradace je u polymerů zjednodušena jejich malou tepelnou vodivostí, která vede k prudkému růstu teploty v blízkosti ohniska vznícení, aniž by docházelo k rovnoměrnějšímu rozvodu tepla do objemu tělesa. To vede k lokálnímu zplynění i při působení relativně malého zdroje. Z praxe je však známo, že za vhodných podmínek (vysoká teplota a tlak) nebo při vysokém poměru povrchu k objemu (velmi tenké desky) hoří ocel i minerály a horniny (sopka). Z tohoto pohledu není hořlavost organických pryskyřic ničím neočekávaným. To, co z hlediska požární bezpečnosti organické materiály mírně diskvalifikuje ve srovnání s anorganickými materiály jako ocelí, jinými kovy či betonem, je relativně nízká zápalná teplota, produkce hustého dýmu a možnost dlouhodobého doutnání. [2]

#### 5.1.1 Retardéry hoření

Retardéry hoření jsou látky, které zlepšují tepelnou odolnost materiálů proti hoření. Mohou najít uplatnění u rozmanitých typů materiálů. Jedno z možných uplatnění může být při ochraně dřeva proti požáru. Tato práce se bude zabývat retardéry hoření, které nacházejí své použití zejména v polymerních materiálech. Vzhledem k tomu, že polymery jsou snadno hořlavé, nemohou splnit v určitých oblastech použití požadavek ochrany vůči ohni.

Tyto požadavky jsou určeny normami. Proces hoření se skládá z pěti základních kroků, jimiž jsou: ohřev, rozklad, vzplanutí, hoření, a propagace ohně. Retardace hoření může být dosažena přerušением hořícího procesu v jakémkoli kroku z těchto stupňů. Nejrychlejšími metodami užívanými pro zpomalení hoření je začlenění retardérů hoření do polymerní matrice, které mohou zasáhnout do procesu hoření během jednotlivých vývojových stupňů hoření. Tyto přimíchaná aditiva jsou schopny v přítomnosti kyslíku nebo při působení tepelné-

ho zdroje potlačit vzplanutí a hoření. Výsledný systém vykazuje uspokojivé zpomalení hoření. Procesy, které vyvolává přidání retardérů hoření, označujeme jako principy retardace hoření. [29]

#### **Účinky retardace hoření:**

1. Zředění organické látky inertním plnivem má za následek zvýšení tepelné kapacity, zlepšení tepelného chování materiálu, menší generování kouře a objem hořlaviny,
2. Zředění plynů nehořlavými složkami, které uvolňují významné množství vody při vysokých teplotách, čímž oddalují hoření,
3. Blokování mechanismu hoření, například použitím halogenů,
4. Vytvoření povlaku, který blokuje spalování omezeným přístupem vzduchu a může také působit jako izolační ochranná vrstva během spalování. Retardéry hoření mohou být vyrobeny také z recyklovaných odpadů. Příkladem jsou polyuretanové pěny obsahující 10-11% různých organických fosfátových esterů retardérů hoření. Obecně platí, že obsah retardéru hoření v polymerní matrici závisí na jeho retardační účinnosti. U větších přísadků existuje možnost negativního ovlivnění mechanických vlastností

polymeru. Retardéry hoření na polymerní bázi můžeme rozdělit na tři základní typy: retardéry hoření na bázi hydroxidů kovů alkalických zemin, retardéry hoření na bázi sloučenin bromu a retardéry hoření na bázi fosforu. [29]

##### ***5.1.1.1 Retardéry hoření na bázi hydroxidů kovů alkalických zemin***

Tento typ retardérů hoření je založen na tepelném rozkladu anorganických látek, konkrétně hydroxidech kovů alkalických zemin. Tyto látky jsou nejvhodnější s ohledem na životní prostředí, jsou netoxické a také levné. Jsou obvykle smíchány ve vysokém poměru s polymerem (30-60%), což můžeme brát jako nevýhodu, protože dochází k ovlivnění mechanických a fyzikálních vlastností polymeru. Nejběžnějšími jsou hydroxid hlinitý  $\text{Al}(\text{OH})_3$  (ATH) a hydroxid hořečnatý  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  (MDH). K retardaci hoření dochází při jejich rozkladu, s kterým je spojeno také uvolňování vody. Tato reakce je endotermní, tudíž je teplo při ní pohlcováno. Kromě uvolnění vody je dalším efektem retardace těchto retardérů hoření vznik ochranné krycí vrstvy neboli povlaku. Ten vzniká karbonizací uhlíkového zbytku z polymerní matrice s oxidy kovů [29].



### 5.1.1.2 Retardéry hoření na bázi sloučenin bromu (BFR)

BFR jsou látky složené z aromatických jader. Patří mezi retardéry s vysokou účinností, jejich obsah v polymerní matrici se pohybuje v rozmezí 10-15%. Obsah bromu v těchto látkách je obvykle 50-80%. BFR se vykytuje v mnoha druzích. K retardaci hoření docházím mechanismem blokování hoření tvorbou těkavé HBr v přítomnosti uhlovodíků. Abychom dosáhli vyšší účinnosti retardace, mohou se BFR modifikovat. Vhodnou látkou pro modifikaci může být  $Sb_2O_3$ . Důkazem je skutečnost, že k vylučování těkavé HBr dochází při teplotě 350°C, na rozdíl od  $Sb_2O_3$ , jehož rozklad začíná až při teplotě 650°C [29].

Vyloučená HBr tvoří v přítomnosti vlhkosti korozní kyselinu bromičnou. Další látkou, která se při hoření může objevit je jedovatý dioxin. Tím se dostáváme ke zdravotním rizikům těchto retardérů, kdy se tyto látky se uvolňují do životního prostředí nejen z výrobků, ve kterých jsou obsaženy, ale také při likvidaci těchto výrobků. Jejich akutní toxicita je sice nízká, ovšem nebezpečné jsou díky své stálosti a odolnosti přirozenému rozkladu. Mohou výrazně negativně působit na živé organismy a to především na vodní. U člověka se může účinek těchto látek projevit například drážděním pokožky nebo očí. Tyto látky se také mohou ukládat v lidském těle a následně se projevit poškozením. Využívají se například v elektroprůmyslu, dopravních prostředcích, jako přísada plastů a textilií nebo jako balicí a izolační materiál. Vzhledem k postupnému zpřísnování zdravotních a ekologických požadavků dochází k omezení či úplnému zákazu používání některých látek, které byli obsaženy v retardérech hoření. [29]

### 5.1.1.3 Retardéry hoření na bázi fosforu

Sloučeniny obsahující fosfor představují rostoucí skupiny přísad, jež jsou šetrné k životnímu prostředí. Jsou široce užívány jako retardéry hoření, které fungují jiným způsobem než předešlé anorganické materiály a halogenové sloučeniny. Tyto retardéry fungují dvěma způsoby.

- prvním je přerušování exotermního procesu, čímž potlačují spalování zachycením volných radikálů,
- druhým způsobem je pomocí chemické reakce zvýšit obsah uhlíku oproti tvorbě CO nebo CO<sub>2</sub>, což bude mít za následek zvýšenou tvorbu ochranné krycí vrstvy, tedy uhlíkových krust.

Tento typ retardéru je obsažen v polymerní matrici v menším množství než předešlé retardéry, konkrétně se používá 7-8% fosforu. Využívají se u polymerů, které obsahují ve svém řetězci kyslík. Takovými polymery jsou například polyamidy (PA). Tyto retardéry nacházejí uplatnění zejména u nátěrů a laků [29].

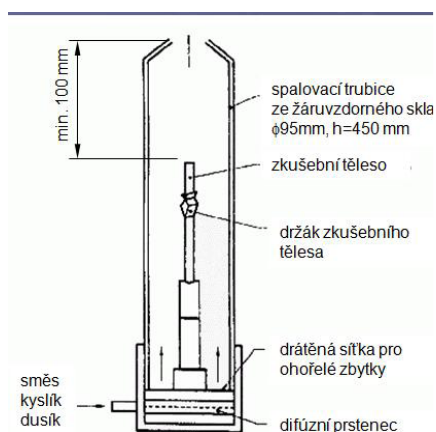
## 5.1.2 Metody zkoušení hořlavosti

### 5.1.2.1 Metoda stanovení kyslíkového čísla „LOI“ (ČSN ISO 4589-2)

#### Kyslíkové číslo:

je minimální koncentrace kyslíku v proudu směsi s dusíkem (v objemových %), kdy bude podporováno hoření polymeru ve vertikální poloze po dobu 3 minut.

(např. pro PTFE je LOI > 90%).



Obr. 23 Ukázka zkoušky metodou kyslíkového čísla „LOI“ [30]

## ČSN EN ISO 4589 – 1 Plasty - Stanovení hořlavosti metodou kyslíkového čísla - Část 1: Návod k aplikaci zkoušek

Tato první část mezinárodní normy (ČSN EN) ISO 4589 představuje průvodní dokument pro hodnocení hořlavosti metodou kyslíkového čísla. Poskytuje uživateli instrukce, jak používat zkušební metody popsané v částech 2 a 3. Zkouška je určena pro plasty o maximální

tloušťce 10,5 mm. Kyslíkové číslo udává limitní koncentraci kyslíku ve směsi s dusíkem, při níž zkoušený materiál ještě hoří.

### **5.1.3 Testovací metoda UL 94 (Metodika americké organizace Underwriters Laboratories)**

UL 94, neboli zkouška hořlavosti plastů, se provádí ve vertikální nebo horizontální poloze. Schéma jednotlivých poloh je zobrazeno na obrázku 7 a obrázku 8. Materiál je vystaven přesně definovanému zdroji zapálení po stanovenou dobu několikrát za sebou. [30]

#### **5.1.3.1 UL 94 V vertikální uspořádání zkoušky**

Princip měření spočívá v upevnění vzorku do svislé polohy a vystavení přímému plameni po dobu 10 sekund. Po tomto čase se plamen odstraní a sleduje se doba hoření vzorku. Po zhasnutí se opět vzorek vystaví plameni na 10 sekund a poté se odstaví. Po odstavení se začne měřit doba samovolného plamenného hoření a samovolného plamenného žhnutí. Sleduje se zda-li zkušební vzorek odkapává, jak hoří a zda při odkapávání zapaluje bavlněnou látku umístěnou pod vzorkem. [30]

#### **5.1.3.2 UL 94 HB horizontální uspořádání zkoušky**

Na zkušebním tělese se vyznačí dvě čáry kolmo na podélnou osu ve vzdálenosti  $25 \pm 1$  mm a  $100 \pm 1$  mm od zapalovaného konce. Zkušební těleso se upevní do vodorovné polohy. Pod zkušební těleso se upevní drátěná síťka. Kahan se přikládá pod úhlem  $45^\circ$  na dobu 30 sekund, poté se oddálí a začne se měřit čas hoření tělesa. V případě, že dosáhne značky 25 mm dřív, než za 30 sekund oddálí se a začne se měřit čas. Po oddálení plamene se sleduje, zda plamen přesáhne značku 100 mm. [30]



Obr. 24 Ukázka uspořádání testovací metody UL 94 [30]

## 5.2 Viskozita

Viskozita je fyzikální veličina, udávající poměr mezi tečným napětím a změnou rychlosti v závislosti na vzdálenosti mezi sousedními vrstvami při proudění skutečné kapaliny.

Viskozita je veličina charakterizující vnitřní tření a závisí především na přitažlivých silách mezi částicemi. Kapaliny s větší přitažlivou silou mají větší viskozitu, větší viskozita znamená větší brzdění pohybu kapaliny nebo těles v kapalině. [1]

Pro ideální kapalinu má viskozita nulovou hodnotu. Kapaliny s nenulovou viskozitou se označují jako viskózní.

- Symbol dynamické viskozity:  $\eta$

- Základní jednotka SI: newton sekunda na metr čtvereční, značka jednotky:  $\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-2}$ , ekvivalentně též Pascal . sekunda, jednotka  $\text{Pa}\cdot\text{s}$

Vnitřní tření závislé na gradientu rychlosti vztahem

$$\tau = \eta \frac{dv}{dy} [-] \quad (10)$$

kde  $\frac{dv}{dy}$  označuje gradient (růst) rychlosti ve směru kolmém na rychlost,  $\tau$  je tečné napětí

a  $\eta$  se nazývá součinitel viskozity (vnitřního tření) nebo dynamická viskozita. [1]

Převrácená hodnota dynamické viskozity se nazývá **tekutost**

$$\varphi = \frac{1}{\eta} \quad (11)$$

Podíl dynamické viskozity a hustoty kapaliny se označuje jako součinitel kinematické viskozity nebo kinematická viskozita

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} [m^2 \cdot s^{-1}] \quad (12)$$

Uvedený vztah pro dynamickou viskozitu pochází od Newtona a platí pro velkou většinu kapalin (i plynů). Takové tekutiny se nazývají newtonské tekutiny. Dynamická viskozita u nich nezávisí na gradientu rychlosti. Existují však také anomální tekutiny, u nichž je viskozita na gradientu rychlosti závislá. Takové kapaliny se nazývají nenewtonské. [1]

Viskozita klesá s rostoucí teplotou a roste s rostoucím tlakem. Vliv tlaku je však obvykle zanedbatelný.

Tvorbou vazeb mezi molekulami jednotlivých složek se mění tekutá výchozí směs pozvolna na pevnou. Při izotermním vytvrzování stoupá viskozita exponenciálně. V případě, že se uvolněné teplo neodvádí, překročí účinek zahřátí zvýšení viskozity způsobené zesíťováním, viskozita proto nejprve poklesne, než následně rychle stoupne. Toho lze v praxi využít při technologii ručního kladení, kdy zpočátku mohou uniknout vzduchové bubliny vzniklé při míchání a může dojít k snadnějšímu prosycování a zesíťování plněných a vyztužených poživ. [1]

Používají se ponorné rotační viskozimetry (Brookfield), které měří krouticí moment, potřebný k rotaci vřetene různých tvarů ponořeného do vzorku.

### 5.2.1 Doba gelace

Doba gelace je čas potřebný k tomu, aby se zkumavka zdvihla spolu s pohybující se tyčinkou. Pro běžnou vstupní kontrolu se používají tzv. automatické geltimetry, pomocí nichž lze měření provádět opakovaně.[1]

Existuje mnoho dalších zkušebních metod pro určení doby gelace. V technických listech se často uvádí jak doba gelace, tak doba zpracovatelnosti. Určení doby zpracovatelnosti je

většinou bližší praxi, protože se provádí na větším objemu pryskyřice (např. 300 ml), (ČSN EN ISO 9514 a ČSN EN 14022). Při této zkoušce se namíchaná směs ponechá stát bez temperování a v určitých časových úsecích se odebírají vzorky a měří některá vlastnost, např. viskozita. [1]

## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**

## 6 CÍL DIPLOMOVÉ PRÁCE

Cílem diplomové práce je:

1. Studium vlivu množství plnění akrylátové pryskyřice 25 hm. %, 50 hm. %, 75 hm. % a 100 hm. % plnivem Martinal ON 904 (ATH v hm. %)
2. Experimentální měření tahových vlastností - maximální dosažené napětí  $\sigma_m$ , modul pružnosti v tahu E, poměrné prodloužení  $\varepsilon$  pro dané hm. % plnění dle normy ČSN EN ISO 527-4
3. Experimentální měření ohybových vlastností - maximální dosažené napětí  $\sigma_m$ , modul pružnosti v tahu E, poměrné prodloužení  $\varepsilon$  pro dané hm. % plnění dle normy ČSN EN ISO 14125
4. Měření viskozity pryskyřice Norester 880, Brookfieldovou metodou dle normy ČSN ISO 2555 (64 0346)
5. Vliv redukovadla viskozity BYK 966 při různých stupních plnění pryskyřice Norester 880
6. Diskuse výsledků



## 7 VÝROBA ZKUŠEBNÍCH TĚLES

### 7.1 Výroba zkušebních těles pro tahovou a ohybovou zkoušku

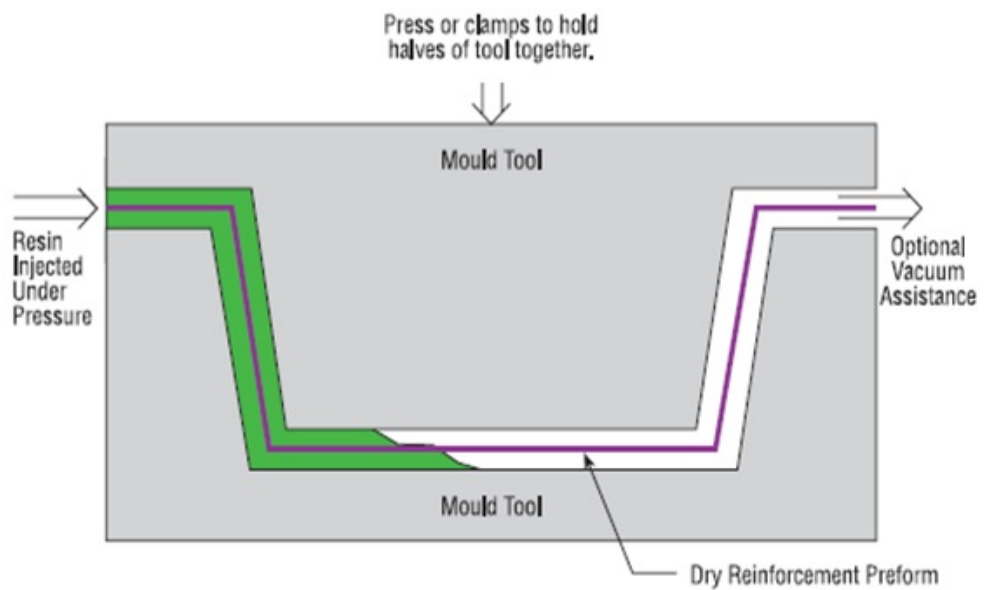
Zkušební tělesa pro tahovou a ohybovou zkoušku byly vyrobeny metodou lisování se vstříkáním matrice – RTM (viz. Obr. 25). Tato metoda patří do skupiny metod pracujících s uzavřenou formou. Do této formy je vložena suchá výztuž, forma je uzavřena a je do ní pod tlakem vstříknuta katalyzovaná pryskyřice. Vytvrzování se děje většinou při pokojové teplotě. Postup výroby je následující:

- obě strany formy jsou nejdříve navoskovány (separace) a poté je nanesen gel coat
- po vytvrzení gel coatu je do formy vložena suchá výztuž podle schématu daného typem výrobku
- do uzavřené formy je potom vstříknuta pryskyřice pod tlakem 0,2-0,35 MPa tak, aby došlo k úplnému prosycení výztuže a pryskyřice začala vytékat odtokovými otvory, tyto otvory jsou potom uzavřeny a forma je uzavřená ponechána až do úplného vytvrzení
- forma je otevřena a díl je vytažen
- výrobek je dokončen.

Z výrobku byly dále nařezány zkušební tělesa pro tahovou zkoušku dle normy ČSN EN ISO 527-4 a ohybovou zkoušku dle normy ČSN EN ISO 14125.

Výhodou RTM metody je to, že je možno vyrobit kompozitní díly, které mají po obou stranách dobrý povrch, přičemž například barva může být na každé straně jiná. Velmi přesně je také možno řídit tloušťkové tolerance. Jelikož se jedná o nízkotlaký proces při pokojové teplotě, je možno použít nástroje vyrobené z plastů a tím se významně celý proces zefektivňuje. Další výhodou je snadné vlamínování různých přírub a jiných součástí. Vyrábí se i poměrně velké plošné výrobky 5-19 m<sup>2</sup>. Mezi nevýhody patří nutnost velmi těžkých a drahých kovových forem, není možno dosáhnout vysokého obsahu skla, proto jsou fyzikální vlastnosti těchto materiálů nižší než u jiných procesů a většinou se FRC díly vyrobené touto metodou nepoužívají v konstrukčních aplikacích jako nosné prvky.

Metodou RTM jsou vyráběny obklady karosérií dopravních prostředků, jako jsou třeba autobusy, vlaky, lodě, kryty přístrojů a zařízení. [1]



Obr. 25 Princip technologie RTM [6]



Obr. 26 Pohledy na RTM formu a výztužné materiály

## 8 POUŽITÉ MATERIÁLY

### 8.1 Retardér hoření ATH (Hydroxid hlinitý)

#### 8.1.1 Obecný popis retardéru ATH

Hydroxid hlinitý, také známý jako trihydrát hliníku (ATH), nebo jednoduše hydrát, je přesněji chemicky určen jako hydroxid hlinitý,  $\text{Al}(\text{OH})_3$ . Je to neabrazivní prášek s Mohsovou tvrdostí 2,5 až 3,5 a specifické hustotě  $2,42 \text{ g/cm}^3$ . Hydroxid hlinitý je nejvíce používaný retardér hoření na světě. Po zahřátí na  $200^\circ\text{C}$  se hydroxid hlinitý rozloží na 66 % oxidu hlinitého a 34% vody. Nejenže se rozpadá a uvolňuje vodní páru, ale také pohlcuje velké množství tepla, čímž ochlazuje materiál, a zbytkový oxid hlinitý vytváří ochrannou vrstvu. Tato látka působí hned třemi způsoby najednou. Tento nezvratný proces je ta část, která dělá z ATH účinný retardér hoření. Hydroxid hlinitý se používá jako absorbent, emulgátor, iontoměnič, žiravina, filtrační médium. Je také používán k výrobě papíru, keramiky, tiskářské barvy, detergentů pro hydroizolaci textilií, zubní pasty a antiperspirantů. [21]

#### 8.1.2 Popis retardéru ATH (Hydroxid hlinitý)

Jde o produkt při výrobě hliníku. Mezi hlavní produkty patří kamenec (sulfát hliníku), polychlorid draselný (PAC), sodík hliníku, zeolity, fluorid hlinitý. Surovina na výrobu skla, glazury a frit. Surovina při výrobě katalyzátorů. Zpomaluje hoření a potlačuje dýmivost v plastových výrobcích jako: kabely, pryžové výrobky a koberce. Surovina pro hnojiva a výrobu sádrokartonových desek. Základní složka papíru, rozpouštědel a vodou ředitelných barev, UV vytvrditelných nátěrových hmot, inkoustů a lepidel. [21]



Obr. 27 Ukázka retardéru hoření ATH [21]

Tab. 2 Fyzikální a chemické vlastnosti retardéru ATH (Hydroxid hlinitý) [21]

Fyzikální a chemické vlastnosti	
Fyzikální stav	Bílý prášek bez zápachu
Bod tání	300°C
Bod varu	
Hustota	2,42 g/cm <sup>3</sup>
Rozpustnost ve vodě	nerozpustný
pH	slabé základní
Hustota par	
Samovznícení	
NFPA hodnocení	Zdraví: 1; Hořlavost: 0; Reaktivita: 0
Index lomu	
Vzplanutí	Není považován za požárně nebezpečný
Stabilita	Stabilní za normálních podmínek

### 8.1.3 Pryskyřice NORESTER 880

Norester 880 je akrylátová pryskyřice s nízkou viskozitou speciálně navrhnutá pro plnění s trihydrátem hlinitým (ATH) pro dosažení požadavků, které jsou v dopravním průmyslu kladené na kompozitní materiály (odolnost vůči ohni, nízká hodnota dýmyvosti a toxicity). Norester 880 může být vytvrzován pomocí iniciátoru MEKP(methylethylketonperoxide). Pryskyřice není tixotropní a není urychlená. Je vhodná pro použití ručního laminování a infúzních technologií, včetně technologie RTM.

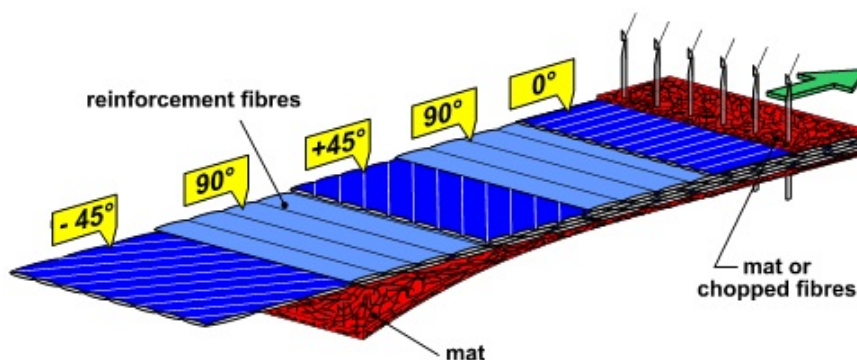
Tab. 3 Vlastnosti pryskyřice Norester 880 bez plniva a s plnivem

	Norester 880	100 hm% Norester 880 100 hm % Martinal ON 904
viskozita dle Brookfielda	90-105 m.Pa.s	482 m.Pa.s
doba gelace 1,5% MEKP	50-60min.	45 min.
hustota	1,1 g/ cm <sup>3</sup>	-

### 8.1.4 Unifilo

Rohož z nekonečných vláken, která se používá při zavřených aplikacích RTM (light RTM). Tato vrstva zabezpečuje tok materiálu v dutině formy.

### 8.1.5 Multiaxiální tkanina Saertex 988 g/m<sup>2</sup>

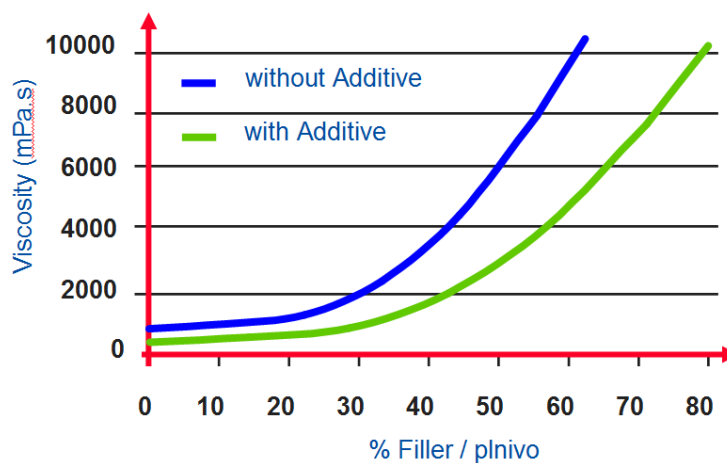


Obr. 28 Principiální schéma multiaxiální tkaniny [25]

Ve skladbě kompozitního materiálu jsme použili kromě jedné vrstvy rohože z nekonečného vlákna i dvě vrstvy bi-diagonální tkaniny Seartex.

### 8.1.6 Redukovadlo viskozity BYK 966

Na snížení viskozity pryskyřice plněné v různém množství ATH jsme použili redukovadlo viskozity BYK 966, který snižuje viskozitu redukcí interaktivních sil mezi částicemi plniva a eliminuje sedimentaci plniva.



Obr. 29 Závislost viskozity na obsahu plniva s redukovačem BYK 966 a bez redukovače

## 9 POPIS A TECHNICKÉ PARAMETRY POUŽITÝCH ZAŘÍZENÍ

### 9.1 Zkušební stroj Zwick

Zkušební stroj Zwick 1456 slouží k měření mechanických vlastností materiálů. Umožňuje provádět statické zkoušky tahem, tlakem, ohybem i cyklické zkoušky míjivým zatížením. Oblast použití je omezena velikostí maximální snímané síly siloměrnou hlavou na materiály polymerní (plasty, kompozity, lamináty, textilie, pěnové materiály, lepenky, papíry aj.) S použitím teplotní komory je možno provádět i mechanické zkoušky při teplotách (-80°C až +250°C). Univerzální testovací programy pro zmíněné mechanické zkoušky (TestXpert) jsou dodány spolu se zkušebním strojem a nainstalovány na osobním počítači, který vyhodnocuje průběh zkoušky a měřené veličiny.



Obr. 30 Zkušební stroj Zwick 1456

***Technická data***

Snímač síly: 20 kN a 2,5 kN

Pracovní výška: 1160 mm

Celková výška: 2012 mm

Pracovní šířka: 420 mm

Celková šířka: 630 mm

Strojová výška: 1284 mm

Maximální zkušební rychlost: 750 mm/min

Hmotnost: 150 kg

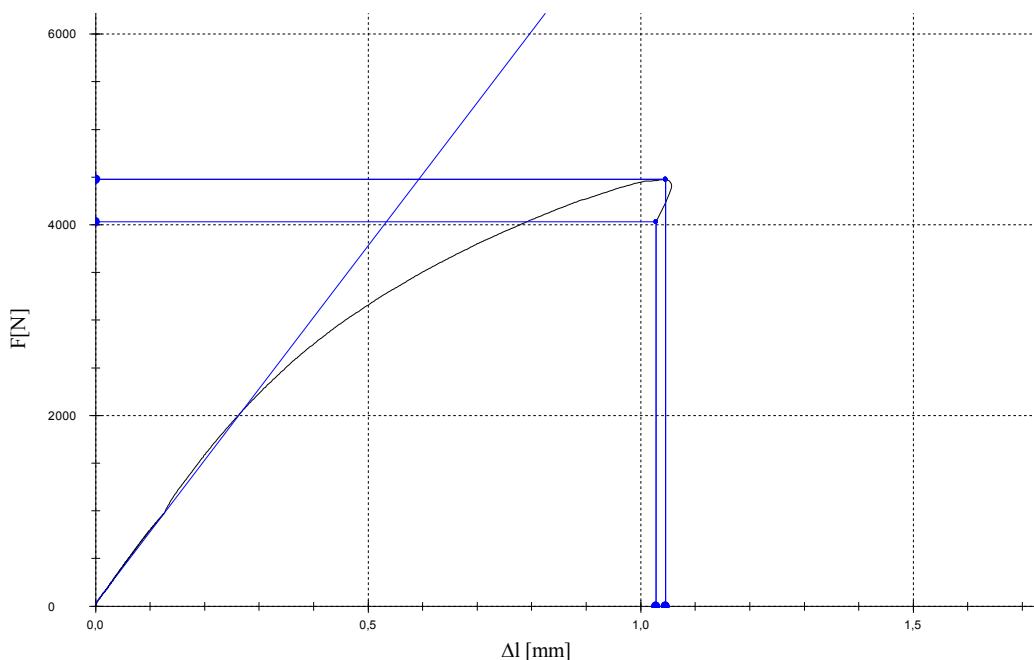
## 10 VÝSLEDKY PROVEDENÝCH ZKOUŠEK

### 10.1 Zkouška tahem

Zkušební vzorky byly zatěžovány jednoosým tahem na zkušebním stroji Zwick 1456 při teplotě okolí 24°C.

Pevnost v tahu byla stanovena jako síla potřebná k přetržení vzorku zkoušeného laminátu. Parametry zkoumaného vzorku ohybovou zkouškou musí splňovat parametry udané normou ČSN EN ISO 527-4. Každá série měření byla provedena na deseti vzorcích. Celkový počet vzorků byl tedy čtyřicet. Program TestXpert vyhodnotil naměřené údaje. Pro každou sérii vzorků kompozitu je vyhodnocena tabulka obsahující rozměry vzorku (tloušťku  $a$ , šířku  $b$ ), maximální dosažené napětí  $\sigma_m$ , napětí při přetržení  $\sigma_B$ , modul pružnosti v tahu  $E$ , poměrné prodloužení při max. napětí  $\varepsilon_{Rm}$ , poměrné prodloužení při přetrhnutí  $\varepsilon_B$ , maximální sílu dosaženou při přetrhnutí  $F$ .

#### 10.1.1 Stanovení tahových vlastností vzorků s 25 hm. % plněním



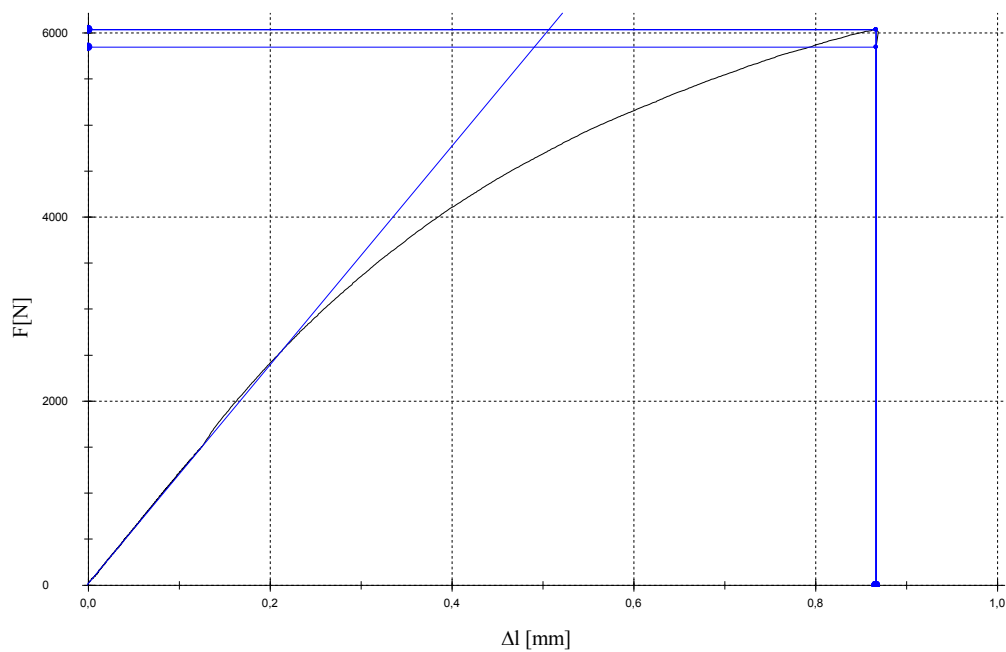
Obr. 31 Grafický záznam typických hodnot tahové zkoušky 25 hm. % plnění



Tab. 4 Výsledky tahové zkoušky 25 hm. % plnění

	a [mm]	b [mm]	$\sigma_m$ [MPa]	$\sigma_B$ [MPa]	E [MPa]	$\varepsilon_{Rm}$ [%]	$\varepsilon_B$ [%]	F [N]
1	2,3	25,5	75,41	72,13	5431,47	2,37	2,47	4422,98
2	2,5	25	70,68	54,95	7042,23	1,91	3,18	4417,63
3	2,2	25	76,1	72,12	7811,15	1,88	1,87	4185,52
4	2,6	25,2	68,3	61,55	5725,48	2,09	2,06	4475,09
5	2,6	25,4	68,51	57,38	6469,4	2,25	2,3	4524,52
6	2,5	25,3	68,19	62,26	6144,72	2,43	3,16	4312,83
7	2,4	25,2	70,6	38,92	6414,36	2,29	2,16	4269,96
8	2,5	25	65,71	62,9	5982,27	2,11	2,16	4107,09
9	2,3	25,4	62,99	12,59	5044,96	1,59	1,06	3680,08
10	2,2	24,9	68,81	60,83	8445,27	1,64	1,74	3769,26
$\bar{X}$	2,41	25,19	69,53	55,56	6451,13	2,06	2,22	4216,5
s	0,1524	0,208	3,98	17,76	1055,92	0,29	0,63	290,15
v	6,32	0,83	5,72	31,96	16,37	14,3	28,49	6,88

### 10.1.2 Stanovení tahových vlastností vzorků s 50 hm. % plněním

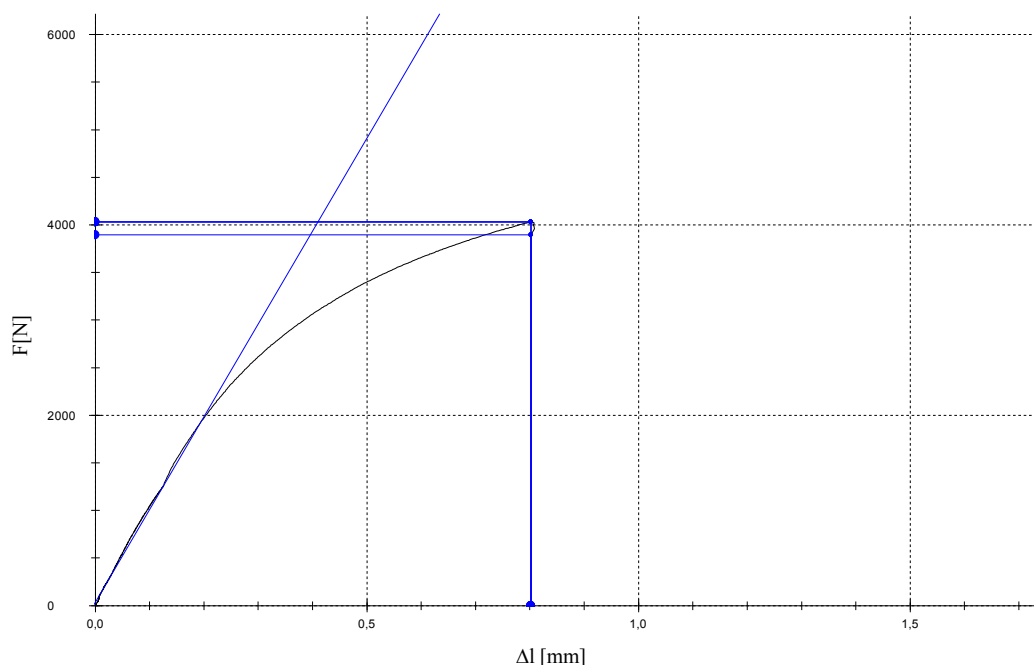


Obr. 32 Grafický záznam typických hodnot tahové zkoušky 50 hm. % plnění

Tab. 5 Výsledky tahové zkoušky 50 hm. % plnění

	a [mm]	b [mm]	$\sigma_m$ [MPa]	$\sigma_B$ [MPa]	E [MPa]	$\varepsilon_{Rm}$ [%]	$\varepsilon_B$ [%]	F [N]
1	2,5	24,5	85,7	85,31	9825,06	1,39	1,41	5249,4
2	2,6	23,2	100,01	100,01	10473,35	1,72	1,72	6032,74
3	2,7	24,6	92,47	92,37	8001,02	1,72	1,72	6141,92
4	2,9	24,2	78,19	71,06	7541,46	1,66	1,73	5487,44
5	2,9	23,4	86	85,81	8850,56	1,79	1,81	5835,64
6	2,8	23,8	90,59	87,72	8915,95	1,73	1,73	6036,65
7	2,9	23,5	85,12	82,2	8554,8	1,83	1,94	5800,8
8	2,9	24	83,03	78,3	7686,5	1,75	1,73	5778,97
9	2,6	23,3	97,66	96,66	9891,35	1,96	1,97	5916
10	2,4	22	102,32	98,04	11492,25	1,59	1,61	5402,56
$\bar{X}$	2,72	23,65	90,11	87,75	9123,23	1,71	1,74	5768,21
s	0,1874	0,761	7,91	9,22	1281,65	0,15	0,16	296,45
v	6,89	3,22	8,78	10,51	14,05	8,79	9,16	5,14

### 10.1.3 Stanovení tahových vlastností vzorků se 75 hm. % plněním

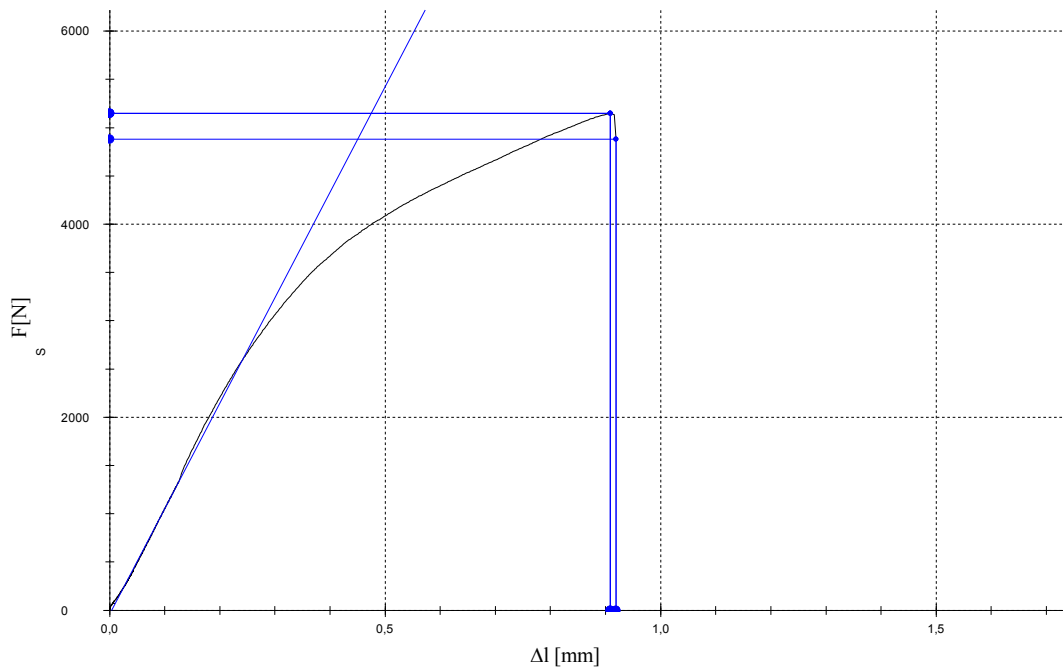


Obr. 33 Grafický záznam typických hodnot tahové zkoušky 75 hm. % plnění

Tab. 6 Výsledky tahové zkoušky 75 hm. % plnění

	a [mm]	b [mm]	$\sigma_m$ [MPa]	$\sigma_B$ [MPa]	E [MPa]	$\varepsilon_{Rm}$ [%]	$\varepsilon_B$ [%]	F [N]
1	2,6	24,7	62,43	61,42	7674,6	1,81	1,84	4009,06
2	2,5	24,2	69,66	62,97	8386,36	2,06	2,26	4214,15
3	2,2	24,8	76,16	71,63	8668,82	2,19	2,42	4155,45
4	2	24,6	73,31	54,99	9312,72	1,47	1,52	3606,89
5	2,3	24,6	71,24	68,83	8626,43	1,6	1,6	4030,52
6	2,5	24,6	65,63	63,32	7982,22	2,03	2	4036,11
7	2,6	24,7	60,56	57,2	8335,9	1,58	1,6	3889,11
8	2,5	24,6	59,68	58,16	7925,71	1,45	1,47	3670,05
$\bar{X}$	2,4	24,6	67,33	62,32	8364,1	1,78	1,84	3951,42
s	0,2138	0,177	6,16	5,71	517,72	0,29	0,36	216,85
v	8,91	0,72	9,15	9,17	6,19	16,28	19,4	5,49

#### 10.1.4 Stanovení tahových vlastností vzorků se 100 hm. % plněním



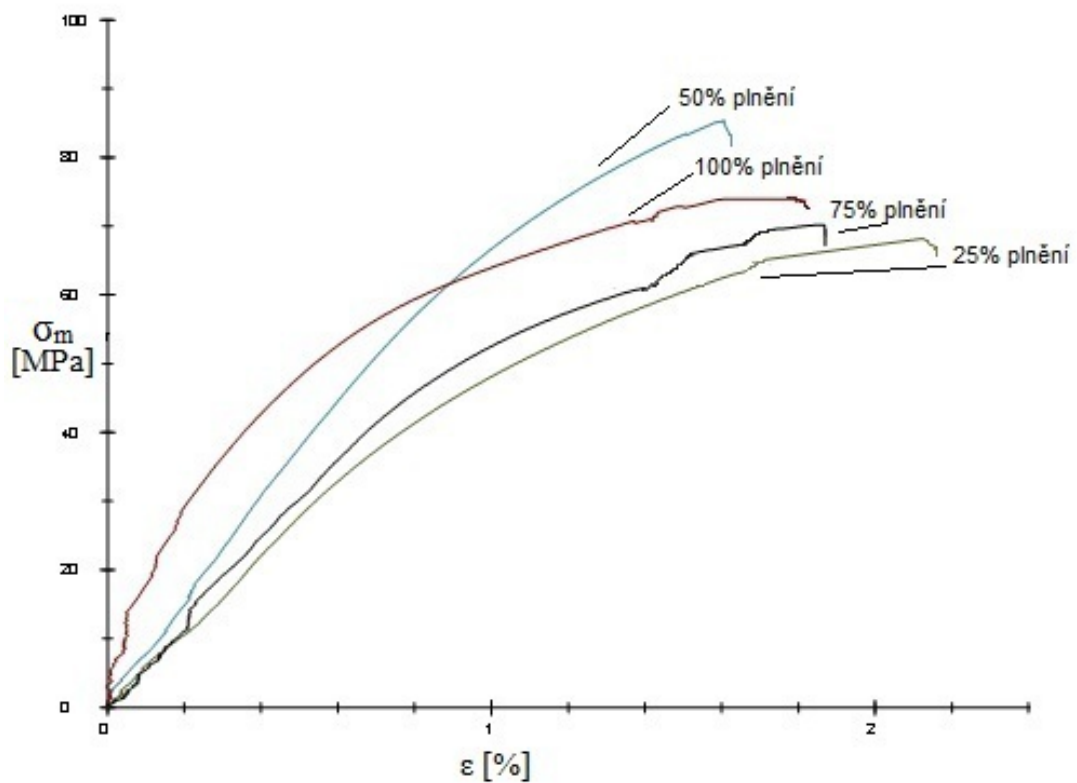
Obr. 34 Grafický záznam typických hodnot tahové zkoušky 100 hm. % plnění

Tab. 7 Výsledky tahové zkoušky 100 hm. % plnění

	a [mm]	b [mm]	$\sigma_m$ [MPa]	$\sigma_B$ [MPa]	E [MPa]	$\epsilon_{Rm}$ [%]	$\epsilon_B$ [%]	F [N]
1	2,8	24,5	75,08	71,17	7971,65	1,82	1,84	5150,2
2	2,9	24,4	75,85	71,08	7243	1,95	1,93	5367,44
3	3	24,9	67,5	64,99	8393,22	1,63	1,63	5042,62
4	2,9	23,7	74,22	74,22	7716,65	1,61	1,61	5101,46
5	2,8	23,1	78,21	76,41	7348,6	1,81	1,79	5058,89
6	3	23,5	75,75	74	8310,28	1,67	1,67	5340,57
7	2,7	24,7	69,67	66,85	8210,05	1,55	1,54	4646,37
8	2,9	24,4	70,94	70,18	7729,84	1,81	1,88	5019,76
9	3	25,8	75,23	68,53	8606,2	1,81	1,77	5822,91
10	3	24	74,2	73,4	9515,33	1,6	1,61	5342,11
$\bar{X}$	2,9	24,3	73,67	71,08	8104,48	1,73	1,73	5189,23
s	0,1054	0,772	3,27	3,57	666,75	0,13	0,13	307,45
v	3,63	3,18	4,44	5,02	8,23	7,59	7,71	5,92



Obr. 35 Vzorky po zkoušce tahem



Obr. 36 Porovnání průměrných hodnot všech vybraných vzorků při tahové zkoušce

Z odečtených sil ze zkoušky tahem program TestXpert vyhodnotil pro naměřené hodnoty aritmetický průměr, směrodatnou odchylku a variační koeficient.

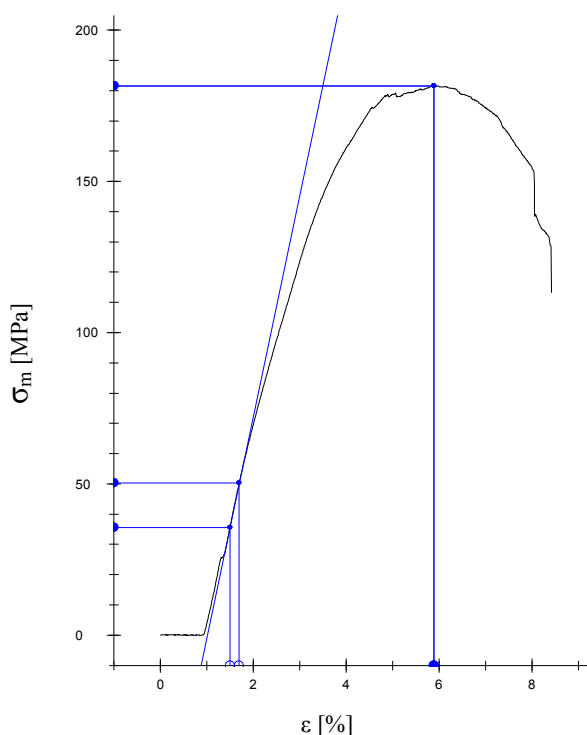
Z každé série byl vybrán grafický záznam typických hodnot tahové zkoušky, který vyhodnotil program TestXpert. Na závěr bylo provedeno grafické porovnání průměrných hodnot všech vzorků čtyř sérií.

## 10.2 Zkouška ohybem

Zkušební vzorky byly zatěžovány na tříbodový ohyb na zkušebním stroji Zwick 1456 při teplotě okolí 24°C. U sérii s 25 hm. %, 50 hm. %, 100 hm. % plněním bylo provedeno měření na deseti vzorcích u série se 75 hm. % plněním bylo provedeno měření na 8 vzorcích. Celkový počet vzorků byl tedy 38. Program TestXpert vyhodnotil naměřené údaje. Parametry zkoumaného vzorku ohybovou zkouškou musí splňovat parametry udané normou ČSN EN ISO 14125. Ta udává celkovou délku vzorku a vzdálenost podpor vztažené na tloušťku laminátu. Vzdálenost podpor je šestnáctinásobek tloušťky vzorku. V našem případě je tedy vzdálenost podpor 48 mm.

Pro každou sérii vzorků kompozitu je vyhodnocena tabulka, která obsahuje rozměry vzorku (tloušťku a, šířku b), maximální dosažené napětí v ohybu  $\sigma_m$ , poměrné prodloužení  $\varepsilon$  a modul pružnosti E.

### 10.2.1 Stanovení ohybových vlastností vzorků s 25 hm. % plněním

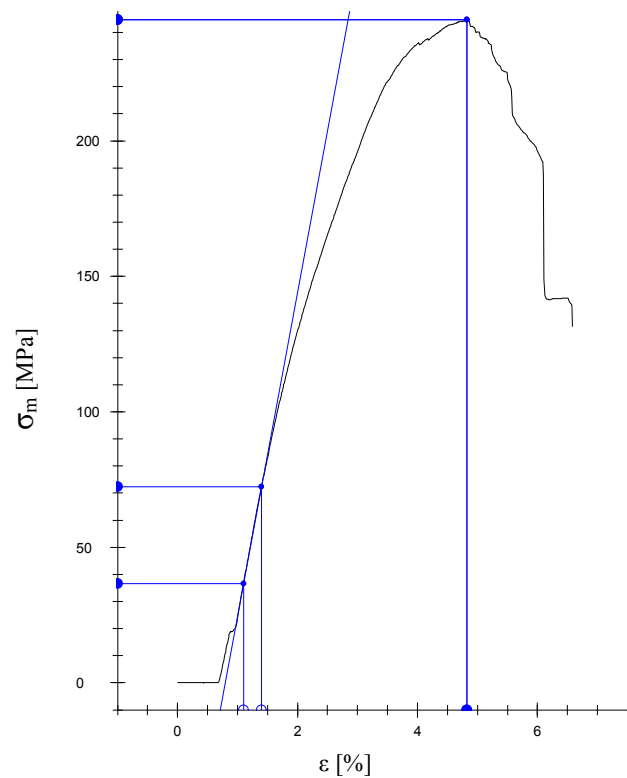


Obr. 37 Grafický záznam typických hodnot tříbodové ohybové zkoušky 25 hm. % plnění

Tab. 8 Výsledky tříbodové ohybové zkoušky 25 hm. % plnění

	a [mm]	b [mm]	$\sigma_m$ [MPa]	$\epsilon$ [%]	E [MPa]
1	2,7	25,1	180,41	5,87	7131,08
2	2,7	25,5	183	5,55	7349,52
3	2,6	24,9	192,29	5,49	7976,82
4	2,4	25,4	227,05	5,29	9533,01
5	2,4	24,7	229,82	5,11	9648,35
6	2,4	25,3	216,67	5,55	8989,28
7	2,3	25,1	181,57	5,89	7325,94
8	2,5	24,5	210,71	5,75	8040,13
9	2,6	24,9	178,89	5,93	7140,53
10	2,5	25,5	172,47	5,61	6803,71
$\bar{X}$	2,51	25,09	197,29	5,6	7993,84
s	0,137	0,3414	21,64	0,27	1046,15
v	5,46	1,36	10,97	4,74	13,09

### 10.2.2 Stanovení ohybových vlastností vzorků s 50 hm. % plněním

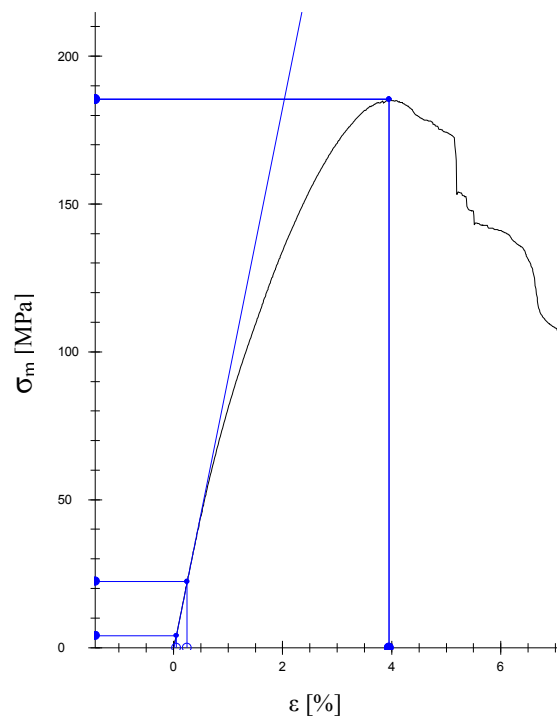


Obr. 38 Grafický záznam typických hodnot tříbodové ohybové zkoušky 50 hm. % plnění

Tab. 9 Výsledky tříbodové ohybové zkoušky 50 hm. % plnění

	a [mm]	b [mm]	$\sigma_m$ [MPa]	$\varepsilon$ [%]	E [MPa]
1	3	25,1	195,88	5,19	8828,46
2	3	23,5	193,2	4,67	9258,94
3	3	23,7	206,13	3,96	10361,43
4	3	23,5	219,04	4,62	10015,6
5	3	24,5	184,95	4,74	8999,51
6	3	26,3	250,55	4,51	10922,15
7	2,9	24,1	230,86	4,2	11307,35
8	2,8	23,8	239,41	4,13	11764,89
9	2,9	24	256,25	4,32	12102,67
10	2,8	23,2	244,6	4,82	11917,87
$\bar{X}$	2,94	24,17	222,09	4,52	10547,89
s	0,08433	0,9274	25,88	0,37	1239,42
v	2,87	3,84	11,65	8,19	11,75

### 10.2.3 Stanovení ohybových vlastností vzorků se 75 hm. % plněním



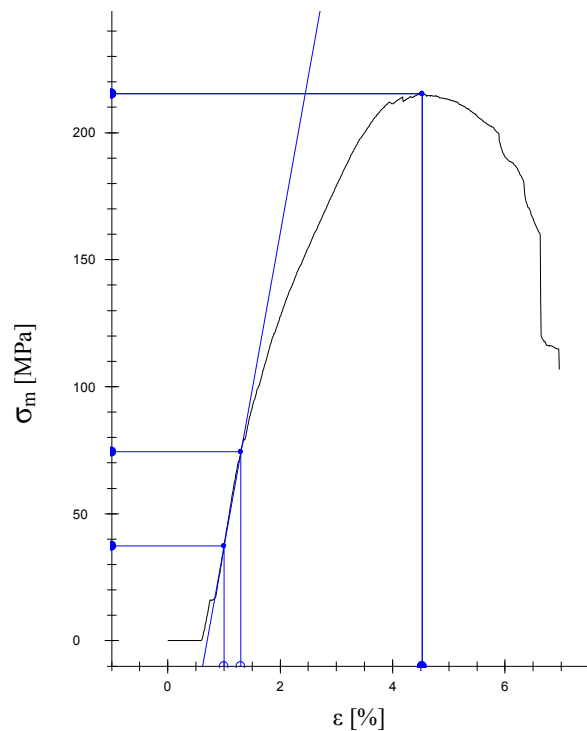
Obr. 39 Grafický záznam typických hodnot tříbodové ohybové zkoušky 75 hm. % plnění



Tab. 10 Výsledky tříbodové ohybové zkoušky 75 hm. % plnění

	a [mm]	b [mm]	$\sigma_m$ [MPa]	$\varepsilon$ [%]	E [MPa]
1	2,6	25,4	179,39	3,98	7828,67
2	2,3	25,2	154,11	3,65	8056,06
3	2,7	25	185,4	3,95	9144,9
4	2,7	24,4	165,79	4,86	7715,15
5	2,7	24,7	177,19	4,5	8635,48
6	2,7	25,2	186,94	3,71	9696,73
7	2,5	24,9	158,56	4,26	7785,66
8	2,6	24,9	201,42	3,86	10388,94
9	2,7	25	187,05	4,3	9167,52
10	2,6	24,8	194,9	3,6	9701,62
$\bar{X}$	2,61	24,95	179,07	4,07	8812,07
s	0,1287	0,2838	15,42	0,41	950,1
v	4,93	1,14	8,61	10,03	10,78

#### 10.2.4 Stanovení ohybových vlastností vzorku se 100 hm. % plněním



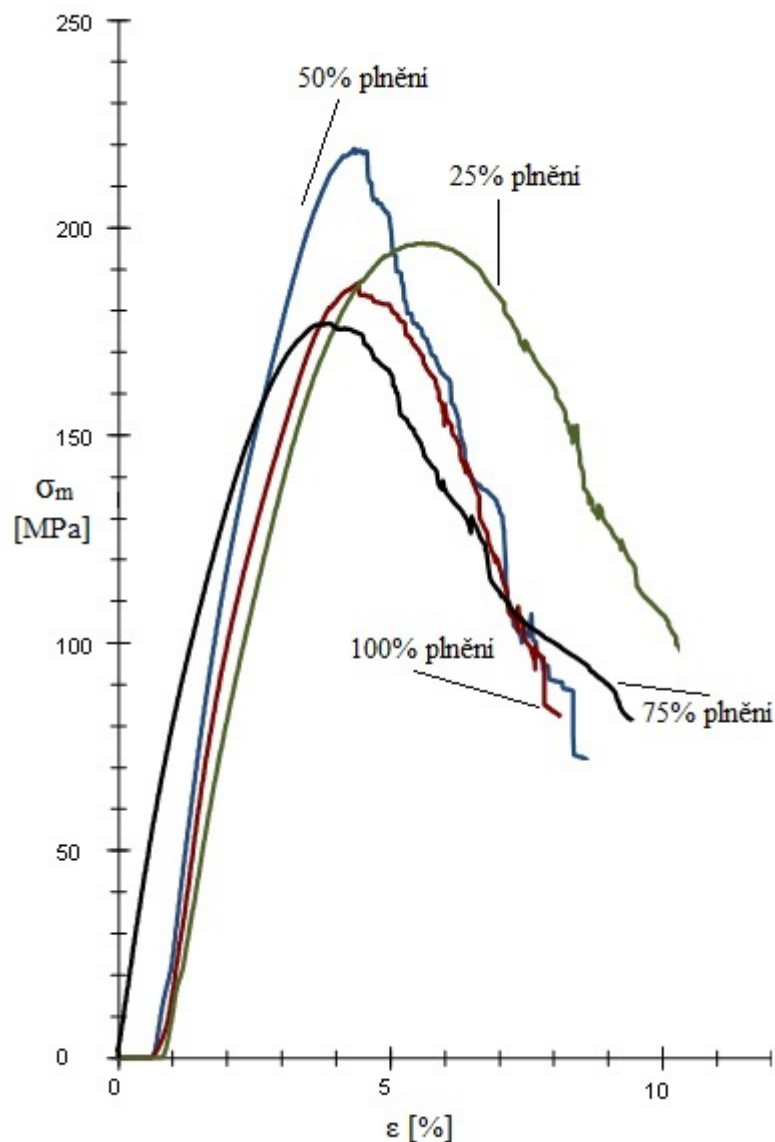
Obr. 40 Grafický záznam typických hodnot tříbodové ohybové zkoušky 100 hm. % plnění

Tab. 11 Výsledky tříbodové ohybové zkoušky 100 hm. % plnění

	a [mm]	b [mm]	$\sigma_m$ [MPa]	$\varepsilon$ [%]	E [MPa]
1	2,5	24,9	173,85	4,43	10021,82
2	2,7	25,3	194,04	4,95	10033,8
3	2,4	24,3	170,78	3,85	10685,55
4	2,9	25,6	215,35	4,53	12361,15
5	3	23,7	188,33	4,45	10661,59
6	2,9	26,9	195,49	5,14	9142,01
7	2,8	24,1	208	4,45	12355,62
8	2,8	24,1	172,24	4,96	8703,45
9	2,7	23,7	181,79	4,8	9313,22
10	2,5	22,5	188,69	4,43	10365,55
$\bar{X}$	2,72	24,51	188,86	4,6	10364,38
s	0,1989	1,221	14,97	0,37	1235,05
v	7,31	4,98	7,93	8,11	11,92



Obr. 41 Vzorky po provedené zkoušce ohybem



Obr. 42 Porovnání průměrných hodnot všech vybraných vzorků při tříbodové ohybové zkoušce (závislost maximální dosažené napětí v ohybu  $\sigma_m$  na poměrné prodloužení  $\epsilon$ )

Z odečtených sil ze zkoušky ohybem program TestXpert vyhodnotil pro naměřené hodnoty aritmetický průměr, směrodatnou odchylku a variační koeficient.

Z každé série byl vybrán grafický záznam typických hodnot ohybové zkoušky v závislosti maximální dosažené napětí v ohybu  $\sigma_m$  na poměrné prodloužení  $\epsilon$ , který vyhodnotil program TestXpert. Na závěr bylo provedeno grafické porovnání průměrných hodnot všech vzorků čtyř sérií.

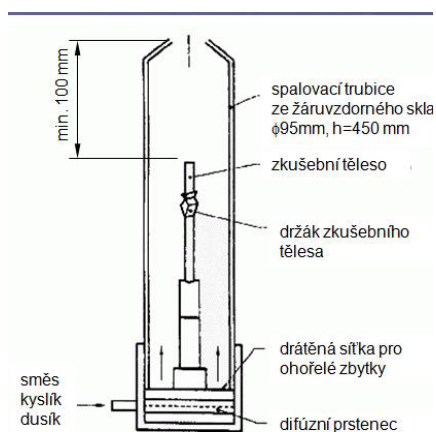
## 10.3 Zkoušení hořlavosti

### 10.3.1 Metoda stanovení kyslíkového čísla „LOI“ (ČSN ISO 4589-2)

#### Kyslíkové číslo:

je minimální koncentrace kyslíku v proudu směsi s dusíkem (v objemových %), kdy bude podporováno hoření polymeru ve vertikální poloze po dobu 3 minut.

(např. pro PTFE je LOI > 90%).



Obr. 43 Ukázka zkoušky metodou kyslíkového čísla „LOI“

## ČSN EN ISO 4589 – 1 Plasty - Stanovení hořlavosti metodou kyslíkového čísla

### Návod k aplikaci zkoušek

Tato první část mezinárodní normy (ČSN EN) ISO 4589 představuje průvodní dokument pro hodnocení hořlavosti metodou kyslíkového čísla. Poskytuje uživateli instrukce, jak používat zkušební metody popsané v částech 2 a 3. Zkouška je určena pro plasty o maximální tloušťce 10,5 mm. Kyslíkové číslo udává limitní koncentraci kyslíku ve směsi s dusíkem, při níž zkoušený materiál ještě hoří.

### Postup měření

Zkušební těleso se připevní do stojanu, tak aby se nacházelo ve vertikální poloze a zároveň po opětovném nasazení skleněné trubice v jejím středu. Horní vrchol zkušebního tělesa se

musí nacházet nejméně 100 mm pod otvorem příklopné redukce horního konce trubice, která zajišťuje průtok výchozích plynů min. 90 mm/s, a spodní vrchol nejméně 100 mm nad dnem s rozptylovacím zařízením plynu, které zajišťuje rovnoměrné rozptýlení směsi kyslíku s dusíkem vstupující do trubice. Pomocí regulačních ventilů se nastaví průtok kyslíku a dusíku odpovídající zvolené hodnotě kyslíkového čísla dle tabulky. Hodnotu průtoku kyslíku ukazuje na pravém průtokoměru vrchol tmavé skleněné kuličky a hodnotu průtoku dusíku na levém průtokoměru vrchol stříbrné ocelové kuličky. Zkušební těleso se ponechá za účelem pročištění v proudu směsi kyslíku s dusíkem o zvolené konstantní koncentraci nejméně 30 s a teprve poté se zapálí jednou z metod dle ČSN ISO 4589-2 („metoda A“ - zapálení na horním povrchu nebo „metoda B“ - zapálení podporující vertikální hoření). Předem zvolený konstantní průtok a složení směsi kyslíku s dusíkem udržuje se po celou dobu zapalování a měření. Po odhoření 50 mm (tělesa typu I, II, III, IV a VI dle ČSN ISO 4589-2) nebo 80 mm (těleso typu V dle ČSN ISO 4589-2) délky zkušební tělesa, pokud doba hoření dosáhne 360 s nebo pokud proces hoření ustane před dosažením zmíněných kritérií se zaznamenají sledované hodnoty (délka prohoření a doba hoření) a regulačními ventily se zastaví přívod plynů. Za účelem zabránění dalšího prohořívání zkušební tělesa se nejprve uzavírá přívod kyslíku, popř. se následně krátkodobě zvýší přívod dusíku. [31]

Tab. 12 Výsledné hodnoty stanovení kyslíkového čísla

č.vz.	Matri- ce/Gelcoat	Výztuž	Plnivo	Iničiační systém	Temperace	Výsledek
1	Norester 880	1xUnifillo 300 g/m <sup>2</sup> 2xSaertex 980 g/m <sup>2</sup> bidiago- nal	25 % Marti- nal ON 904	Butanox M-50 1- 2 %	60°C/6 hod	25,5
2	Norester 880	1xUnifillo 300 g/m <sup>2</sup> 2xSaertex 980 g/m <sup>2</sup> bidiago- nal	50 % Marti- nal ON 904	Butanox M-50 1- 2 %	60°C/6 hod	34
3	Norester 880	1xUnifillo 300 g/m <sup>2</sup> 2xSaertex 980 g/m <sup>2</sup> bidiago- nal	75 % Marti- nal ON 904	Butanox M-50 1- 2 %	60°C/6 hod	39
4	Norester 880	1xUnifillo 300 g/m <sup>2</sup> 2xSaertex 980 g/m <sup>2</sup> bidiago- nal	100 % Mar- tinal ON 904	Butanox M-50 1- 2 %	60°C/6 hod	43,6
5	Norester 880	-	0 % Martinal ON 904	Butanox M-50 2 %	60°C/6 hod	17,2
6	Norester 880	-	25 % Marti- nal ON 904	Butanox M-50 2 %	60°C/6 hod	24,8
7	Norester 880	-	50 % Marti- nal ON 904	Butanox M-50 2 %	60°C/6 hod	32,1
8	Norester 880	-	75 % Marti- nal ON 904	Butanox M-50 2 %	60°C/6 hod	34,7
9	Norester 880	-	100 % Mar- tinal ON 904	Butanox M-50 2 %	60°C/6 hod	38,6
10	Norester 880	-	125 % Mar- tinal ON 904	Butanox M-50 2 %	60°C/6 hod	40,4
11	Norester 880	-	150 % Mar- tinal ON 904	Butanox M-50 2 %	60°C/6 hod	42,9

## 10.4 Stanovení viskozity na přístroji Brookfield LFV

Podmínky testu: Norma ČSN ISO 2555 (64 0346). Plasty - Pryskyřice v kapalném, emulgovaném nebo dis-pergovaném stavu – Stanovení zdánlivé viskozity podle Brookfielda.

- Typ viskozimetru A
- Vřeteno číslo 3
- Počet otáček  $30 \text{ min}^{-1}$  ,  $60 \text{ min}^{-1}$
- Teplota zkušebních vzorků  $25 \text{ }^\circ\text{C}$

Viskozimetr s ochranným třmínkem se upevní do stojanu. Kádinka (o průměru 90 mm až 92 mm a výšce 115 mm až 160 mm) se naplní zkoušeným vzorkem tak, aby pokud možno nebyly vmíchány vzduchové bubliny. Potom se vloží do lázně na dobu do-statečnou k dosažení požadované teploty (doporučuje se 23, 25, 40, 55, 70, 85 a  $100 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Pokud vzorek obsahuje těkavé látky nebo je hydroskopický, během zkoušky se uzavírá těsnícím víčkem. Do kádinky, umístěné v temperanční lázni, se pomalu pod úhlem asi  $45^\circ$  ponoří vřeteno. Poloha vřetene se změní na vertikální a jeho hřídel se upevní do přístroje. Pomocí vodováhy se ověří svislá poloha vřetene a zajistí se, aby jeho spodní okraj byl nejméně 10 mm nade dnem kádinky a zároveň bylo ponořeno po spodní okraj značky na hřídeli. Do zkoušeného vzorku se pak ponoří teploměr. Po ustálení teploty v požadovaném rozsahu se spustí motor a míchá se při požadované rychlosti otáčení. Po dosažení stabilní hodnoty se ukazatel měřidla zablokuje a zaznamená se příslušný údaj. Motor se znovu spustí a provede se další měření. Po každém měření se vřeteno vyjme z přístroje a řádně se omyje ve vhodném rozpouštědle. [31]



Obr. 44 Brookfield viskozimetr [31]

Měření viskozity se provádělo z důvodu zjištění vlivu redukovadla viskozity (tech. ozn. BYK 966) na pryskyřici (tech. ozn. Norester 880), plněnou z 25%, 50%, 75% a 100% retardérem hoření ATH (tech. ozn. Martinal ON 904). Pomocí měření viskozity byly zjištěny rozdíly mezi viskozitou u vzorků ovlivněných přidavkem redukovadla viskozity a vzorků bez přidavku redukovadla.

Tab. 13 Zastoupení jednotlivých složek

č. vzorku	Koncentrace [%]	Pryskyřice [g]	Plnivo [g]	Redukovadlo [g]
1	25	50,222	12,555	
2	50	50,187	25,09	
3	75	50,45	37,522	
4	100	50,01	50,01	
5	25	50,44	12,6	0,25
6	50	50,9	25,4	0,51
7	75	50,8	38,1	0,76
8	100	50,01	50,01	1

Příprava vzorků proběhla smísením  $50 \text{ g} \pm 1 \text{ g}$  pryskyřice s požadovanou koncentrací plniva, tedy přidáním 25%, 50%, 75% a 100% retardérů hoření ATH (tech. ozn. Martinal ON 904), kdy takto byly vyrobeny dvě sady vzorků po 4 ks s výše uvedeným plněním. Do jedné sady bylo následně přidáno redukovadlo viskozity, které činilo 2% z použitého plniva.

#### **Použité koncentrace plniva:**

pryskyřice + 25% plniva

pryskyřice + 50% plniva

pryskyřice + 75% plniva

pryskyřice + 100% plniva

pryskyřice + 25% plniva + 2% redukovadla viskozity

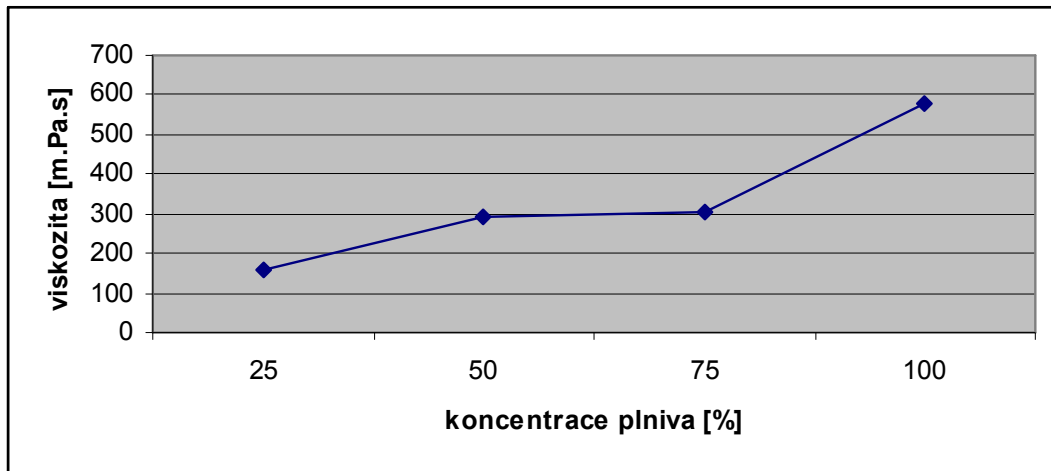
pryskyřice + 50% plniva + 2% redukovadla viskozity

pryskyřice + 75% plniva + 2% redukovadla viskozity

pryskyřice + 100% plniva + 2% redukovadla viskozity

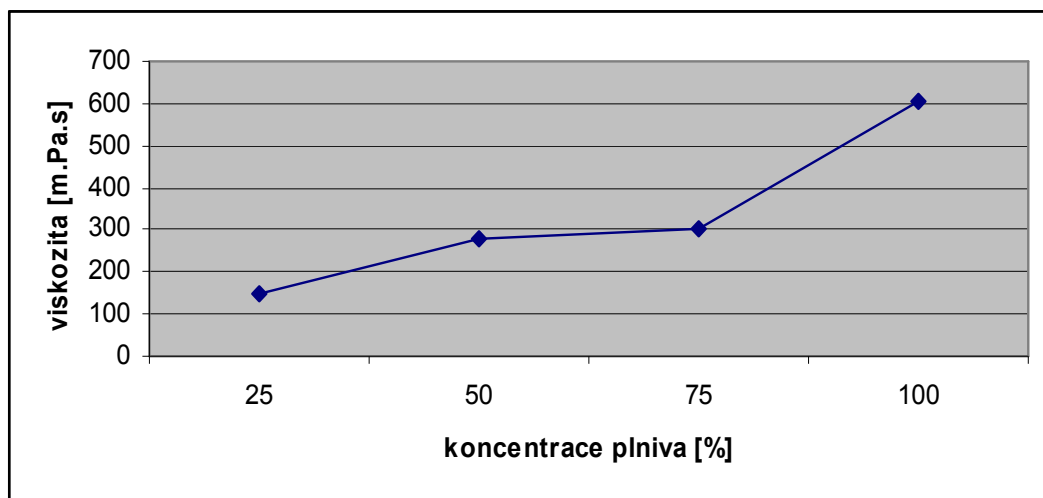


#### 10.4.1 Stanovení viskozity bez přísady redukovadla viskozity



Obr. 45 Zkouška vzorků bez přísady redukovadla viskozity

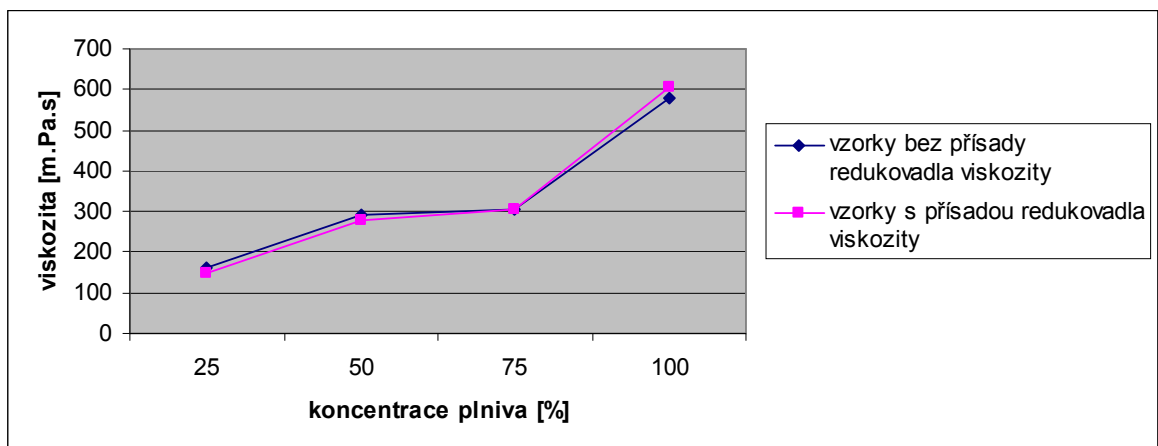
#### 10.4.2 Stanovení viskozity s přísadou redukovadla viskozity



Obr. 46 Zkouška vzorků s přísadou redukovadla viskozity

Tab. 14 Výsledky provedené zkoušky

č. v.	koncentra- ce [%]	ot/min	měření 1	měření 2	Průměr měření 1, 2	Viskozita [m.Pa.s]	koefici- ent
1	25	30	4	4	4	<b>160</b>	40
2	50	60	14,5	14,5	14,5	<b>290</b>	20
3	75	60	15	15,5	15,25	<b>305</b>	20
4	100	60	28	30	29	<b>580</b>	20
5	25	30	4	3,5	3,75	<b>150</b>	40
6	50	60	14	13,8	13,9	<b>278</b>	20
7	75	60	15	15,5	15,25	<b>305</b>	20
8	100	60	30	30,5	30,25	<b>605</b>	20

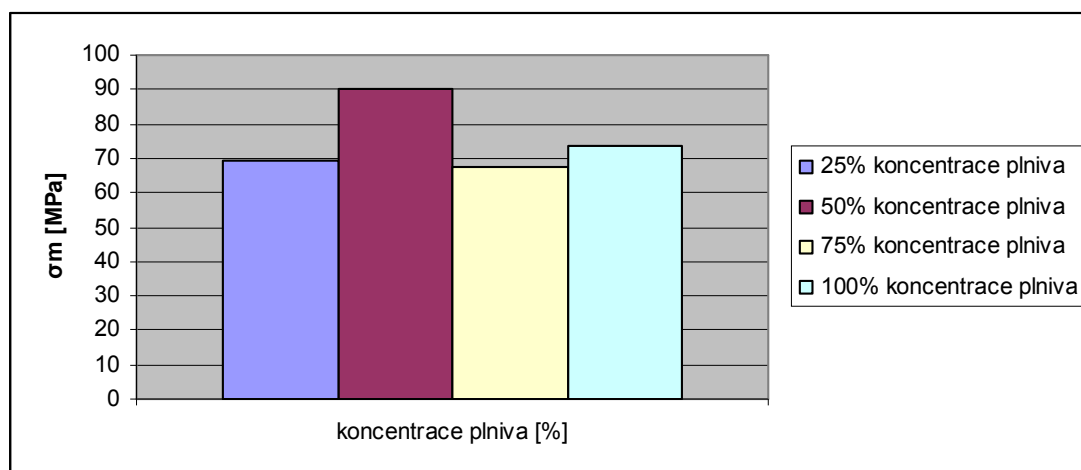


Obr. 47 Porovnání výsledků

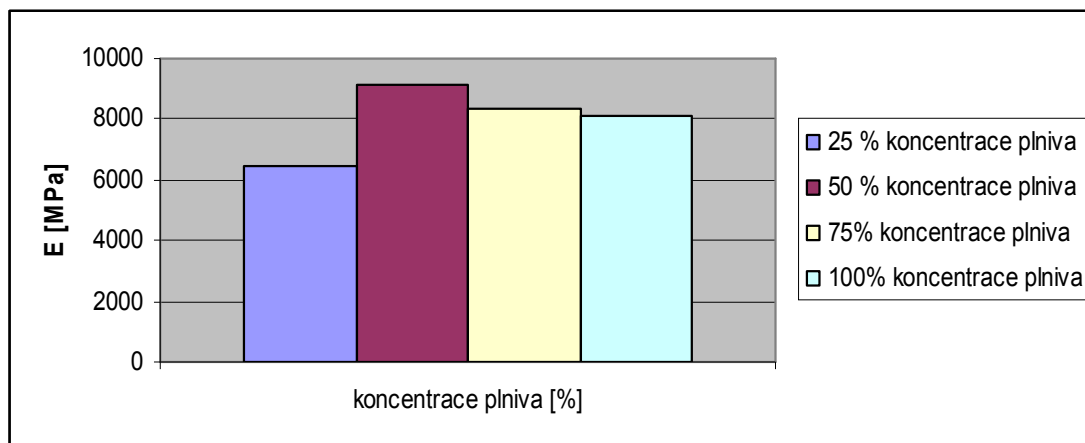
## 11 ZÁVĚR

Plněné kompozitní materiály nacházejí svoje uplatnění v dopravním průmyslu, kde se jako plniva ke snížení hořlavosti používají různé typy retardérů hoření (např. ATH – Martinal ON 904, Exolit 740). Se zvyšujícím se stupněm plnění, se splňují nejpřísnější požadavky na nehořlavost, ale pevnostní vlastnosti se výrazně snižují. Proto se v praxi musí hledat nejoptimálnější složení kompozitního materiálu, a to s ohledem na správnou volbu pryskyřice, jejího plnění, vhodného plniva a skladby vyztužujících materiálů. Všechny tyto složky významně ovlivňují jak mechanické tak i fyzikální vlastnosti.

V experimentální části jsme vyhodnocovali vliv plnění akrylátové pryskyřice Norester 880 retardérem hoření ATH v 25, 50, 75 a 100 hm. % na hodnotu napětí v tahu a modul pružnosti E. Z naměřených výsledků můžeme konstatovat, že při 50 hm. % plnění je nejvyšší průměrná pevnost v tahu  $\sigma_m = 90,11$  MPa, naopak při 75 hm. % plnění je nejnižší průměrná pevnost v tahu  $\sigma_m = 67,33$  MPa. Hodnota modulu pružnosti v tahu E dosáhla nejvyšší hodnoty také při 50 hm. % plnění, a to  $E = 5768,21$  MPa. Nejnižší hodnota byla naměřena v případě 25 hm. % plnění, a to  $E = 4216,5$  MPa.

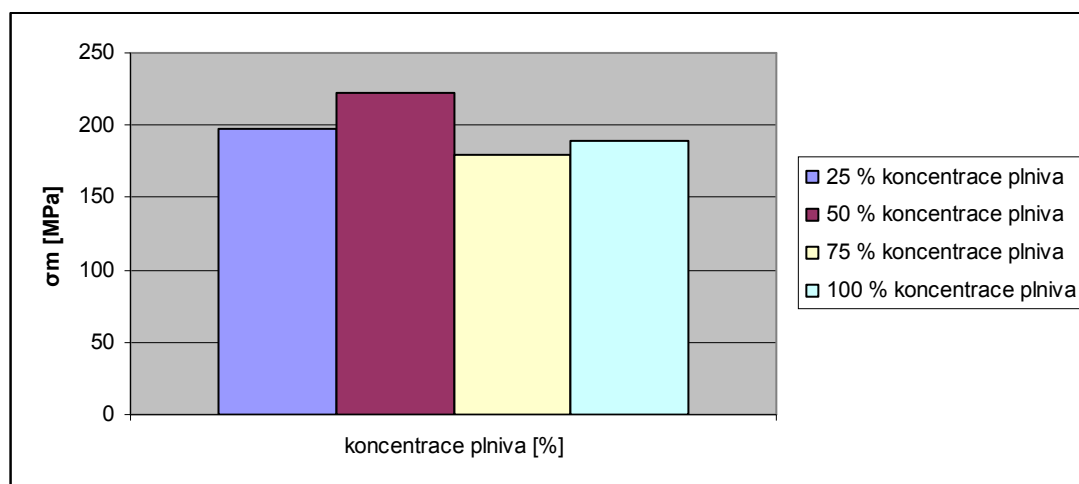


Obr. 48 Porovnání průměrných hodnot maximálního dosaženého napětí v tahu  $\sigma_m$  všech vybraných vzorků tahové zkoušky



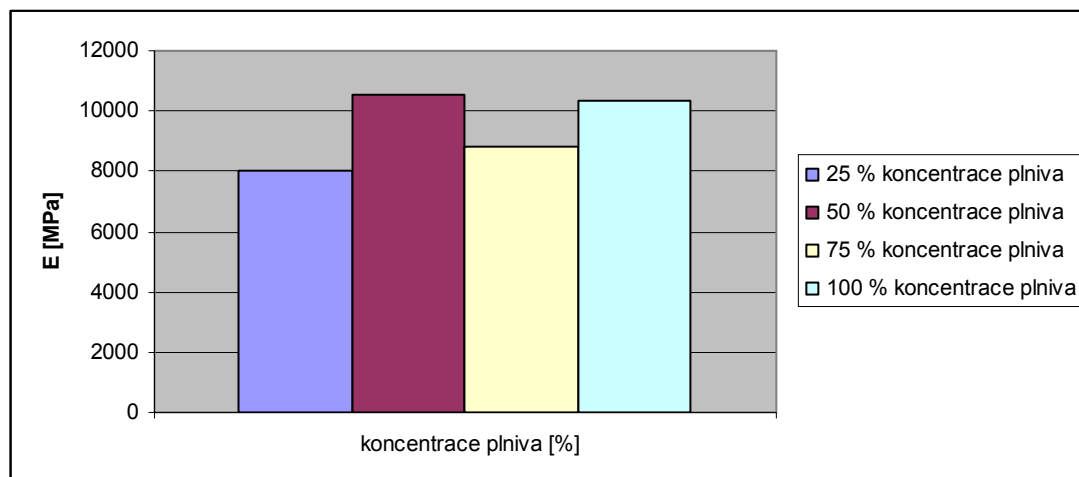
Obr. 49 Porovnání průměrných hodnot modulu pružnosti  $E$  všech vybraných vzorků tahové zkoušky

Při stanovování ohybových vlastností plněných kompozitních materiálů jsme vyhodnotili průměrné hodnoty pro napětí v ohybu  $\sigma_m$  a modul pružnosti v ohybu  $E$ . Nejvyšší průměrné hodnoty napětí v ohybu dosáhl vzorek s 25 hm. % plněním,  $\sigma_m = 197,29$  MPa. Nejnižší průměrnou hodnotu napětí v ohybu vykazoval vzorek se 75 hm. % plnění  $\sigma_m = 179,07$  MPa (viz. obr. 48).



Obr. 50 Porovnání průměrných hodnot maximálního dosaženého napětí v ohybu  $\sigma_m$  všech vybraných vzorků ohybové zkoušky

Modul pružnosti v ohybu  $E$  dosáhl nejvyšší průměrnou hodnotu při 50 hm. % plnění,  $E = 10547,89$  MPa, nejnižší průměrná hodnota modulu pružnosti v ohybu byla naměřena při 25 hm. % plnění,  $E = 7993,84$  MPa (viz. obr. 49).



Obr. 51 Porovnání průměrných hodnot modulu pružnosti  $E$  všech vybraných vzorků ohybové zkoušky

Z naměřených výsledků viskozity vyplývá, že změřené vzorky s 25% a 50% plněním, do kterých bylo přidáno redukovadlo viskozity, vykazují nižší viskozitu oproti vzorkům, do kterých toto redukovadlo přidáno nebylo, v případě 75% plnění jsou výsledky totožné a v případě 100% plnění s přidáním redukovadlo viskozity došlo k nárustu viskozity o 25 m.Pa.s. Podle technického listu (Příloha 1) je viskozita dle Brookfielda (ISO 2555 - 25°C – sp2) při 50 ot/min. je 90 – 105 m.Pa.s. Zvyšujícím obsahu plniva pryskyřic se zvyšuje viskozita, která je limitující zejména při technologii RTM a je daná technickými parametry dávkovacího zařízení RTM míchací hlavy.

Při stanovení hořlavosti metodou kyslíkového, které bylo naměřené ve spolupráci s výzkumným ústavem SYNPO a.s., dle normy (ČSN EN) ISO 4589 jsme stanovili hodnoty LOI pro pryskyřici se stanovenou výztuží s 25 hm. %, 50 hm. %, 75 hm. %, 100 hm. % plněním a taktéž pro nevyztuženou pryskyřici plněnou různým hm. % plnění (viz. tab. 16).

Tab. 15 Porovnání vlastností vybraných pryskyřic

Produkt/ výrobce	Techno- logie	Pevnost v tahu při 25% [MPa]	Pevnost v ohybu při 25% [MPa]	ATH [%]	Viskozita [m.Pa.s]	Samozháši- vost dle NF P 92- 501	Samoz- hášivost dle DIN 5510
Norester 880 Nordcom- posites	RTM	69,53	197,29	100	580	M1	S4
Modar 17% Ashland	RTM	93	178	100	300	M2	S4
Leda R.806 Leda	Ruční lamina- ce	85	217	-	1200	M1	S4

Stanovení LOI slouží jako orientační zkouška pro zařazení materiálů podle různých evropských norem v dopravním průmyslu nebo ve stavebnictví (viz. tab. 15).

Tab. 16 Normy v jednotlivých zemích při splnění rozsahu LOI

ASTM 2863 Oxy- gen index LOI(Low) LOI(High)	UK BS 476 Part 6,7	Germany 4102 5510	France NF P 92-501	USA ASTM E84 UL94 UL94	Euroclass Single Bur- ning 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	>10 0 1 3	D/E
19 ↔ 22	Class 4	—	—	M5	>10 0 2 4	—

Vzorek se 100 hm. % ATH na 100 hm. % pryskyřice Noresteru 880 vyztužené Unifillem a bi-diagonální tkaninou 998g/cm<sup>3</sup> Saertex splňuje nejpřísnější stupeň Francouzské (NF P 92-501) M1 a stupeň Německé normy (DIN 5010) stupeň S4, kdy tento vzorek dosáhl hodnotu kyslíkového čísla v intervale od 41-50, konkrétně byl výsledek 43,6.

Vzorek se 100 hm. % ATH na 100 hm. % pryskyřice Noresteru 880 bez výztuže splňoval dle Německé normy (DIN 5010) stupeň S4, kdy tento vzorek dosáhl hodnotu kyslíkového čísla v intervale od 34,5-41, konkrétně byl výsledek 38,6.

Z naměřených výsledků můžeme konstatovat, že správná volba ale i celkové množství výztužného materiálu může zvýšit hodnotu kyslíkového čísla a zařadit materiál do kategorií v rámci jednotlivých evropských norem, které jsou nejpřísnější. Konkrétně vzorky, které obsahovaly sklo, měli lepší kyslíkové číslo, u vzorku plněného 100 % Martinal ON 904 bylo kyslíkové číslo vyšší nejméně a to o 13 %.

Pro porovnání základních vlastností jsme zvolili jako etalony podobné pryskyřice jako je testovaná pryskyřice Norester 880, Modar 835 S CS od výrobce Ashland a pryskyřici Leda R-806 od výrobce LEDA, Itálie. Oba typy pryskyřice jsou modifikované pryskyřice na bázi metylmetakrylátu, respektive kombinaci styrenu a metylmetakrylátu. Pryskyřice Modar je určena pro RTM, pryskyřice Leda je určena pro ruční laminaci.

Z hlediska porovnání vybrané pryskyřice v kombinaci s definovanými vyztužujícími materiály můžeme konstatovat, že tento systém má podobné vlastnosti jako obdobné komerční systémy. Hodnoty samozhášivosti dosahují podobné vlastnosti nebo mírně vyšší s porovnáním s pryskyřicí Modar, resp. Leda. Taktéž napětí v ohybu je v porovnání s pryskyřicí Modar větší o 11 %. Náš vybraný systém zaostává v parametru pevnosti v tahu, což je způsobeno pravděpodobně vybraným směrem namáhání vzhledem k orientaci bi-diagonální tkaniny (namáhání proběhlo ve směru 90 stupňů). Taktéž hodnota viskozity je vyšší s porovnáním s pryskyřicí Modar, která je určena taktéž pro RTM aplikaci. Zvoleným typem redukovadla viskozity se nám nepovedlo výrazně snížit viskozitu. V budoucnosti je nutné zvolit a otestovat jiný typ redukovadla viskozity.

Taktéž pro zlepšení mechanických vlastností je nutno v budoucnu odzkoušet jiné typy výztuží (většinou na bázi skla), případně čediče, tak, abychom pozitivně ovlivnili mechanické vlastnosti materiálu. Taktéž je nutné volit vyztužující materiály s ohledem na RTM technologii, kdy určité typy materiálu, např. uniconform, nebo rovicor, které zabezpečují tok prys-

kyřice v dutině formy a zároveň přispívají k zvýšení mechanických nebo fyzikálních vlastností (samozhášivost).



**SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY**

- [1] EHRENSTEIN, G. W. Polymerní kompozitní materiály. Vyd. 1. Praha: Scientia, 2009, 351 s. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [2] JANČÁŘ, J. Úvod do materiálového inženýrství polymerních kompozitů. Vyd. 1. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, 2003 dostupné z WWW: <<http://wood.mendelu.cz/cz/sections/Props/?q=filebrowser/MVD/Jancar+-+Uvod+do+materialoveho+inzenyrstvi+kompozitu>>.
- [3] MACHEK V., SODOMKA J. Polymery a kompozity s polymerní matricí, Nauka o materiálu, 4. část. Vyd. Vysoké učení technické v Praze, 2008
- [4] LIPTÁKOVÁ, T.; ALEXY, P.; GONDÁR, E.; KHUNOVÁ, V. Polymérne technické materiály : Vysokoškolská učebnica pre technické smery [online]. [s.l.] : [s.n.], 2009. Dostupné z WWW: <[http://kmi2.uniza.sk/?page\\_id=162](http://kmi2.uniza.sk/?page_id=162)>.
- [5] KORÍNEK, Z.: Kompozity. Dostupné z WWW: <<http://www.volny.cz/zkorinek/>>
- [6] Rusnáková, S., Vlastnosti kompozitních materiálů, přednášky
- [7] BAREŠ, R. A.: Kompozitní materiály. SNTL Praha, 325 s, 1988.
- [8] KOLAŘÍK J., Kompozitní polymerní materiály, Ediční středisko VŠCHT, Nové materiály, Centrum materiálového inženýrství, Vysoká škola chemicko-technologická, Technická 5, Praha 6, 1991, ISBN 80-7080-098-4, 208 stran.
- [9] DUCHÁČEK V.: Polymery – výroba, vlastnosti, zpracování, použití. 2. vyd., Vysoká škola chemicko-technická v Praze, Praha 2006, ISBN 80-7080-617-6.
- [10] LAŠ, Vladislav. Mechanika kompozitních materiálů. 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2004. 156 s. ISBN 80-7043-273-X.
- [11] Agarwal, B. D., Broutman, L. J. *Vláknové kompozity*. Praha: SNTL, 1987.
- [12] KOŠŤÁKOVÁ E., OCHERETNA L. Nanovlákná a možnosti jejich uplatnění v kompozitních materiálech, XIX. konference PRYSKYŘICE 2005.
- [13] DAĐOUREK Karel. Kompozitní materiály - druhy a jejich využití. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2007.

- [14] <http://www.havel-composites.com/clanky/4-Technologie/76-Technologie-jejich-popis-a-schemata.html>
- [15] Mechanické vlastnosti polymerů [online]. Dostupné z WWW: <<http://beltplast.cz/>>.
- [16] JARUŠEK, J. *Metody zkoumání polymerů*. VŠCHT Pardubice, 1984.
- [17] Technická norma: ČSN EN ISO 527-4
- [18] Technická norma: ČSN EN ISO 14125
- [19] [http://www.stefanmichna.com/download/technicke-materialy\\_II/kompozitni\\_materialy.pdf](http://www.stefanmichna.com/download/technicke-materialy_II/kompozitni_materialy.pdf)
- [20] [http://www.csm-kompozity.wz.cz/Vyvoj\\_kompozitu.pdf](http://www.csm-kompozity.wz.cz/Vyvoj_kompozitu.pdf)
- [21] Flame retardants [online], [cit. 2009-3-8]. Dostupný z WWW: [http://www.albemarle.com/Products\\_and\\_services/Polymer\\_additives/Flame\\_retardants/](http://www.albemarle.com/Products_and_services/Polymer_additives/Flame_retardants/)
- [22] <http://www.gdpkoral.cz/UserFiles/File/PDF-design-manual/kompozity.pdf>
- [23] <http://delta.fme.vutbr.cz/mikromechanika/kompozityA4.pdf>
- [24] [http://ateam.zcu.cz/download/kompozity09\\_10.pdf](http://ateam.zcu.cz/download/kompozity09_10.pdf)
- [25] Technický list, pryskyřice R.806, dostupné z WWW: <<http://www.arelis.com/>>.
- [26] Technický list, pryskyřice MODAR, dostupné z WWW: <<http://ashchen.com/>>.
- [27] Technická příručka: DION FR, FIRE RETARDANT SYSTEMS, dostupné z WWW: <<http://reichhold.com/>>.
- [28] Additive guide, BYK CHEMIE, dostupné z WWW: <<http://www.byk-chemie.com/>>.
- [29] LINHART, K., Retardéry hoření, Gabriel-Chemie Bohemia. Dostupný z WWW: <http://www.industry-eu.cz/novinky/9421.pdf> (10.3.2010).
- [30] [http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/stud\\_materialy/vip/horlavost.pdf](http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/stud_materialy/vip/horlavost.pdf)
- [31] Norma ČSN ISO 2555 (64 0346). Plasty - Pryskyřice v kapalném, emulgovaném nebo dispergovaném stavu – Stanovení zdánlivé viskozity podle Brookfielda.

## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbol	Jednotka	Význam
A	[%]	tažnost
E	[MPa]	modul pružnosti
F	[N]	maximální sílu dosaženou při přetrhnutí
a	[mm]	tloušťka zkušebního tělesa
b	[mm]	šířka zkušebního tělesa
s	[-]	směrodatná odchylka
$\sigma_{o\max}$	[MPa]	maximální ohybové napětí
$\varepsilon$	[%]	poměrná deformace
$\varepsilon_{Rm}$	[%]	poměrná deformace při max. napětí
$\bar{X}$	[-]	aritmetický průměr
$\sigma_m$	[MPa]	maximální dosažené napětí
$\sigma_B$	[MPa]	napětí při přetržení
$\varepsilon_{FMAX}$	[%]	poměrná deformace při maximálním zatížení
$\sigma$	[MPa]	napětí
$\nu$	[ $m^2 \cdot s^{-1}$ ]	dynamická viskozita
$\varphi$	[-]	tekutost
$\tau$	[-]	vnitřní tření
v	[-]	variační koeficient
Mg(OH) <sub>2</sub>		hydroxid hořečnatý
Al(OH) <sub>3</sub>		hydroxid hlinitý
RTM		metoda lisování se vstřikem matrice
ATH		hydroxid hlinitý
PAC		polychlorid draselný

---

PA		polyamid
L	[mm]	vzdálenost podpěr
PP		polypropylen
VE		vinylesterová pryskyřice
EP		epoxidová pryskyřice
y	[mm]	průhyb
$e_{\max}$	[mm]	vzdálenost nejkrajnějšího vlákna profilu
UP		polyesterová pryskyřice
$\varepsilon_S$	[-]	poměr relativního zúžení
$M_{o\max}$	[N.mm]	maximální ohybový moment
$\varepsilon_B$	[%]	poměrné prodloužení při přetrhnutí
$J_z$	[mm <sup>4</sup> ]	kvadratický moment průřezu profilu
MEKP		methylethylketonperoxide

## SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1 Schéma rozdělení kompozitů [10]</i> .....	14
<i>Obr. 2 Schéma výroby skleněných vláken [13]</i> .....	20
<i>Obr. 3 Technologie ručního kladení [6]</i> .....	25
<i>Obr. 4 Technologie navíjení [5]</i> .....	28
<i>Obr. 5 Technologie nanášení kompozitu do formy sprejem [5]</i> .....	29
<i>Obr. 6 Technologie vysokotlakého nanášení [14]</i> .....	30
<i>Obr. 7 Schéma výroby pultruzí [1]</i> .....	32
<i>Obr. 8 Technologie kontinuálního laminování [1]</i> .....	33
<i>Obr. 9 Technologie odstředivého lití [1]</i> .....	34
<i>Obr. 10 Celokompozitní trup dopravního letadla [6]</i> .....	35
<i>Obr. 11 Automobil Koenigsegg ccx s karoserií z uhlíkových vláken [6]</i> .....	36
<i>Obr. 12 Regata švédské armády s technologií stealth [6]</i> .....	36
<i>Obr. 13 Endoprotéza [6]</i> .....	37
<i>Obr. 14 Lopatky větrných elektráren [6]</i> .....	38
<i>Obr. 15 Stíhací letadlo Stealth F117 US Army s kompozitním pláštěm [6]</i> .....	39
<i>Obr. 16 Kevlarová vesta</i> .....	39
<i>Obr. 17 Kevlarová helma</i> .....	40
<i>Obr. 18 Fotbalový stadion Allianz aréna v Mnichově [6]</i> .....	41
<i>Obr. 19 Kompozitní profil [6]</i> .....	41
<i>Obr. 20 Tahové křivky pro různé materiály</i> .....	44
<i>Obr. 21 Normované zkušební těleso</i> .....	45
<i>Obr. 22 Schéma provedení tříbodové ohybové zkoušky [16]</i> .....	46
<i>Obr. 23 Ukázka zkoušky metodou kyslíkového čísla „LOI“ [30]</i> .....	50
<i>Obr. 24 Ukázka uspořádání testovací metody UL 94 [30]</i> .....	52
<i>Obr. 25 Princip technologie RTM [6]</i> .....	58
<i>Obr. 26 Pohledy na RTM formu a výztužné materiály</i> .....	58
<i>Obr. 27 Ukázka retardéru hoření ATH [21]</i> .....	59
<i>Obr. 28 Principiální schéma multiaxiální tkaniny [25]</i> .....	61
<i>Obr. 29 Závislost viskozity na obsahu plniva s redukovadlem BYK 966 a bez redukovadla [28]</i> .....	61
<i>Obr. 30 Zkušební stroj Zwick 1456</i> .....	62

<i>Obr. 31 Grafický záznam typických hodnot tahové zkoušky 25 hm. % plnění</i> .....	64
<i>Obr. 32 Grafický záznam typických hodnot tahové zkoušky 50 hm. % plnění</i> .....	65
<i>Obr. 33 Grafický záznam typických hodnot tahové zkoušky 75 hm. % plnění</i> .....	66
<i>Obr. 34 Grafický záznam typických hodnot tahové zkoušky 100 hm. % plnění</i> .....	67
<i>Obr. 35 Vzorky po zkoušce tahem</i> .....	68
<i>Obr. 36 Porovnání průměrných hodnot všech vybraných vzorků při tahové zkoušce</i> .....	69
<i>Obr. 37 Grafický záznam typických hodnot tříbodové ohybové zkoušky 25 hm. % plnění</i> .....	70
<i>Obr. 38 Grafický záznam typických hodnot tříbodové ohybové zkoušky 50 hm. % plnění</i> .....	71
<i>Obr. 39 Grafický záznam typických hodnot tříbodové ohybové zkoušky 75 hm. % plnění</i> .....	72
<i>Obr. 40 Grafický záznam typických hodnot tříbodové ohybové zkoušky 100 hm. % plnění</i> .....	73
<i>Obr. 41 Vzorky po provedené zkoušce ohybem</i> .....	74
<i>Obr. 42 Porovnání průměrných hodnot všech vybraných vzorků při tříbodové ohybové zkoušce (závislost maximální dosažené napětí v ohybu <math>\sigma_m</math> na poměrné prodloužení <math>\epsilon</math>)</i> .....	75
<i>Obr. 43 Ukázka zkoušky metodou kyslíkového čísla „LOI“</i> .....	76
<i>Obr. 44 Brookfield viskozimetr [31]</i> .....	79
<i>Obr. 45 Zkouška vzorků bez přísady redukovadla viskozity</i> .....	81
<i>Obr. 46 Zkouška vzorků s přísadou redukovadla viskozity</i> .....	81
<i>Obr. 47 Porovnání výsledků</i> .....	82
<i>Obr. 48 Porovnání průměrných hodnot maximálního dosaženého napětí v tahu <math>\sigma_m</math> všech vybraných vzorků tahové zkoušky</i> .....	83
<i>Obr. 49 Porovnání průměrných hodnot modulu pružnosti E všech vybraných vzorků tahové zkoušky</i> .....	84
<i>Obr. 50 Porovnání průměrných hodnot maximálního dosaženého napětí v ohybu <math>\sigma_m</math> všech vybraných vzorků ohybové zkoušky</i> .....	84
<i>Obr. 51 Porovnání průměrných hodnot modulu pružnosti E všech vybraných vzorků ohybové zkoušky</i> .....	85

**SEZNAM TABULEK**

<i>Tab. 1 Vlastnosti přírodních vláken [5]</i> .....	22
<i>Tab. 2 Fyzikální a chemické vlastnosti retardéru ATH (Hydroxid hlinitý) [21]</i> .....	60
<i>Tab. 3 Vlastnosti pryskyřice Norester 880 bez plniva a s plnivem</i> .....	60
<i>Tab. 4 Výsledky tahové zkoušky 25 hm. % plnění</i> .....	65
<i>Tab. 5 Výsledky tahové zkoušky 50 hm. % plnění</i> .....	66
<i>Tab. 6 Výsledky tahové zkoušky 75 hm. % plnění</i> .....	67
<i>Tab. 7 Výsledky tahové zkoušky 100 hm. % plnění</i> .....	68
<i>Tab. 8 Výsledky třibodové ohybové zkoušky 25 hm. % plnění</i> .....	71
<i>Tab. 9 Výsledky třibodové ohybové zkoušky 50 hm. % plnění</i> .....	72
<i>Tab. 10 Výsledky třibodové ohybové zkoušky 75 hm. % plnění</i> .....	73
<i>Tab. 11 Výsledky třibodové ohybové zkoušky 100 hm. % plnění</i> .....	74
<i>Tab. 12 Výsledné hodnoty stanovení kyslíkového čísla</i> .....	78
<i>Tab. 13 Zastoupení jednotlivých složek</i> .....	80
<i>Tab. 14 Výsledky provedené zkoušky</i> .....	82
<i>Tab. 16 Porovnání vlastností vybraných pryskyřic</i> .....	86
<i>Tab. 15 Normy v jednotlivých zemích při splnění rozsahu LOI</i> .....	86

## SEZNAM PŘÍLOH

Příloha č. 1: Technický list akrylátové pryskyřice Norester 880

Příloha č. 2: Technický list retardéru hoření Martinal ON 904

Příloha č. 3: Technický list bi-diagonální tkaniny Seartex 988 g/m<sup>2</sup>

Příloha č. 4: Technický list rohože Unifilo



# PŘÍLOHA P I: TECHNICKÝ LIST AKRYLÁTOVÉ PRYSKYŘICE

## NORESTER 880



TECHNICAL DATA SHEET

**NORESTER® 880**  
Fire retardant resin  
NTR 188 D – 17/03/2010

### 1 • Characteristics

Norester® 880 resin is an acrylic based resin with a low viscosity specially designed to be blended with alumina trihydrate (ATH) to realise fire resistant laminates.

Norester® 880 resin has the advantage to be able to cure with MEKP peroxide.

From Norester® 880 it is therefore possible according to the ATH rate used and according to the application method of the customer to answer to the different fire and smoke certifications.

- Low viscosity so alumina trihydrate (ATH) can be easily added to produce fire retardant composites. **ATH is needed to provide fire retardant properties.**
- The resin Norester® 880 will cure with MEKP peroxide.
- The resin Norester® 880 RTM will cure with Trigonox 44B peroxide.
- The resin Norester® 880 is without antimony oxide and halogen so composites made with Norester® 880 and ATH have low toxicity values due to the absence of halogens.
- Norester® 880 resin is a no thixotropic and pre accelerated resin.

### 2 • Properties of liquid clear resin R 880 without filler

	Standard version	Addition of 5% of MAM	Addition of 10% of MAM
<b>Brookfield viscosity</b> (ISO2555 - 25°C - sp2) 50 rpm	90 - 105 MPa.s	60 - 75 MPa.s	40 - 45 MPa.s
<b>Solid content</b> (ICON 003)	54 - 56 %	49 - 51 %	44 - 46 %

<b>Geltime</b> (ICON 002) (20°C - 1.5% MEKP on 100 g)	50 - 60 minutes
<b>Geltime</b> (ICON 002) (20°C - 1.5% T44B on 100 g)	20 - 24 minutes for Norester® 880 RTM
<b>Specific gravity</b>	1.11 g/cm <sup>3</sup>

#### IMPORTANT

Information contained in this publication is given in good faith without warranty or guarantee. No liability can be accepted for claims, losses or demands arising out of the contents of this publication. We cannot be responsible for composites made with R 880 if the application conditions specified are not respected. The user must also ensure that his application is appropriate for this product to be used. We assert that the product will meet the specification set out in this data sheet, however, we cannot be responsible for any damage caused by misuse of this product.

NORD COMPOSITES • ZA, route d'Amiens • 80890 CONDE-FOLIE • FRANCE • Tél. : 03 22 31 57 57 • Fax : 03 22 31 86 97

### 3 • Properties of the filled resin R 880

For RTM applications which need a high rate filler (M1 certification), we advise the use of Apyral 30X / Martinal ON921 or Martinal ON904.

For infusion applications, we advise the use of Martinal ON904. With this very thin grade, it is not possible to exceed the rate of 100 parts of ATH for 100 parts of resin R 880 because the viscosity will be too high.

	100 parts R 880 100 parts Martinal ON921	100 parts R 880 100 parts Martinal ON901	100 parts R 880 100 parts Martinal ON904	100 parts R 880 100 parts Apyral 30X
<b>Brookfield viscosity</b> (ISO 2555 - 25°C - sp2) 5 rpm	460 cps	840 cps	482 cps	520 cps
<b>Solid content</b> (ICON 003)	1.517	1.519	1.515	1.530
<b>Geltime</b> 20°C - 1.5% MEKP	40 minutes	50 minutes	45 minutes	41 minutes

- With 150 parts of ATH :

	100 parts R 880 150 parts Martinal ON921	100 parts R 880 150 parts Martinal ON904	100 parts R 880 150 parts Apyral 30X
<b>Viscosity</b> Sp3 - 20°C 50 RPM	890 cps	1698 cps	1000 cps
<b>Specific gravity</b> 20°C - g/cm <sup>3</sup>	1.639	1.636	1.642
<b>Geltime</b> 20°C - 1.5% PMEC	36 minutes	40 minutes	37 minutes

### 4 • Mechanical properties of the cured resin R 880

Composition of the laminate tested:

- 1 Uniconforme OCV 450/500/450
- 1 Multimatt OCV /750g
- 1 roving serge 580g

The laminate has been realised by infusion with 100 parts of resin R 880 and 50 parts of ATH Martinal ON901

### 8 • Post curing

To obtain optimum properties of resistance, the laminate with the resin **Norester® 880** + ATH must be post cured. To accelerate the curing, the laminate must stay at room temperature during 24 hours (from 16°C to 20°C) followed by a post cured of 16 hours at 40°C. It is recommended making the post cure immediately after the maturation period in order to obtain optimum results.

#### IMPORTANT

*Information contained in this publication is given in good faith without warranty or guarantee. No liability can be accepted for claims, losses or demands arising out of the contents of this publication. We cannot be responsible for composites made with R 880 if the application conditions specified are not respected. The user must also ensure that his application is appropriate for this product to be used. We assert that the product will meet the specification set out in this data sheet, however, we cannot be responsible for any damage caused by misuse of this product.*

## 5 • Fire properties

- The resin **Norester® 880** (100 parts of resin **R 880** and 150 parts of ATH) is classified 1AF1 following the Italian Norms UNI 8457 / UNI 9174 and French Norms NF F 16-101 with the gel coat **GC 184** (certificate 1146/09 dated on 23rd September 2009).
- The resin **Norester® 880** (100 parts of resin **R 880** and 100 parts of ATH) is classified M2F1 with the gel coat **GC 880** following the Norms 97507 / NF P 92507 and NF F 16-101 (certificates K030815 dated on 23rd September 2009 and 0906602NS / 0906301TOX dated on 12th September 2009).

As an indication, find below the fire results obtained by NORD COMPOSITES following different structures of laminate :

	<b>R 880 RTM</b>	<b>R 880 RTM / Infusion</b>
<b>Fire Classification required following NFF16-101</b>	M1 (indicative test realised at NORD COMPOSITES)	M2 (indicative test realised at NORD COMPOSITES)
<b>Level of ATH</b>	100 parts of resin and 150 parts of ATH Apyral 30X	100 parts of resin and 75 parts of ATH Martinal ON904
<b>Composition of the laminate</b>	1 multimat S450G500S450 or 1 multimat S200G500S200	1 surface veil 50g/m <sup>2</sup> 3 unicomforme 500 OCV 450/500/450 1 woven roving 500

## 6 • Versions

The resin **Norester® 880** is also formulated for hand lay up application under the reference : **Norester® 880 CONTACT**.

## 7 • Recommendations before use

- We recommend using freshly prepared resin **Norester® 880** mix + ATH to avoid settling of filler.
- The ATH must be added slowly to obtain a homogeneous mixed resin and keep stirring the mix during the complete addition of ATH.
- We recommend for hand lay up version to use Mat 300 g/m<sup>2</sup> and woven Roving. It will require less quantity of resin and it is easier to make the laminate.
- To obtain the polymerisation of the resin **Norester® 880** + ATH, we recommend adding 1% to 2% of MEKP peroxide on the total weight of the mix. Before use, check that the temperature of the product, of the mould and of the room is at 20°C minimum.
- We retain the attention on the fact that this resin is classified according to the certificates mentioned here above and according to the application made in our Laboratory. The customer is responsible to be sure that the moulding made by him is well classified.

## 8 • Post curing

To obtain optimum properties of resistance, the laminate with the resin **Norester® 880** + ATH must be post cured. To accelerate the curing, the laminate must stay at room temperature during 24 hours (from 16°C to 20°C) followed by a post cured of 16 hours at 40°C. It is recommended making the post cure immediately after the maturation period in order to obtain optimum results.

### IMPORTANT

*Information contained in this publication is given in good faith without warranty or guarantee. No liability can be accepted for claims, losses or demands arising out of the contents of this publication. We cannot be responsible for composites made with R 880 if the application conditions specified are not respected. The user must also ensure that his application is appropriate for this product to be used. We assert that the product will meet the specification set out in this data sheet, however, we cannot be responsible for any damage caused by misuse of this product.*



**NORD  
COMPOSITES**

**TECHNICAL DATA SHEET**

**NORESTER® 880**  
Fire retardant resin  
NTR 188 D – 17/03/2010

## 9 • Packaging

Available in can of 25 kg or in drum of 225 kg for resin Norester® 880.  
Available in bags of 25 kg for the fillers Apyral 30X / Martinal ON921

## 10 • Storage conditions and handling

Storage life : Norester® 880 is stable for three months from date of production when stored in the original closed packaging away from direct sunlight at a temperature between 15°C and 25°C.

It is the responsibility of the customer to assure that the product is used in good conditions overall before the date limitation mentioned on the keg.

This resin is subject to the Highly Flammable Liquids Regulations.

### IMPORTANT

*Information contained in this publication is given in good faith without warranty or guarantee. No liability can be accepted for claims, losses or demands arising out of the contents of this publication. We cannot be responsible for composites made with R 880 if the application conditions specified are not respected. The user must also ensure that his application is appropriate for this product to be used. We assert that the product will meet the specification set out in this data sheet, however, we cannot be responsible for any damage caused by misuse of this product.*

**NORD COMPOSITES • ZA, route d'Amiens • 80890 CONDE-FOLIE • FRANCE • Tél. : 03 22 31 57 57 • Fax : 03 22 31 86 97**

# PŘÍLOHA P II: TECHNICKÝ LIST RETARDÉRU HOŘENÍ

## MARTINAL ON 904



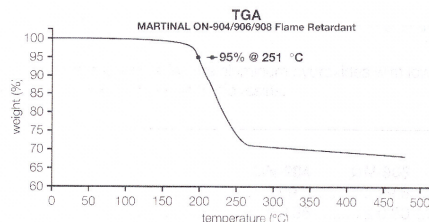
### MARTINAL® ON-904, ON-906 & ON-908 Flame Retardant

#### Description

MARTINAL ON flame retardant grades are aluminum hydroxides with low-viscosity behavior. They are used as fillers in synthetic resins.

#### Typical Properties

	ON-904	ON-906	ON-908
Al(OH) <sub>3</sub> , %, approx. ....	99.6	99.6	99.6
Moisture (105 °C), % .....	≤ 0.35	≤ 0.30	≤ 0.30
Loss on ignition (1200 °C), %, approx. ....	34.5	34.5	34.5
Na <sub>2</sub> O (soluble), % .....	≤ 0.10	≤ 0.10	≤ 0.10
Sieve residue, > 45 μm (wet), % .....	≤ 0.1	≤ 2.0	≤ 20.0
Median particle size, μm, approx. ....	4	6	8
Top cut, μm .....	≤ 45	≤ 60	≤ 100
Bulk density, untamped, kg/m <sup>3</sup> , approx. ....	530	550	600
Bulk density, tamped, kg/m <sup>3</sup> , approx. ....	870	930	980
Electrical conductivity (10% in H <sub>2</sub> O), μS/cm .....	≤ 140	≤ 130	≤ 120
Specific surface area (BET), m <sup>2</sup> /g, approx. ....	2.8	2.6	2.5
Oil absorption, ml/100g, approx. ....	21	18	17
Whiteness (Elrepho 457 nm), %, approx. ....	95	94	93
Density, g/cm <sup>3</sup> .....	2.4	2.4	2.4



**Shipping Information****Container Information**

50 lb bag, 25 kg bag (55.1 lb), 1000 kg supersack

**Shipping Classification**

DOT Classification, Not Regulated for Transportation

**Safety and Handling Information**

For specific safety, toxicity and handling information, please refer to the material safety data sheet on this product.

**Chemical Registration Numbers**CAS:  
TSCA:

21645-51-2

This material complies with the Toxic Substances Control Act  
(15 USC 2601-2629)

The information presented herein is believed to be accurate and reliable, but is presented without guarantee or responsibility on the part of Albemarle Corporation. It is the responsibility of the user to comply with all applicable laws and regulations and to provide for a safe workplace. The user should consider any health or safety hazards or information contained herein only as a guide, and should take those precautions which are necessary or prudent to instruct employees and to develop work practice procedures in order to promote a safe work environment. Further, nothing contained herein shall be taken as an inducement or recommendation to manufacture or use any of the herein materials or processes in violation of existing or future patents.



**AMERICAS** 451 Florida Street • Baton Rouge, Louisiana 70801-1765 • Tel: 225-388-7402 or 800-535-3030 • Fax: 225-388-7848 **EUROPE** Parc Scientifique Einstein • Rue du Bosquet 9 • R-134R Louvain-la-Neuve Sud, Belgium • Tel: 32-10-48-1711 • Fax: 32-10-48-1717 **ASIA PACIFIC** 111 Somerset Road #13-03 • Singapore 238164 • Tel: 65-6732-6295 • Fax: 65-6737-4155  
**ASIA PACIFIC** 16th Floor, Fukoku Seimei Building • 2-2-2, Uchisaiwai-cho • Chiyoda-ku, Tokyo 100-0011, Japan • Tel: 81-3-5251-0796 • Fax: 81-3-3500-5523 **ASIA PACIFIC** China World Tower, Room 1317 • No. 1 Jian Guo Men Wai Avenue • Beijing 100004 China • Tel: 86-10-6505-4153 or 86-10-6505-4154 • Fax: 86-10-6505-4150

AC-0241

(9/03)

© 2003 Albemarle Corporation

ALBEMARLE and MARTINAL are trademarks of Albemarle Corporation

[www.albemarle.com](http://www.albemarle.com)

# PŘÍLOHA P III: TECHNICKÝ LIST BI-DIAGONÁLNÍ TKANINY SEARTEX 988



**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 <sup>2</sup> ]	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/m<sup>2</sup> TOTAL TOLERANCE: 5,0 %

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

# PŘÍLOHA P IV: TECHNICKÝ LIST ROHOŽE UNIFILO



OCV™ Reinforcements

PRODUCT INFORMATION

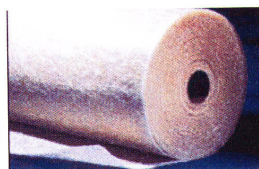
## Unifilo® for Closed Molds

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/m<sup>2</sup>)  
 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		STANDARD WEIGHTS		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.																	
(cm)	(g/m <sup>2</sup> )	Diameter (cm)			Nominal length (m)																
		U801	U812 U822	U813 U814	U816 U817	U850	U854	U852	U809	U614											
100	100	55			600																
	150	55			360																
	225	225	250	250	260	270	250	280													
	300	190	200	205	210	220	205	210													
	450	125	130	135	140	155	135	140													
	600	80	85	90	90	100	90	95													
900	65	70	75	75	85	75	75														
100	100	55			Nominal weight (kg)																
	150	55			60																
	225	55			54																
	300	52	57	57	58	61	57	58													
	450	57	60	62	63	66	62	63													
	600	56	59	61	63	70	61	63	56												
900	48	51	54	57	63	54	57	51													
		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](mailto:Unifilo.ocvamericas@owenscorning.com)

[Unifilo.ocvemea@owenscorning.com](mailto:Unifilo.ocvemea@owenscorning.com)

[Unifilo.ocvap@owenscorning.com](mailto: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](http://www.owenscorning.com)  
[www.ocvreinforcements.com](http://www.ocvreinforcements.com)

**EUROPEAN OWENS CORNING FIBERGLAS, SPRL.**  
 166, CHAUSÉE 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\_vvv\_06-2008\_Rev4