

Děkuji doc. Antonínu Blahovi za odborné vedení a připomínky k mé bakalářské práci.

V neposlední řadě patří poděkování i mé celé rodině za vytvoření podmínek a podporu při studiu

Souhlasím s tím, že s výsledky mé práce může být naloženo podle uvážení vedoucího bakalářské práce nebo ředitele ústavu. V případě publikace budu uveden jako spoluautor.

Prohlašuji, že jsem na bakalářské práci pracoval zcela samostatně a použitou literaturu jsem citoval.

V České Lípě, . . . 2005

.....

vlastnoruční podpis

RESUMÉ

Práce se zabývá plastovými kompozity, jejich významem, zpracováním a použitím. Zaměřuje se na vlastnosti a druhy plastových kompozitů plněnými skleněnými vlákny a je zde uvedeno i praktické využití uvedených kompozitů. Technologicky nejdůležitější vlastnosti jsou mezi sebou z hlediska použití porovnány, jak kvalitativně tak kvantitativně podle předloh uvedených v citované literatuře.

My work is occupied with plastic composite materials, with their signification, processing and application.

The work is addressing properties and types of plastic composite materials which are filled with glass fibres and there is also mentioned practical utilisation of these indicated composite materials.

The most important properties from the technological point of view are mutually compared concerning their use both from the viewpoint of quality and quantity according the pattern named in the cited literature.

O B S A H

RESUMÉ.....	4
O B S A H.....	5
Ú V O D	8
1 L I T E R Á R N Í Č Á S T	9
1.1 Kompozity v dějinách a v přírodě	9
1.2 Složení kompozitu	9
1.3 Nepolymerní vlákna používané při výrobě kompozitů.....	11
1.3.1 Keramická vlákna	11
1.3.2 Výroba vláken.....	12
1.3.3 Výhody keramických vláken	13
1.3.4 Asbestová vlákna	13
1.3.5 Čedičová vlákna.....	14
1.3.6 Keramické whiskery	14
1.3.7 Vlákná z oxidů	16
1.3.8 Safil	16
1.3.9 Vlákná SiC.....	17
1.3.10 Nicalon	17
1.3.11 Tyranno	18
1.3.12 Dopování SiC.....	18
1.3.13 Vlákná z nitridu křemíku (Si_3N_4).....	18
1.3.14 Vlákná na bázi nitridu bóru (BN)	18
1.3.15 Polyfosfátová vlákna	19
1.3.16 Skla.....	19
1.3.17 Sol/gel metoda	19
1.3.18 Složení skel.....	20
1.3.19 Skleněná vlákna	20
1.3.20 Uhlíková vlákna	21
1.3.21 Uhlík.....	21
1.3.22 Postup výroby	21
1.3.23 Vlákná z PAN	22
1.3.24 Typy vláken	22

1.3.25	Smoly	22
1.3.26	Vlákná ze smol	23
1.3.27	Pevnostní charakteristiky	23
1.4	Polymerní matrice používané při výrobě kompozitů.....	23
1.4.1	Termoplastové matrice	24
1.4.2	Termosetické matrice	24
1.5	Členění kompozitu.....	25
1.6	Kompozity s částicovými plnivy	25
1.7	Kompozity s vlákny	26
1.7.1	Zásady při vyztužování	26
1.7.2	Vyztužování nekonečnými vlákny.....	26
1.7.3	Vyztužování krátkými vlákny	27
1.7.4	Elastické charakteristiky	28
1.7.5	Moduly pružnosti kompozitu vyztužených dlouhými vlákny	28
1.7.6	Moduly pružnosti kompozitů vyztužených krátkými vlákny	29
1.7.7	Pevnost kompozitů a jejich porušování.....	29
1.7.8	Porušování kompozitů vyztužených dlouhými vlákny při statickém	30
	a cyklickém namáhání	30
1.7.9	Lomová houževnatost kompozitů vyztužených dlouhými vlákny	30
1.8	Skleněná vlákna a výrobky z nich	31
1.9	Výroba vyztužených hmot	32
1.9.1	Pultruze.....	32
1.9.2	Vlastnosti pultruzně tažených profilů	33
1.9.3	Příklady použití pultruzně tažených profilů v praxi	34
1.9.4	Skleněná vlákna do cementových hmot	36
1.9.5	Dva rozdílné požadavky na vlákno.....	37
1.9.6	Skleněná rozptýlená výztuž	38
1.9.7	Plošné výztuže ze skleněných vláken	38
1.10	Interakce plniva nebo výztuže s polymerem	39
1.11	Druhy plniv a výztuží	39
1.11.1	Skleněná plniva.....	39
1.11.2	Skleněná vlákna	39
1.11.3	Skleněné mikrokuličky.....	40
1.11.4	Skleněné vločky	41

1.12	Vliv obsahu plniva a délky vláken na vlastnosti kompozitu.....	41
1.13	Apretační vazebné prostředky pro výztuž s polymerem.....	43
1.13.1	Silany.....	44
1.13.2	Organotitanátové apretační vazebné prostředky.....	45
1.13.3	Ostatní apretační vazebné prostředky	45
1.14	Způsoby apretace povrchu plniva.....	45
2	DISKUSE.....	47
3	ZÁVĚR.....	49
4	LITERATURA.....	50
5	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	51
6	SEZNAM OBRÁZKŮ	52
7	SEZNAM TABULEK.....	53
8	SEZNAM PŘÍLOH	Chyba! Záložka není definována.

Ú V O D

Plasty jsou polymery za běžných podmínek většinou tvrdé, houževnaté nebo křehké. Zahřátím mohou být taveny. Pokud je změna z plastického do tuhého stavu opakovatelná, nazýváme je **termoplasty**. Přechod do tuhého stavu se děje ochlazováním. Pokud je změna neopakovatelná mluvíme o **reaktoplastech (termosetech)**, které tvrdnou síťováním, obvykle za působení tepla a tlaku.

Elastomery jsou vysoce elastické polymery, které lze za běžných podmínek, i při zatěžování malou silou, značně deformovat bez porušení. Tyto deformace mají převážně vratný charakter. Nejvíce elastomerů tvoří kaučuky, z nichž se vyrábí pryž.

Plasty v současnosti pronikají do nejrozličnějších průmyslových odvětví a tempo jejich rozvoje se neustále zvyšuje. Je tomu tak proto, že klasické materiály již přestávají splňovat rostoucí potřeby techniky a jsou tak již brzdou dalšího vývoje. Bez moderních materiálů, jako jsou především plasty a kompozity na bázi plastů by řada inovačních procesů nemohla být uskutečněna. Specifické vlastnosti těchto nových konstrukčních materiálů spolu s novými technologiemi otevírají široké možnosti použití v mnoha oblastech.

Ve srovnání s tradičními materiály – kovy jsou plasty obecně mnohem méně tuhé a pevné, mají výrazný sklon k tečení, vysokou teplotní roztažnost a výraznou závislost mechanických charakteristik na teplotě. Tyto vlastnosti se obvykle jeví jako nevýhodné. Na druhé straně však stojí nesporné přednosti plastů, zejména snadné zpracování, nízká energetická náročnost a vysoká produktivita výroby či široké možnosti nových technologií. V neposlední řadě stojí vynikající odolnost proti agresivním látkám a prostředím, která plasty předurčuje ke stavbě zařízení, pracujících v tvrdých podmínkách provozů v chemickém a potravinářském průmyslu.

Jinou předností plastů je jejich velmi nízká objemová hmotnost, kterou lze navíc dále snižovat lehčením. Nízkou tuhost a pevnost základních plastů lze výrazně zvyšovat vyztužováním dlouhými vlákny či plněním krátkými vlákny a částicovými plnivy. Vznikají tak vysoce progresivní konstrukční materiály – vláknové a částicové kompozity s plastovými matricemi.

1 LITERÁRNÍ ČÁST

1.1 Kompozity v dějinách a v přírodě

Používání typických kompozitních materiálů lze vysledovat už v dávných a zaniklých civilizacích. Myšlenkové pochody starověkých technologů byly velmi podobné úvahám jejich novodobých kolegů. Snažili se kombinovat dostupné suroviny a vytvořit tak nový materiál s lepšími vlastnostmi a přizpůsobený zamýšlenému použití.

Staří Babyloňané již nejméně 3000 let před Kristem používali kompozity založené na vyztužených přírodních pryskyřicích a živících. Ve stejné době se v Egyptě stavěly říční čluny ze stvolů papyru uložených v živичné matrici (předchůdci dnešních laminátových lodí).

Okolo roku 1000 před Kristem konstruovali Asyřané pontonové mosty, jejichž plováky byla upleteny z proutí a rovněž impregnovány vodovzdornou živicí.

Také staří Slované používali kompozitní materiály. Stěny domku na velkomoravském hradišti v Mikulčicích byly zhotoveny z vodorovně kladených prutů (armatura), které byly omítnuty tehdejší maltou.

Byl objeven dvousečný meč se zlatým křížem na čepeli, který byl nejprve opatřen dřevěnou pochvou, potom zahalen do kůže a za třetí do velmi bílého lněného plátna zpevněného světlým voskem, aby se tak uchoval i s lesknoucím se křížkem uprostřed. V dnešní terminologii bychom řekli, že se jedná o laminátovanou pochvu z kompozitního materiálu.

Dalším příkladem přírodních kompozitu mohou být např. štíhlá dřevnatá stébla bambusu. Ta si podržují tuhost a stability i při délce přes čtyřicet metrů, protože to jsou vlastně trubky zpevněné cylindrickými výztuhami (kolínky). Materiál stěny bambusu je navíc ztužen tenkými křemennými vlákny.

Nejzajímavější je skutečnost, že jak vzrostlá dřevnatá stébla bambusu, tak stromy i vlastní dřevo je současně tuhé, pevné a lehké. Jedná se technický trik přírody samy, neboť nosná vlákna jsou dutá.

1.2 Složení kompozitu

Složené neboli kompozitní materiály mají před jednoduchými homogenními materiály řadu předností. Kompozity jsou *heterogenní systémy* tvořené minimálně dvěma fázemi, obvykle rozdílného chemického složení, které se od sebe liší svými fyzikálními a

mechanickými vlastnostmi. Kombinací dvou nebo více materiálů, popřípadě několika fází, lze výhodně kombinovat i jejich vlastnosti. Často se tak podaří dosáhnout lepších výsledných vlastností, než by odpovídalo součtu vlastností složek. Je pro to výraz **synergie**.

Fáze oddělené rozhraním jsou téměř vždy v tuhém stavu. Jedna z fází má funkci *pojivé matrice*, další jsou fázemi sekundárními, u polymerních kompozitů nazývané plniva.

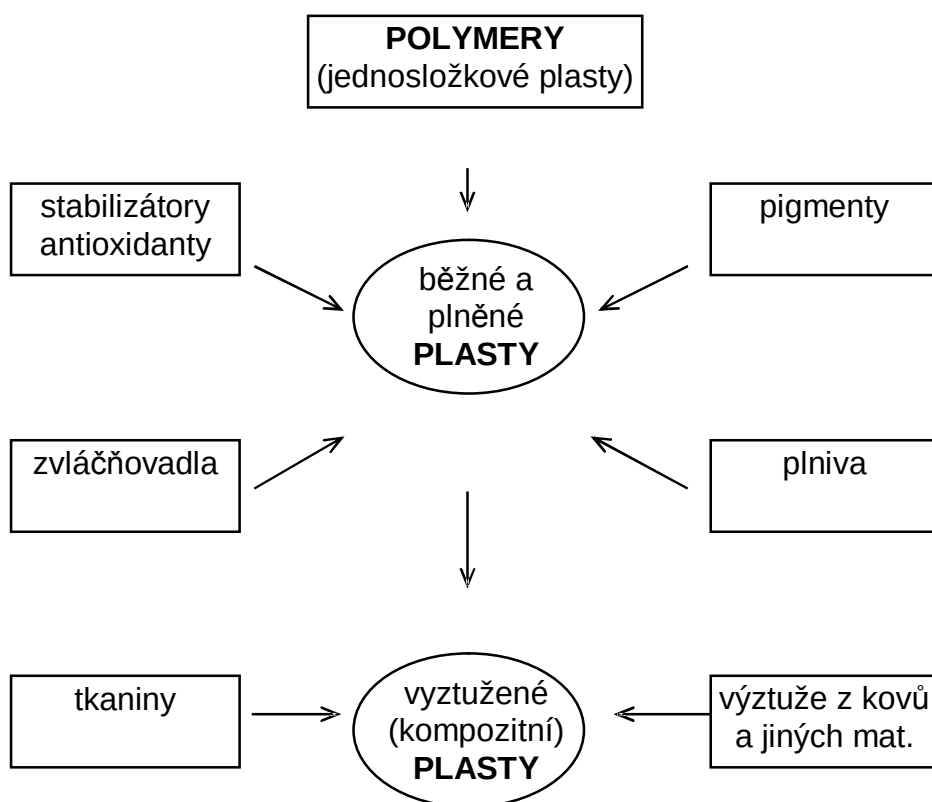
Sekundární fáze nejsou obvykle spojité, jsou tvořeny částicemi rozmanitého tvaru (kulovitého, destičkovitého, vláknitého). Minimální velikost částic sekundárních fází nebyla dosud jednoznačně stanovena. Z mikrostrukturního pohledu lze pokládat za kompozity heterogenní systémy, u nichž je nejmenší rozměr sekundárních fází větší než 10^{-8} m.

Rozhraní mezi fázemi má v kompozitech významnou úlohu. Při vzájemném působení fází, které se od sebe liší fyzikálními a chemickými vlastnostmi, nelze za rozhraní pokládat výhradně plochu vzájemného kontaktu, v níž dochází k různě dokonalé soudržnosti fází chemickými a fyzikálními vazbami (nejčastěji vazbami van der Waalsovými). Za součást fázového rozhraní se také považuje tenká vrstva v okolí kontaktní plochy, která bývá lokálně deformována vlivem rozdílných koeficientů teplotní roztažnosti a tuhosti fází. Vrstva matrice na rozhraní fází má jinou morfologii než vnitřní oblasti matrice (při stejném chemickém složení). To se projevuje sníženou pohyblivostí molekulárních segmentů v hraniční vrstvě, zejména když dojde k pevnému zakotvení makromolekul matrice na povrchu plniva. V takovém případě se hovoří o imobilizované vrstvě, které se vyznačuje větší tuhostí a menší schopností vytvářet rozsáhlejší lokální plastické deformace. Tím se liší od vzdálenějších, sekundárními fázemi neovlivnitelných oblastí matrice. Předpokládá se též, že na rozhraní fází je zvýšená úroveň volné entalpie, která usnadňuje difúzi (nejčastěji molekul vody).

Ke zvýšení vzájemné soudržnosti fází a k omezení difúze cizích molekul mezifázovým rozhraním se povrch sekundárních fází (plniva) upravuje tzv. **apretací**. Úprava spočívá v nanesení vhodné chemické látky na povrch částic nebo vláken. Jestliže jsou sekundární fáze anorganické povahy, obsahuje apretační látka jednak anorganické funkční skupiny reagující s jejich povrchem, jednak funkční skupiny organické, reagující s polymerní matricí. Nejčastějšími apretacemi jsou různé typy silanů a organické sloučeniny titanu.

Dokonalejší vzájemná soudržnost mezi fázemi však nemusí vždy zlepšovat všechny mechanické vlastnosti kompozitů. U anorganických částicových plniv a vláknitých výztuží vede ke zvýšení tuhosti a pevnosti, u kompozitu s částicovými plnivy obvykle zhoršuje

houževnatost. Rovněž k disipaci energie, která je nezbytná pro dosažení dobré houževnatosti, dochází snadněji při méně dokonalé vzájemné soudržnosti částicových plniv matrice (4).



Obr. č. 1 : Schéma polymerů

1.3 Nepolymerní vlákna používané při výrobě kompozitů

1.3.1 Keramická vlákna

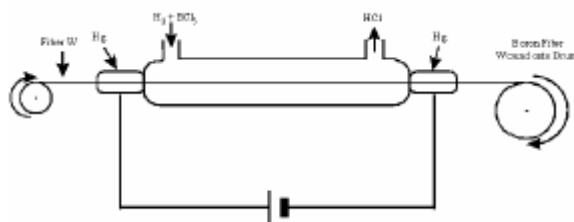
Keramické materiály mají buď amorfní strukturu (skla na bázi křemíku) nebo jsou krystalické. V krystalické keramice je buď tzv. stechiometrické zastoupení složek (odpovídá zastoupení jednotlivých prvků v krystalické mřížce), nebo častěji nestechiometrický obsah složek. Na rozdíl od kovů, kde je typická kovová vazba, jsou u keramiky běžné vazby iontové (elektrická přitažlivost kationtů a aniontů), případně vazby kovalentní. Typická vysoká pevnost a křehkost je dána právě krystalickou mřížkou, která má odolnost vůči dislokačnímu pohybu.



Obr. č. 2 : Keramická vlákna

1.3.2 Výroba vláken

- 1) **zvlákňování z taveniny** — vzhledem k nutnosti použití vysokých teplot a malé viskozitě taveniny se používá jen zřídka
- 2) **chemická nebo tepelná konverze prekurzorů** — obvykle se používá tepelný rozklad anorganických polymerů;
- 3) **sol/gel metoda** — jde o modifikaci tepelného rozkladu. Z disperse (solu) se částečným těkáním rozpouštědla připraví gel, který se zvlákňuje a rozkládá za tepla. Výchozí je obvykle kovový alkoxid, který se polymeruje v roztoku a převádí na gel. (příkladem je vlákno *Nextel* obsahující Al_2O_3 , SiO_2 a B_2O_3);
- 4) **zvlákňování z disperse** — výchozí je disperze částic keramiky v polymerní kapalině, která se zvlákňuje a následně rozkládá teplem. Příkladem je vlákno *ALMAX* na bázi Al_2O_3 ;
- 5) **chemické ukládání par** — na vhodný nosič (obvykle uhlíkové nebo wolframové vlákno) se ukládá z plynné fáze vhodný prostředek, který se chemickou reakcí převede na keramiku;



Obr. č. 3 : Chemické ukládání par

- 6) **růst monokrystalů** — buď z taveniny nebo plynné fáze na vhodném zárodku. Rychlost růstu je kolem 15 cm/min.

1.3.3 Výhody keramických vláken

- Ø vysoká pevnost a počáteční modul;
- Ø relativně nízká (v porovnání s kovy) měrná hmotnost;
- Ø malá tepelná roztažnost;
- Ø vysoká tepelná vodivost;
- Ø výjimečná odolnost vůči chemikáliím;

Odolnost vůči vysokým teplotám (i když je u některých keramických vláken tato odolnost na vzduchu snížena díky termooxidaci).



Obr. č. 4 : Keramická vlákna

1.3.4 Asbestová vlákna

Mezi krystalické přírodní keramické materiály patří především asbesty. Jde o třídu minerálů, které krystalizují ve vláknité formě. Jsou obecně výborně odolné vůči působení vysokých teplot chemikálií a mikroorganismů. Jejich pevnost se pohybuje kolem 0,5 až 3 GPa a počáteční modul je 150–180 GPa. Představitelem asbestů je *Chryostil*, který má složení $\text{Mg}_3(\text{Si}_2\text{O}_5)(\text{OH})_4$.

Problémem je, že se z asbestových materiálů snadno oddělují tenká a tuhá vlákénka (o průměru 1–3 μm), která se vznášejí ve vzduchu a při vdechnutí se zabodávají do plic.



Obr. č 5 : Azbestová vlákna

1.3.5 Čedičová vlákna

Čedičové horniny tají přibližně v rozmezí teplot 1500–1700 °C. Při dostatečně rychlém chlazení vzniká sklovitá, přibližně amorfní struktura. Pomalé chlazení vede ke vzniku krystalické struktury směsi minerálů. Základní jsou *plagiocen* (teplota krystalizace $T_c = 1010$ °C) a *pyroxen* (teplota krystalizace $T_c = 830$ °C), které tvoří kolem 80% čedič.

Z jednotlivých složek čediče dominuje oxid křemičitý SiO_2 (optim. rozmezí 43,3–47 %) následuje Al_2O_3 (optimální rozmezí 11 – 13 %), CaO (optimální rozmezí 10 – 12 %) a MgO (optimální rozmezí 8 – 11 %). Ostatní oxidy jsou v koncentracích pod 5%.

Čedičové horniny vhodné pro výrobu vláken, obsahují obvykle dva základní minerály tj. *olivín* ($2(\text{MgFe})\cdot\text{O}\cdot\text{SiO}_2$) a *nefelin* ($\text{Na}_2\text{O}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 2\text{SiO}_2$).

Podle obsahu SiO_2 se čediče klasifikují do tří skupin:

1. alkalické čediče s obsahem SiO_2 do 42%;
2. slabě kyselé čediče s obsahem SiO_2 od 43 do 46%
3. kyselé čediče s obsahem SiO_2 nad 46%.

K výrobě vláken se používají kyselé čediče.

Čedič je stabilnější v silně alkalickém prostředí než skla. Na druhou stranu je stabilita v kyselém prostředí nižší. Čedičové produkty se mohou použít od velmi nízkých teplot (kolem –200 °C) až do poměrně vysokých teplot 700–800 °C. Při vyšších teplotách (nad 300 °C) dochází ke vzniku krystalické struktury, která je důvodem snížení pevnosti. Teplota zesklenní z termomechanických křivek je $T_g = 596$ °C. Tepelná roztažnost pod T_g je $\alpha_1 = 4,9 \cdot 10^{-6} \text{ deg}^{-1}$ a nad touto teplotou je $\alpha_2 = 19,1 \cdot 10^{-6} \text{ deg}^{-1}$. Pevnost čedičových vláken se pohybuje kolem 1,1 – 1,5 GPa., smykový modul kolem 21,76 GPa a tažnost kolem 2%. Modul pružnosti v axiálním stlačení je 112 GPa.

Čedičová vlákna se vyrábějí tavným zvlákňováním při 1500–1700 °C. Vlákna mohou být dále dlužena při teplotách kolem 1300 °C. Měrná hmotnost je 2733 kg m^{-3} a teplota měknutí se pohybuje kolem 960 °C. Průměr vláken je v rozmezí kolem 9 – 12 μm .

Z příčného řezu prasklých vláken je patrný křehký lom způsobený heterogenitami struktury.

1.3.6 Keramické whiskery

Whiskery jsou monokrystalická krátká vlákna, kde je v maximální míře využito pevnosti výchozí chemické sloučeniny. Jejich pevnost se blíží teoretické pevnosti

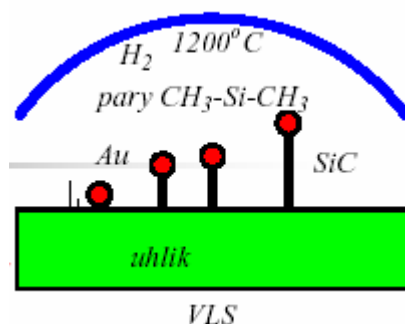
materiálů, protože zde prakticky neexistují poruchy krystalické mřížky a slabá místa na hranicích krystalitů (typická pro polykrystalické systémy). Typický whisker má průměr několika μm a délku několika milimetrů. Jejich poměr $AR = \text{délka} / \text{průměr}$ se pohybuje od 50 – 10000. Hodí se speciálně jako zesílení do kompozitních struktur. Pro růst monokrystalů se používá techniky růstu z parní fáze.

Typická je příprava SiC whiskerů z odpadu po mletí rýže. Tento odpad obsahuje celulózu a oxid křemičitý ve vhodném poměru pro přípravu SiC. Tato surovina se zahřívá bez přítomnosti kyslíku na teplotu cca 700°C a pak v atmosféře dusíku při $1500 - 1600^{\circ}\text{C}$. Vzniká karbid křemíku jak ve formě částic, tak i whiskeru (AR.75).

Pro přípravu SiC whiskerů s délkou kolem 10 mm a tloušťkou $6 \mu\text{m}$ se volí tzv. VSL metoda (Vapour-liquid-solid). Používá se par jednotlivých složek (SiO_2 a CO) ve vhodné atmosféře (CH_4), které se rozpouštějí v kapalném katalyzátoru (železná kapka) na přesycenou taveninu. Z ní vyrůstá monokrystal. Takto připravené whiskery mají průměrnou pevnost 8,6 GPa a počáteční modul 581 GPa..

Existuje také řada možností jak připravit monokrystal na bázi Al_2O_3 (sařirové monokrystal).

Při použití metody EFG (edge defined film feed) se kapilárou z molybdenu dodává roztavený Al_2O_3 k mezipovrchu, kde roste monokrystal. Na hraně kapiláry je vytvořen film roztavené keramiky. Jako zárodečný krystal se používá zrno saří. Tvar monokrystalu lze ovlivnit tvarem hrany a otvoru kapiláry. Rychlost růstu monokrystalu je až $200 \mu\text{m} / \text{min}$. Další možností je využití laseru k lokálnímu tání keramiky v místě, kde se tvoří monokrystal.



Obr. č. 6 : Příprava SiC whiskerů

1.3.7 Vlákná z oxidů

Krystalická keramická vlákna z oxidů mají základní výhodu v tom, že nejsou náchylná k termooxidaci. Základním představitelem je „Alumina“, tj. Al_2O_3 . Tento oxid je polymorfní. Stabilní je krystalická forma.

Vlákná na bázi této formy vyráběla firma DuPont technikou přípravy prekurzoru obsahujícího sloučeniny Al_2O_3 . Z tohoto prekurzoru se připravilo vlákno a vlastní alumina se získala „spékáním“ za vysokých teplot. Výsledkem bylo polykrystalické vlákno s velikostí zrn kolem $5\text{ }\mu\text{m}$.

Firma 3M používá k výrobě vlákna Nextel techniku sol / gel. Vychází se z roztoku organické soli Al_2O_3 , který se koncentruje na gel schopný vytvořit vlákno. Tepelným rozkladem při $1400\text{ }^\circ\text{C}$ se uvolní z vlákna organické zbytky a zůstane Al_2O_3 .

Pro zlepšení vlastností vláken na bázi Al_2O_3 se přidávají další oxidy, které ovlivňují vzniklé krystalické struktury a tím i mechanické vlastnosti. Přídavek SiO_2 snižuje počáteční modul, zirkonium (resp. ZrO_2) zvyšuje houževnatost a pevnost. Tak např. vlákno Nextel 720 obsahuje 15 % SiO_2 a má dvoufázovou krystalickou strukturu složenou z globulárních protažených zrn (délka pod $100\text{ }\mu\text{m}$) z modifikace Al_2O_3 a „mullite“ ($3\text{Al}_2\text{O}_3 + 2\text{SiO}_2$) a velkých globulárních mosaikových krystalů velikost $0,5\text{ }\mu\text{m}$ z „mullite“. Typický průměr vláken Nextel je $10\text{--}12\text{ }\mu\text{m}$, což umožňuje výrobu i tkaných a pletených struktur.

Jejich měrná hmotnost se pohybuje od 2700 do 3700 kg / m^3 , pevnost od $1,7 - 2,1\text{ GPa}$ a modul od $150 - 370\text{ GPa}$.

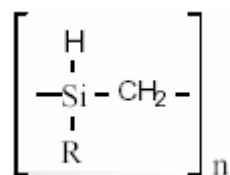
1.3.8 Safil

Krátká vlákna ($3\text{--}5\text{ mm}$ dlouhá a $3\text{ }\mu\text{m}$ silná) z modifikace Al_2O_3 vyráběná pod názvem *Safil*.

Vlákná obsahují 4 % SiO_2 a vyrábějí ze sol/gel metodou. V první fázi probíhá mísení $\text{Al}_2(\text{OH})_5\text{Cl}$ s polyvinylalkoholem. Tento roztok se koncentruje postupným odpařováním vody, zvláknuje, suší a tepelně zpracovává při $800\text{ }^\circ\text{C}$. Vlivem odstranění organických zbytků vzniká silně mikroporézní struktura (15 % objem pórů). Vlákná v této fázi jsou vhodná pro filtrační účely. Dalším zkompaktněním při $1400 - 1500\text{ }^\circ\text{C}$ dochází k 3 – 4 % ním srážení a vzniklá vlákna jsou vhodná jako zesílení do kompozit.

1.3.9 Vlákná SiC

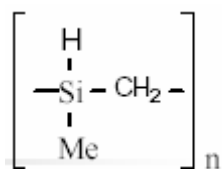
Jednou z možností výroby vláken z karbidu křemíku je chemické ukládání par při teplotách 1300 °C. Nosičem, na který se ukládají páry, je wolframové nebo uhlíkové vlákno. Reaktivní směs plynů obsahuje vodík a alkylsilany. Opět vzniká modulární (zrnitá struktura). Jako vhodný silan se používá metyltrichlorsiloxan, který se v parách vodíku (ve stechiometrickém poměru) rozkládá na karbid křemíku a HCl. Obvyklá tloušťka vláken je kolem 100 – 150 μm z toho je pouze 13 μm jádro z wolframu nebo uhlíku.



Pro výrobu tenkých vláken z karbidu křemíku se využívá prekurzorových vláken z polykarbosilanů. Výchozí dimethylchlorsilan se rozkládá a polymerizuje při 470 °C v argonové atmosféře po dobu 8 – 14 hod. Následuje vakuová destilace při 270 °C. Vzniklý polymer se zvlákňuje z taveniny při 350 °C v atmosféře dusíku. Prekurzorové vlákno se pyrolyzuje na vzduchu při 550 °C, dodatečně zpracovává při 1000 °C v atmosféře dusíku a finálně protahuje v dusíkové atmosféře při 1300 °C.

1.3.10 Nicalon

Z prekurzoru se vyrábí vlákno *Nicalon* firmy Nippon Carbon, o průměru 10 – 20 μm. Vlákno obsahuje větší procento uhlíku než odpovídá stechiometrii SiC a navíc obsahuje zhruba 10% kyslíku. Nejde tedy o čistý karbid křemíku. Vlákno se vyrábí z polykarbosilanu obsahujícího kov (Me) s polymeračním stupněm alespoň 1000.



Polykarbosilan se zvlákňuje z taveniny při 350 °C. Vlákno se stabilizuje ohřevem na vzduchu při 190 °C. Následuje pyrolýza při teplotách 1100 – 1300 °C, při které dojde k transformaci na keramiku. Vlákná vyrobená tímto postupem mají pevnost 3,25 GPa a modul 200 GPa. Vlákná z karbidu křemíku odolávají termooxidaci i přes povrchovou tvorbu SiO₂.

1.3.11 Tyranno

Vlákna obsahující karbid křemíku a 1 – 4 % titanu dodává pod názvem *Tyranno* firma Ube. Polykarbosilan se mísí s organickou sloučeninou titanu a po polymeraci vzniká polytitanokarbosilan s polymeračním stupněm 1700 a bodem měknutí 200 °C.

Následuje zvláknění a pyrolýza při 1300–1400 °C. Tato vlákna jsou amorfní při teplotách do 1300 °C a mikrokryсталická při 1400–1500 °C.

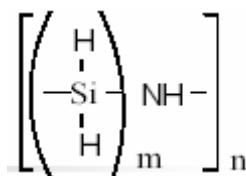
1.3.12 Dopování SiC

Pro zlepšení uspořádání krystalitů a jejich velikostí se používá dopování např. bórem. Při vhodné kombinaci přípravy prekurzoru a tepelného zpracování lze v širokých mezích řídit krystalinitu vláken. Např. při 1600 °C vzniká kubická mřížka SiC s modulem 430 GPa a měrnou hmotností 3151 kg / m³, která se blíží teoretické hodnotě 3210 kg / m³. Vláknem *Sylramic* (Dow Chem.) je nanokryсталický karbid křemíku (velikost krystalitů je 0,5 μm) v jemnostech umožňujících hlavně textilní způsob zpracování (tkaní, pletení). Jeho měrná hmotnost je 3000 kg/m³, pevnost 3,15 GPa a modul 405 GPa.

1.3.13 Vlákná z nitridu křemíku (Si₃N₄)

Tato vlákna se vyrábí chemickým usazováním par na uhlíkových nebo wolframových nosičích.

Reaktivní atmosféra obsahuje SiCl₄ a NH₃. Vlákná mají dobré mechanické vlastnosti, ale jejich průměr je příliš veliký. Vlákná obsahující převážně amorfní nitrid křemíku se vyrábějí z perhydropolysilazanu smíšeného s polyetylénem.



1.3.14 Vlákná na bázi nitridu bóru (BN)

Vlákná mají měrnou hmotnost kolem 2200 kg / m³, podobně jako vlákna uhlíková, ale výrazně lepší odolnost vůči termooxidaci a výborné dielektrické vlastnosti. Vychází se z prekurzorového vlákna z oxidu bóru (B₂O₃) získaného tavným zvlákněním. Transformace

na nitrid se provádí reakcí s amoniakem. Finální tepelné zpracování odstraní zbytky oxidu a stabilizuje vlákno.

1.3.15 Polyfosfátová vlákna

Tento typ vláken představuje jednu z náhrad asbestu. Křemíkové atomy v asbestech jsou nahrazeny atomy fosforu. Tím vzniká biodegradabilní materiál mající prakticky stejné izolační a nehořlavé charakteristiky jako asbesty. Vláknina na bázi polyfosfátu vápníku rostou z taveniny rozpustné ve vodě. Surovinou je oxid vápenatý (CaO) a kyselina fosforečná (H_3PO_4). Vláknina rostou z roztoku ve formě dendritických sférolitů.



1.3.16 Skla

Sklovitý stav je charakteristický nekystalickou křehkou strukturou. Klasická příprava skleněných vláken je poměrně jednoduchá. Standardně se používá tavného zvláknování a dloužení za tepla rychlostí až 2 km/min. Používá se trysek s 200 – 400 otvory. Finální vlákno se ještě podrobuje povrchovému zpracování, které přilepuje jednotlivé fibrily (5–20 μm) a omezuje porušení vláken způsobené povrchovými defekty. Přímé tavení skla má řadu nevýhod. Především je nutná vysoká teplota, která způsobuje částečné tání některých součástí skla. Díky vysoké viskozitě taveniny vznikají také problémy s její homogenizací.

1.3.17 Sol/gel metoda

Sol je vlastně koloidní suspensí tak malých částic, že nedochází k jejich sedimentaci. Velikost částic v solu je od 1 do 100 nm. Gel je suspence, kde je kapalina tak viskózní, že se materiál chová jako pevná látka. Tepelným zpracováním dochází ke zkompatnění struktury a vzniku skleněných vláken. Výchozí surovinou pro přípravu solu je SiCl_4 , který reaguje s etylalkoholem za vzniku tetraetoxysilanu $[\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4]$. Pro přípravu gelu se pak používá buď destabilizace (zvýšením teploty, přidávkou elektrolytu) nebo hydrolyzy a polykondenzace. Ohřátím gelových vláken za současného dloužení vznikají vlákna skleněná.

1.3.18 Složení skel

E - skla obsahující 55 % SiO₂, 8 % Al₂O₃, 18 % CaO a 4,6 % MgO (obsah ostatních oxidů je pod 5 %) mají dobré elektroizolační vlastnosti, vysokou pevnost a postačující modul pružnosti;

C -skla obsahující 65 % SiO₂, 14 % CaO, (5 % Li₂O) a 8,5 % Na₂O (obsah ostatních oxidů je pod 5 %) odolávají dobře chemické korozi;

S-skla obsahující 65 % SiO₂, 25 % Al₂O₃ a 10 % MgO (obsah ostatních oxidů je pod 5 %) mají vysoký obsah křemíku a odolnost vůči vyšším teplotám.

VLÁKNO	MODUL PRUŽNOSTI (GPa)	PEVNOST V TAHU (GPa)	HUSTOTA (kg m ⁻³ 10 ⁻³)
Sklo E	70	3 - 4	2,5
Sklo S	80	4,5	2,5
Uhlík	385	2,0	1,9
Bor	450	2,4	2,4
Kevlar 49	120	2,75	1,5

Tab. 1 Modul pružnosti a pevnost v tahu některých vyráběných vyztužujících vláken

1.3.19 Skleněná vlákna

Skleněná vlákna se většinou vyrábějí z *E-skel*. Strukturně tvoří SiO₂ síť křemíkových atomů obklopených kyslíkovými atomy, které sdílejí. Tato zřetězená struktura je isotropní. Základní výhodou křemíkových skel je velmi nízká měrná hmotnost, poměrně vysoká pevnost a nízký modul pružnost. Skleněná vlákna odolávají ohni a řadě chemikálií.

Přítomnost vlhkosti ve vláknech však silně snižuje jejich pevnost. K absorpci vlhkosti dochází zejména u čerstvě zvlákněných skel. Jejich další nevýhodou je nízká odolnost vůči statickému dlouhodobému namáhání (statická únava). Bod měknutí se pohybuje kolem 700 °C a maximální teplota pro dlouhodobé použití je 450 °C



Obr. č. 7 : Skleněná vlákna

1.3.20 Uhlíková vlákna

Uhlíková vlákna je souhrnný název pro vlákna obsahující uhlík v různých modifikacích. Speciální podskupinou jsou grafitová vlákna, která vznikají tepelným zpracováním při teplotách kolem 2400 °C. Vzniká hexagonální vrstevnatá struktura, která má výrazně odlišné vlastnosti od negrafitické formy.

Obecně se uhlíková vlákna vyrábějí řízenou pyrolýzou vhodných prekurzorů, mezi které patří viskózní vlákna, polyakrylonitrilová vlákna a vlákna na bázi smol z dehtu jako zbytků krakování ropy. Je možné získat celou řadu vláken od vysoce pevných (HS), s vysokým modulem (HM), středním modulem (IM) a extrémně vysokým modulem (SHM).

Vlákna využívající viskózy mají nevýhodu v tom, že výtěžek uhlíkových vláken je pouze 20 – 25 %. Z tohoto pohledu jsou výhodnější PAN prekurzory, kde je výtěžek 45–50 %. Prekurzory ze smol mají největší výtěžek 75 – 80 % a navíc lze připravit vysoce orientované struktury.

1.3.21 Uhlík

Uhlík je zajímavý prvek. Jeho teoretická měrná hmotnost je 2270 kg / m³. Existuje v řadě modifikací, od amorfního uhlíku, přes planárně uspořádaný grafit až ke krystalickému diamantu.

Uhlík v grafitické formě má hexagonální strukturu a je silně anizotropický. Ve formě diamantu jsou uhlíkové atomy spojeny kovalentními vazbami.

1.3.22 Postup výroby

- a) *příprava prekurzoru* — tj. příprava vlákna buď taveným zvlákněním nebo zvlákněním z roztoku. Toto vlákno se v dalších fázích převádí na vlákno uhlíkové. Struktura prekurzoru se promítá do struktury a pevnosti uhlíkových vláken;
- b) *stabilizace* — vedoucí k netavitelné zesítěné struktuře, resp. preoxidaci. Provádí se na vzduchu zahřátím na poměrně nízké teploty 200–450 °C;
- c) *karbonizace* — tj. převedení na uhlíková vlákna. Provádí se v inertní atmosféře (obvykle dusíkové), při teplotách mezi 1000–2000 °C. Výsledné vlákno obsahuje 85 – 95 % uhlíku;

- d) *grafitizace* — se provádí také v inertní atmosféře, ale při teplotách mezi 2400 – 3000 °C. Dochází ke snížení obsahu uhlíku na cca 99 % a více. Vzniká také uspořádaná vrstevnatá struktura.

1.3.23 Vlákná z PAN

Pro výrobu uhlíkových vláken se používá tzv. pravých PAN vláken neobsahujících modifikační komponenty. V první fázi probíhá stabilizace na vzduchu při 200–220 °C za současného napínání. Vznikají cyklické žebříčkovité struktury obsahující kyslík. Vnější projevem je zčernání vlákna. Vlastní karbonizace probíhá při 1000–1500 °C a vede ke vzniku hexagonální uhlíkové sítě doprovázené uvolněním plynných zplodin.

1.3.24 Typy vláken

Vlákná typu :

HM - mají pevnost 1,9 – 3,6 GPa, tažnost 0,4 – 0,7 % a počáteční modul 350 – 540 GPa

IM - mají pevnost 3 – 4 GPa, tažnost 1,3 – 1,6 % a modul 230 – 300 GPa.

HS - mají pevnost 4 – 7 GPa, tažnost 1,7 – 2,4 % a modul 235 – 300 GPa.

Jako aviváž se používá epoxidových pryskyřic, které zlepšují zpracovatelnost a snižují tendenci k povrchové destrukci. Tato aviváž se odstraňuje spálením před použitím těchto vláken jako zesílení do kovových a keramických matic.

1.3.25 Smoly

Smoly představují lacinou surovinu pro výrobu uhlíkových vláken. Používají se smoly složené z petrolejového asfaltu, uhelného dehtu a PVC (tepelně degradovaného). Smoly tedy nemají jednotné složení a obsahují řadu kondenzovaných benzenových jader oddělených alkylovými řetězci. Asfaltové smoly obsahují také relativně vysoký podíl síry.

Smoly na bázi PVC se získávají termickou degradací při 400 °C v atmosféře dusíku po dobu 30 min. Výtěžek reakce je 20 %. Vznikají aromatická jádra složená ze 3 – 4 kruhů sumárního vzorce $C_{62}H_{52}$. Bod tání je 150–200 °C a mol. hmotnost je 700 – 800.

1.3.26 Vlákná ze smol

Tepelným zpracováním vzniká termoplastická mesofázová smola obsahující nematické kapalně krystalové tyčinky (obsah mesofáze je 40 – 90 %). Standardně se používá zvláknění při rychlosti 3 – 100 m / min. Prekurzorové vlákno má průměr 10 – 20 μm . Obsahuje protažené anizotropické domény (průměru kolem 4 μm). Při následné oxidaci vzniká zesíťování. Karbonizace a grafitizace se provádí v inertní atmosféře. Typická je jádro-plášťová struktura z koncentrických lamelárních vrstev (turbostatická struktura). Pro uhlíková vlákna ze smol se pevnost pohybuje od 1,3 – 3 GPa, tažnost v rozmezí 0,2 – 1,3 % a modul od 140 – 820 GPa.

1.3.27 Pevnostní charakteristiky

Ideální grafitická struktura má modul přes 1000 GPa. Reálné moduly uhlíkových vláken jsou pro vlákno ze smol zhruba 80 % a pro vlákna z PAN pouze 50 % z teoretické hodnoty. Pevnost reálných vláken 3 – 20 GPa je podstatně nižší než teoretická pevnost 180 GPa. Příčina relativně nízké reálné pevnosti tkví v tom, že porušení nastává v defektních oblastech. Zajímavé je zjištění, že pevnost a modul uhlíkových vláken jsou nelineární klesající funkcí jejich průměru. Grafitizací vláken z mesofázových smol při 3000 °C dochází k velkému zvýšení počátečního modulu (až na 700 GPa), ale pevnost zůstává nízká (5).

1.4 Polymerní matrice používané při výrobě kompozitů

Matrice hraje u vláknových kompozitů důležitou roli. Nejenže chrání výztuž před poškozením povrchu, ale především zajišťuje požadovanou orientaci a umístění vláken, přičemž přenáší smykové zatížení mezi jednotlivými vlákny tak, že odolávají ohybu a tlaku. Ačkoliv jsou vlákna sama o sobě křehká, spojením s matricí se vytvoří materiál vysoce houževnatý. Tohoto synergismu je dosaženo kombinací mechanismů, které zajišťují trhliny malé, tupé a izolované. Kromě kompozitů s polymerní matricí lze vyrobit kompozity s kovovými, skleněnými, keramickými a silikátovými matricemi (6).

Vláknové kompozity s polymerní matricí mají nejdelší tradici. Podle vlastností i podle výrobního postupu se výrazně liší podle toho, je-li polymer termoplast nebo termoset.

1.4.1 Termoplastové matrice

Termoplastové polymery pro matrici mohou značně redukovat cenu kompozitů a v poslední době je jim věnována značná pozornost. Cenové úspory jsou především výsledkem snadnější výroby i složitých tvarů. Výhodou je poměrně dobrá dimenzionální stabilita, malý obrus (zejména při použití C vláken), zvýšená pevnost, modul a houževnatost.

Z termoplastů, které přicházejí v úvahu pro vyztužování vláken, jsou nejčastější PA6,6, PE, PP, PC, SAN, PBT, PSU, PPS, PVDF, PES, TFE. K vyztužení jsou vhodná skleněná vlákna (z levného A-skla), uhlíková a aramidová nebo jejich kombinace (hybridní kompozity).

Vlastnosti těchto kompozitů – jsou nehomogenní a anizotropní – velmi závisí na výrobním postupu (ovlivňuje složení vláken, jejich orientaci, distribuci délek, stupeň porušení vláken), na pevnosti a na jiných vlastnostech (teplotní vodivosti, houževnatosti), na povrchové úpravě vláken (ovlivňující soudržnost s matricí) a na viskoelastickém chování matrice (v závislosti na teplotě).



Obr. č. 8 : Termoplastická matrice

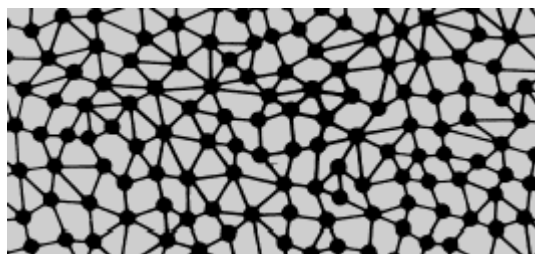
1.4.2 Termosetické matrice

Termosety vyztužené vlákny jsou nesporně nejrozšířenější konstrukční kompozity a od prvních skelných laminátů v polyesterové matrici zasahují dnes do všech odvětví průmyslu s širokým rejstříkem matricí, výtzuží, uspořádání, způsobů výroby a vlastností.

Vlákna mohou být organizovaně uspořádána rozmanitým způsobem nebo náhodně orientována. Po vláknech skleněných (E, M, S-sklo), která nemohou poskytnout konstrukcím dostatečnou tuhost vzhledem k nízkému modulu, se v posledních letech nejvíce uplatňují vlákna uhlíková, borová, keramická, kovová, aramidová nebo jejich

vzájemné kombinace. Pro některé aplikace se používají i přírodní vlákna (juta, sisal), nejčastěji v kombinaci se skleněnými vlákny.

Pro matrici jsou nejrozšířenější polyesterové, epoxidové, melaminové a siloxylové pryskyřice (7).



Obr. č. 9 : Termosetická matrice

1.5 Členění kompozitu

Při rozšiřujících se možnostech vzájemného kombinování složek, které kompozit vytváří, se stává členění kompozitů komplikovaným problémem. Vzhledem ke složení lze kompozity rozdělovat :

- a) podle materiálů vytvářených matrici na kompozity s kovovou , polymerní a anorganickou (nejčastěji keramickou) matricí,
- b) podle geometrického tvaru sekundární fáze na kompozity s částicovými a vláknitými plnivy. Stále větší význam mají kombinované hybridní systémy s částicovými a vláknitými plnivy

1.6 Kompozity s částicovými plnivy

U polymerních kompozitů s částicovými plnivy jsou kromě *tvaru částic* (sférického, destičkového, jehlicového, nepravidelného) důležité jejich *termomechanické vlastnosti* (teplotní roztažnost tuhost, deformační vlastnosti). Anorganická plniva (např. CaCO_3 , oxidy křemíku a hliníku, malé skleněné kuličky o průměru 5 – 500 μm , zvlášť jemně mletá slída, mikroskopické částice kovu) jsou tužší a zpravidla i pevnější než polymerní matrice, přičemž jsou málo plastické (mimo částice kovu), proto i jimi vytvořené kompozity jsou tužší než matrice a získávají podle typu plniva některé speciální fyzikální a mechanické vlastnosti (větší elektrickou a tepelnou vodivost, menší teplotní roztažnost, lepší kluzné vlastnosti apod.).

Málo tuhé elastomerní částice, které se snadno elasticky deformují, naopak zmenšují tuhost matrice a současně zvětšují jejich houževnatost a někdy zlepšují i odolnost proti cyklické únavě.

V následující části bakalářské práce se omezím pouze na vzájemné porovnání odlišného vlivu sférických částic různé tuhosti na relativní změnu modulu pružnosti kompozitu, ve srovnání se změnami, které přinášejí vláknitá plniva.

Vláknitá výztuž při vhodné orientaci vláken k působícímu silovému toku umožňuje dosáhnout většího zvýšení tuhosti než plniva částicová. Její přínos je však ještě významnější, požaduje-li se kompozit s velkou pevností. Částicová plniva s výjimkou tzv. aktivních plniv s velmi malými rozměry, ale velkým povrchem částic (jako např. saze nebo silikagel) pevnost polymerních matric nezvyšují a často zmenšují i jejich houževnatost.

1.7 Kompozity s vlákny

1.7.1 Zásady při vyztužování

Pro dosažení požadované tuhosti a pevnosti kompozitu je nutné zvolit vhodný typ vlákna a jeho objemový podíl ϕ_v v kompozitu (index v = vlákna)

Dosud omezeně vyráběná monokrystalová vlákna (tzv. whiskery) z karbidu křemíku, hliníku a boru, nitridů hliníku a křemíku, oxidů hliníku, křemíku a titaničitanu draselného jsou doposud velmi drahá a poměrně krátká (10^{-3} m při průměru $0,1 - 10 \mu\text{m}$). Protože jsou však velmi málo defektní, je jejich pevnost v tahu o jeden řád větší než u dosud používaných vláken (20 – 30 GPa).

1.7.2 Vyztužování nekonečnými vlákny

Při dostatečné tuhosti a pevnosti vláken jsou vnější síly přenášeny především výztuží, pokud je matricí zajištěna jejich vzájemná soudržnost až do lomu kompozitu. To vyžaduje, aby bylo mezní poměrné prodloužení, jinými slovy tažnost, matrice ϵ_{um} větší než vláken ϵ_{uv} . Pokud je $\epsilon_{um} < \epsilon_{uv}$, není matrice schopná zajistit celistvost kompozitu a pevnost vyztužujících vláken není optimálně využita.

Význam dostatečně velké tažnosti matrice se ještě ve větší míře projeví při namáhání jednosměrně vyztuženého kompozitu kolmo na podélnou osu vláken.



Obr. č. 10 : Profil vyztužený nekonečnými skleněnými vlákny

1.7.3 Vyztužování krátkými vlákny

Při použití krátkých vyztužujících vláken je důležitá správná volba délky vláken, musí být větší než kritická délka l_c . Namáhání vnesené do kompozitu se přenáší z matrice do vláken smykovým napětím, působícím na povrchu vlákna. Jeho velikost se od okraje vláken k jejich středu mění.

U konců vláken vznikají špičky smykového napětí τ . V těchto místech je tahové napětí τ_v přenášené z matrice do vlákna smykovými silami, působícími na jeho povrchu, nulové.

Smykové napětí τ se směrem ke středu zmenšuje a pokles je úměrný rozdílu v deformaci matrice a v deformaci vlákna. Tahové napětí τ_v působící ve směru podélné osy vlákna od konců směrem k jeho středu vzrůstá a je úměrné integrální hodnotě přenesených smykových sil. Po dosažení určité vzdálenosti od konce vlákna l_t je dosaženo konstantní úrovně tahového napětí σ_v . Vláknem je v kompozitu optimálně využito, jestliže přenášené napětí σ_v dosáhne mezní pevnosti σ_{uv} . Tato podmínka může být splněna pouze u vláken nadkritických délek.

Odvození kritické délky vlákna l_c vychází z rovnováhy působící tahové síly ve střední části vlákna, vyvozené smykovým napětím τ_u a síly potřebné na jeho porušení.

$$\pi d (l_c / 2) \tau_u = \pi (d / 2)^2 \sigma_{uv} \quad (1)$$

kde d je průměr a l_c kritická délka vlákna, τ_u odpovídá menší z hodnot smykové pevnosti matrice nebo adhezní pevnosti na rozhraní fází, σ_{uv} je pevnost v tahu vlákna.

V kompozitech však dosahuje objemový podíl vláken ϕ_v desítky procent a kritická délka vláken závisí na jejich orientaci a objemovém podílu.

Při jednosměrné orientaci vláken kritická délka l_c závisí významně na objemovém podílu vláken a relativní tuhosti. Příkladem je např. polyamid vyztužený krátkými skleněnými vlákny.

1.7.4 Elastické charakteristiky

Jsou-li známy vlastnosti složek vytvářejících kompozit, lze za určitých zjednodušujících předpokladů elastické charakteristiky kompozitu vypočítat. Tímto způsobem je možno stanovit výběr vhodného typu vlákna, způsob vzájemného uspořádání vláken ve vrstvě, počet vrstev a jejich vzájemnou orientaci.

Vláknité kompozity se podle způsobu uložení vlákna dělí na materiály s uspořádaným systémem výztuže (sdružená paraelní nekonečná vlákna tzv. *roving* nebo *tkaniny*) a s náhodně uloženými vlákny (rohože, krátká vlákna). V prvním případě má kompozit anizotropní vlastnosti, které jsou dané způsobem uložení vláken. Při nahodilém uložení vláken je počet ve všech směrech přibližně stejný. Takový materiál se považuje za izotropní nebo pseudoizotropní.

Elastické vlastnosti anizotropních systémů se charakterizují moduly pružnosti E a G (a příslušnými hodnotami Poissonova poměru ν) s přihlédnutím k uspořádání strukturních elementů. U anizotropních kompozitů je takovým elementem ortotropní vrstva. Jde-li o jednosměrně vyztužený kompozit, jeho elastické vlastnosti popisuje pět nezávislých modulů pružnosti.

Jestliže jsou vzájemné polohy vláken ve vrstvách pravidelně (kubické uspořádání), má kompozit šest navzájem nezávislých modulů pružnosti. Naopak při nahodile uspořádaných vláknech v rovině (kompozit vyztužený rohoží) charakterizují kompozit pouze čtyři navzájem nezávislé moduly pružnosti. U kompozitu vyztužených krátkými vlákny neuvažujeme E , G a ν za směrově závislé.

1.7.5 Moduly pružnosti kompozitu vyztužených dlouhými vlákny

Za předpokladu, že jsou všechna vlákna identická a že leží ve směru působícího vnějšího napětí a při deformaci nedochází k posuvům vláken vzhledem k matici, jsou deformační změny obou složek stejně velké.

Působící napětí σ se rozkládá na obě složky v závislosti na jejich objemovém podílu φ . Hodnota maximálního možného objemového podílu vláken závisí na pravidelnosti jejich vzájemného uspořádání v rovinách. Při kubickém uložení je $\varphi_{\text{v max}} = 0,785$, při nahodilém 0,85 a při hexagonálním 0,92.

Přibližně stejnou tuhost kompozitů v různých směrech v rovině, za cenu menších hodnot modulů pružnosti E , lze získat při vhodném vzájemném natočení jednotlivých ortotropních vrstev a při jejich dostatečném počtu. Podobného efektu lze docílit použitím netkaných rohoží s nahodile orientovanými vlákny ve vrstvě. Takové kompozity mají hodnoty modulu pružnosti E_r v libovolném směru sice menší než modul pružnosti ve směru orientace vláken ortotropní vrstvy E_{11} , ale podstatně větší, než je modul pružnosti kolmo na směr orientace vlákna E_{22} . Pro řadu složitě namáhaných výrobků je to velice výhodné.

1.7.6 Moduly pružnosti kompozitů vyztužených krátkými vlákny

Moduly E a G jsou závislé na aspektivním (štíhlostním) poměru vyztužujících vláken (l/d , kde l je délka a d je průměr vlákna) a na převažující orientaci vláken ke směru působícího napětí. Moduly pružnosti kompozitů s krátkými vlákny se s rostoucím štíhlostním poměrem l/d zvětšují.

1.7.7 Pevnost kompozitů a jejich porušování

Pevnost nejvíce snižují *defekty na rozhraní fází* vyplývající z jejich špatné vzájemné soudržnosti a z rozdílných součinitelů teplotní roztažnosti a modulů pružnosti.

U kompozitů vyztužených jednosměrně dlouhými vlákny dochází k odlišnému způsobu porušení podle směru namáhání. U kompozitu namáhaných pod úhlem $0 - 5^\circ$ o pevnosti v tahu ve směru orientace vláken rozhoduje především pevnost vláken. Pevnost v tahu lze určit z pevnosti vláken σ_{uv} a napětí σ_m v matrici odpovídající její deformaci, když dosáhnou vlákna mezního prodloužení při lomu kompozitu (předpokladem je, že tažnost matrice je větší než tažnost vláken).

U kompozitů namáhaných pod úhlem $5 - 45^\circ$ rozhoduje o pevnosti v tahu jak pevnost ve smyku matrice τ_{um} , tak adhezní pevnost na rozhraní mezi fázemi. Při namáhání

kompozitu kolmo na vlákna je pevnost vláken přibližně poloviční než pevnost v tahu matrice σ_{um} .

Pevnost kompozitů s krátkými, nahodile usměrněnými vlákny je komplikována tím, že na koncích vláken dochází k lokální koncentraci smykových napětí na rozhraní fází. Proto je zpevňující účinek krátkých vláken menší než u vláken dlouhých.

1.7.8 Porušování kompozitů vyztužených dlouhými vlákny při statickém

a cyklickém namáhání

Kompozity vyztužené dlouhými vlákny jsou výhodné k výrobě cyklicky namáhaných součástí. Deformace těles jsou i při vysokých úrovních namáhání velmi malé. To se příznivě projevuje ve značně malém namáhání matrice, jejíž vlastnosti spolu s kvalitou rozhraní rozhodují o životnosti cyklicky namáhaného kompozitu. Příčinou je odlišný mechanismus šíření trhliny při statickém a cyklickém namáhání kompozitu s dlouhými vlákny. Při statickém namáhání se trhlina z centrálního makrodefektu šíří podobně jako u stejnorodých materiálů (kolmo na směr hlavního tahového napětí). Při cyklickém namáhání dochází již v průběhu několika cyklů k četným defektům na rozhraní fází, zejména v místech s nedostatečnou soudržností (u konce vláken, v jejich ohybech a v místech překřížení). V těchto místech vznikají podobně jako ve vrcholech vrubů lokální smyková napětí, která působí ve směru rovnoběžném s působícím tahovým napětím (ve směru orientace vláken). Trhlina se proto nešíří přes vlákna, nýbrž vyhledává slabá místa mezi vlákny za současného porušování matrice.

Výhodou kompozitu pro použití při dlouhodobém cyklickém namáhání je to, že nedochází k lokalizovanému, rychlému rozšíření trhliny jako u stejnorodých materiálů. Naproti tomu při opakovaném namáhání se vytvářejí v kompozitu defekty již v prvních cyklech. Další průběh postupného porušování, které vede ke ztrátě tuhosti a snížení zbytkové pevnosti, ovlivňují mimo vlastnosti materiálu použitých k výrobě kompozitu zejména technologické podmínky zpracování (smáčení povrchu vláken, dokonalost vytvrzení pojiva, neprosycená místa ve svazcích vláken apod.).

1.7.9 Lomová houževnatost kompozitů vyztužených dlouhými vlákny

Kompozity vyztužené dlouhými vlákny mají lomovou houževnatost mnohonásobně větší než plasty nevyztužené, přestože lomová houževnatost vyztužujících vláken a

zesíťovaných polymerních matric (epoxidů, nenasycených polyesterů) bývá malá. Příčinou velkých hodnot K_{Ic} kompozitů je energie spotřebovaná na vzájemné oddělení fází (rozvrstvení) při separaci vláken od pojiva, kdy dochází ke vzájemnému tření a k deformování fází. Další energie se spotřebuje na vytažení konců uvolněných a porušených vláken, původně zakotvených v matrici. Hodnoty dílčích energií závisejí na objemovém podílu vláken ϕ_v , jejich mechanických vlastnostech, dále na střední délce rozvrstvení a na střední kritické délce volných, z matric vytažených vláken. U skleněných vláken je dominantní energie spojená se vzájemným třením uvolněných fází (4).

1.8 Skleněná vlákna a výrobky z nich

Základní surovinou pro výrobu skleněných vláken určených pro plasty vyztužené sklem je bezalkalická borosilikátová sklovina E, obsahující méně než 1% alkálií, která dává vláknu výborné fyzikální vlastnosti. V menším měřítku se pro méně náročná použití zpracovává i alkalická sklovina. Z těchto surovin se vyrábí buď nekonečné vlákno (*rayon*), nebo vlákno určité délky (*stapl*). Skleněná elementární vlákna pro laminování mají tloušťku kolem 0,009 mm a pevnost v tahu kolem 600 MPa, což je několika násobek pevnosti bavlněného vlákna. Skleněné vlákno je však poměrně křehké a proto se před dalším zpracováním opatřuje organickým povlakem (*lubrikací*). Ze skleněných vláken se připravují pramence, rohože, stříž, příze a tkaniny. Příze vyrobené z elementárních vláken jsou základní surovinou pro výrobu tkanin. Pro vrstvené hmoty jsou nejvýhodnější příze bezzákrutové. Z radonové příze je vyráběn pestrý sortiment různých typů tkanin, lišících se vazební technikou i druhem příze.

Skleněné prstence jsou vytvářeny asi 60 rovnoběžně uloženými vlákny, složenými ze 200 elementárních vláken. Vlákna jsou spojena lubrikací. Pramence se buď zpracovávají přímo při kontinuální výrobě tyčí a trubek, nebo slouží jako surovina pro výrobu sekaných pramenců a rohoží ze sekaných pramenců.

Rohože jsou důležitou surovinou pro polyesterové vyztužené materiály. Pramence se nasekají na stříž délky cca 5 cm, která se nepravidelně rozprostře do rohože a spojí emulzí roztoku nenasyceného polyesteru. Nasekáním pramence na délku 6 – 50 mm se připraví stříž používaná pro formovací a stříkáci polyesterové směsi.

Druh skleněné výztuže je jedním z rozhodujících činitelů udávajících mechanickou pevnost vyztuženého plastu. Dalším činitelem je i obsah skleněných vláken, který se liší

podle skleněné výztuže. Optimální obsah je u výrobků ze sekaných pramenců 45 – 55 hmot.%, u tkanin 60 – 70 hmot.% a u výrobků z pramenců 75 – 80 hmot. %. (8)

1.9 Výroba vyztužených hmot

Nenasycené polyesterové pryskyřice (UP) a výrobky ze skleněných vláken jsou zpracovávány na vyztužené plasty nejrozličnějšími způsoby. Nejjednodušším způsobem je ruční kladení. Při tomto způsobu se používá jednodílná forma jako patrice nebo matrice podle toho, která strana výrobku má mít hladký povrch. Forma se nejprve natře separátorem, který zabraňuje přilepení výrobku na formu a usnadní snímání či vyjímání vytvrzeného výrobku. Jako separátor slouží silikonový olej, vosky, parafín, stearin, mýdla, PVAL nebo celofán. Skleněná výztuž a iniciovaná pryskyřice se nanášejí tak, aby se dosáhlo rovnoměrného propojení a odstranění bublinek vzduchu. Vytvrzení podle použitého iniciačního systému probíhá za pokojové teploty nebo v sušárně při teplotě 60 – 100⁰ C. Výhodou ručního kladení je nepatrný náklad na formy, nevýhodou je velká potřeba lidské práce a špatné hygienické podmínky. Obsah skleněné výztuže bývá 30 – 50 hmot.%. Postup je vhodný pro předměty velkých rozměrů a pro malé série výrobků.

Pro velké série výrobků je výhodné lisování za tepla a tlaku v kovových formách. Výhodou práce ve dvoudílné formě je perfektní hladkost všech ploch.

Z hlediska vzájemného působení plniv a polymeru můžeme plniva rozdělit na *neaktivní* a *aktivní*. Aktivita je podmíněna v podstatě vzájemnou adhezí polymer-plnivo. Adheze odpovídá fyzikálně-chemickému charakteru povrchů na fázovém rozhraní a určuje rozsah sorpčních procesů na tuhém povrchu i druh vazeb polymer-plnivo.

U lineárních a síťovaných polymerů je základním výsledkem adsorpční interakce v podstatě omezení pohybu segmentů a mírně zvětšení pohybu postraních skupin. Omezení pohyblivosti makromolekul a i nadmolekulárních struktur plnivem ztěžuje průběh relaxačních procesů a způsobuje zvětšení modulu pružnosti a vzrůst hodnoty T_g .

Naopak pokud plnivo pohyblivost strukturních elementů neovlivňuje nebo ji ovlivňuje jen nepatrně, nenastává žádné zvětšení modulu E.

1.9.1 Pultruze

Pultruze je technologický postup výroby tažených kompozitních profilů kontinuálním způsobem. Kompozit se skládá z materiálu výztuže a polymerní matrice. Nejčastěji se

používá nenasyčená polyesterová pryskyřice a výztuž ze skelných vláken. Pro nejnáročnější aplikace se používá epoxidová pryskyřice a vlákna kevlarová, uhlíková a apod.. Pultruzně tažené profily se vyznačují vysokou přesností, pevností, korozní odolností, životností a naopak nízkou hmotností a nároky na údržbu. Skladbu použité výztuže a její poměr k pryskyřici lze měnit a tak optimalizovat vlastnosti laminátových profilů pro konkrétní případy použití .



Obr. č. 11 : Výrobní linka pro pultruzní tažení

1.9.2 Vlastnosti pultruzně tažených profilů

Kromě uvedených vlastností je třeba zdůraznit dobrou pevnost v tlaku, vysokou rázovou houževnatost, vynikající elektricky izolační vlastnosti, korozní odolnost i vůči agresivním látkám a hlavně nízkou hustotu od 1500 do 1900 kg / m³ . Uvedené hodnoty platí pro profily s běžnou skladbou a středním podílem výztuže. Zvýšením podílu jednosměrně orientovaných skleněných vláken lze zvýšit pevnost v tahu na 80 až 100 MPa.

Pultruzně tažené sklolaminátové profily mají (jsou):

- výrazně nižší hmotnost oproti ocelovým i hliníkovým profilům stejného průřezu (jen $\frac{1}{4}$ hmotnosti oceli, $\frac{2}{3}$ hmotnosti hliníku).
- vyšší pevnost než nosníky hliníkové stejného profilu – pro stejnou pevnost je možno vyrobit laminátový profil o menším průřezu a snížit tak hmotnost oproti hliníkovému profilu až o 45 %.
- šetří oproti ocelovému nosníku stejné tuhosti minimálně 45 % hmotnost
- vyšší pružnost tj. odolnost proti trvalé deformaci, než kovové profily

- oproti jiným plastům i proti hliníku vyšší pevnost v tlaku
- vyšší tepelnou odolnost proti jiným plastům (s výjimkou PTFE)
- výrazně nižší tepelnou roztažnost než jiné plasty (srovnatelnou s kovy)
- nízkou tepelnou vodivost
- elektricky nevodivé
- korozivzdorné bez nutnosti povrchových úprav
- v přírodním stavu bílé barvy, dají se však probarvovat přímo ve hmotě
- tvarovou a rozměrovou přesnost srovnatelnou s protlačovanými Al profily

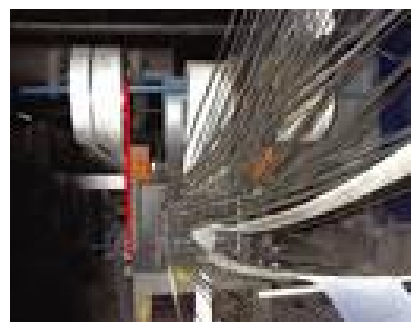
Oproti ocelovým konstrukcím mají konstrukce z uvedených laminátů výrazně nižší hmotnost a vysokou korozní odolnost a i při vyšší ceně profilů jsou v mnoha případech konkurenceschopné. Oproti hliníkovým konstrukcím jsou nejen lehčí, ale i levnější.

1.9.3 Příklady použití pultruzně tažených profilů v praxi

Pultruzně tažené sklolaminátové profily se používají např. pro účely :

- konstrukce krovů lehkých střech (pro svou lehkost)
- nosné konstrukce skleníků a zimních zahrad, autobusových zastávek apod. (pro lehkost a korozní odolnost)
- samonosná střešní krytina s nižšími nároky na podpěrnou konstrukci střechy
- sloupky a tyče dopravních značek, sloupů osvětlení apod. (pro pevnost, korozní odolnost a vzhled)
- silniční svodidla (pro pevnost, pružnost, korozní odolnost a barvu zvyšující bezpečnost)
- různé spojovací profily, např. rohové profily skříňových nástaveb vozidel (pro lehkost, korozní odolnost, vzhled a nízkou tepelnou vodivost)
- různé typy obkladů (pro korozní odolnost a vzhled)
- okenní a dveřní rámy (pro pevnost, korozní odolnost, tvarovou stálost a nízkou tepelnou vodivost)
- základní desky elektrických rozvodných skříní a instalací, nosné tyče izolátorů rozvodů vysokého napětí (pro elektroizolační vlastnosti)
- sportovní potřeby, např. lyžařské hole a výztuže hokejových holí (pro svou pevnost, pružnost, korozní odolnost, vzhled a jeho trvanlivost, nízkou tepelnou vodivost – příjemný omak ve studeném prostředí).

Pultruzně tažené profily jsou kompozitní profily vyráběné na bázi pryskyřičných matric a výztuží ze skleněných, uhlíkových nebo aramidových vláken. Pultruzní metodou vyráběné profily mohou mít specifické vlastnosti, jinými způsoby výroby těžko či vůbec dosažitelné. Pultruzně tažené tlustostěnné profily obsahují až 10 milionů skleněných vláken a tím se dosahuje nových významných vlastností. Mnohé z těchto vlastností se dají naprogramovat či optimalizovat pro konkrétní aplikace a tedy tyto profily „šít na míru“ podle potřeb zákazníka (8).



Obr. č. 12 : Pultruzně tažené profily skleněných vláken

MĚŘENÁ VLASTNOST	JEDNOTKY	PP	POLYPROPYLEN + SKLENĚNÁ VLÁKNA		
			20 %	30 %	40 %
TVRDOST	SHORE “D“	72	78 - 79		
MODUL	N.mm ⁻²	1240	3090-4110	3620-6570	6178-6766
MEZ KLUZU	MPa	35	neuvedeno		
TAŽNOST	%	min. 200	3,6 - 4	4	1 - 2
HUSTOTA	kg.m ⁻³	900 - 910	1,05 . 10 ³	1,12 . 10 ³	1,22 . 10 ³

Tab.č. 2:.. Porovnání vlastností polypropylénu (PP) a PP plněného skelnými vlákny při pultruzní výrobě

Přidáním skelných vláken do čistého polypropylénu se výrazně zvýší modul pružnosti a zmenší se tažnost materiálu. Hustota a tvrdost se výrazněji nezmění

1.9.4 Skleněná vlákna do cementových hmot

Sklo ve tvaru kontinuálních vláken má vlastnosti, které jej předurčují jako velmi vhodnou výztuž do cementových a betonových hmot. Aplikace skleněných vláken do betonu je mnohem mladší (druhá polovina 90-tých let). Je tomu tak proto, že dříve nebyly k dispozici vhodné typy pramenů alkalivzdorných skleněných vláken použitelných do betonové směsi.



Obr. č.13 : Tažení kontinuálního skleněného vlákna

Roztavená sklovina o teplotě až 1560 °C protéká přes platinoiridiové perforované destičky. Vzniklá monovlákná rychle chladnou a je na ně ihned nanášena povrchová lubrikace, která je spojuje do pramenů a je rozhodující pro další použití vláken. Technologie výroby kontinuálních vláken umožňuje zajistit i zdravotní bezpečnost výrobku. Kritérium karcinogenity pro vlákna stanovuje jako kritický průměr vláken do 3 μm . Průměry skleněných vláken typu Cem-FIL jsou 14 μm , což je vysoko nad požadovanou hranicí.



Obr. č.14 : Porovnání azbestových a skleněných vláken Cem-FIL

Hmoty na cementové bázi však kladou ještě další požadavek na skleněné vlákno a tím je odolnost proti silně alkalickému prostředí (pH 12 až 14). Koncem 60-tých let bylo ve Velké Británii vyvinuto alkalivzdorné skleněné vlákno Cem-FIL tzv. zirkoničitého typu. Alkalirezistence vláken je měřena speciální zkouškou SIC (strand in cement). Výsledkem zkoušky je pevnost vlákna v tahu po expozici v alkalickém prostředí cementového tělíska ve vodě za vysokých teplot. Běžné skleněné vlákno typu E (eutralové) je v prostředí cementové matrice rychle napadááno a velmi rychle zcela ztrácí výztužnou schopnost.



Obr. č. 15 : Vlevo vlákno typu E po několika týdnech v betonu , vpravo vlákno Cem-FIL po několika letech expozice v betonu.

Kromě složení skloviny má pro alkalivzdornost velký význam i výše zmíněná lubrikace vláken.

1.9.5 Dva rozdílné požadavky na vlákno

Použití vláknité mikrovýztuže do betonu se dá v zásadě rozdělit na dvě oblasti. První je zabránit, nebo výrazně omezit vznik trhlin v betonu nebo maltách během zrání. Druhou je zvýšení pevností vyzrálého betonu. Jako pro každou výztuž, platí i zde, že modul pružnosti výztuže musí být vyšší než modul pružnosti vyztužované hmoty. Nízkomodulová organická vlákna nejsou schopna beton vyztužovat a jejich účinnost je omezena pouze na několik prvních hodin tuhnutí a tvrdnutí betonu. Lubrikace také musí zajišťovat tzv. cementonosnost – schopnost smáčení v cementové pastě a pozitivně ovlivňovat reologii směsi.

1.9.6 Skleněná rozptýlená výztuž

Druhou oblastí použití skleněných alkalivzdorných vláken je zvýšení pevnosti betonu v tahu za ohybu, rázu a houževnatosti. Zde již musí jemná vlákna působit v prameni. Pro aplikace do betonu musí prameny odolat tření při míchání s kamenivem a stejně tak je tomu i při výrobě suchých směsí. Došlo-li by při míchání k rozbití pramene, mohou vznikat shluky rozbitých vláken, jejichž výztužná schopnost je prakticky nulová. Speciálním typem skleněných pramenů s otěruvzdornou lubrikací určenou do betonu a suchých směsí jsou prameny *ANTI-CRAK HP*. Pramen je tvořen 100 kusy monovláken a jejich spojení lubrikací je zároveň dostatečně odolné otěru a dostatečně poddajné, aby nedocházelo ke zlomení pramene. Navíc tato lubrikace výrazně zvyšuje alkalivzdornost pramenů na nejvyšší světovou úroveň (Cem-FIL 2). Lubrikace také musí zajišťovat tzv. cementonosnost – schopnost smáčení v cementové pastě a pozitivně ovlivňovat reologii směsi.



Obr. č. 16 : Pramen vláken *Cem-FIL ANTI-CRAK HP* v betonu

1.9.7 Plošné výztuže ze skleněných vláken

Relativně nové je uplatnění plošných výztuží z AR vláken, které lze rozdělit na mřížky -sítě, orientované prameny a rohože. Plošné výztuže z alkalivzdorných vláken jsou používány v technologiích výroby desek na linkách např. technologie Durapact. Mimo tuto oblast se v zahraničí a v posledních letech i u nás nejvíce používají rohože *Cem-MAT*. Jedná se o plošnou výztuž z 50 mm dlouhých pramenů Cem-FIL o plošné hmotnosti 120 g spojených dohromady ve vodě rozpustným lepidlem.

1.10 Interakce plniva nebo výztuže s polymerem

ovlivňují tyto fyzikální vlastnosti :

Modul pružnosti : plniva i výztuže jej zvětšují a to výztuže více než plniva

Pevnost v tahu : výztuže jí zvětšují, plniva zmenšují

Houževnatost : výztuže jí mohou zvětšovat i zmenšovat, plniva ji podstatně zmenšují

Teplotní vlastnosti : plniva i výztuže je zlepšují, přičemž výztuže výrazněji

Smrštění : plniva i výztuže je zmenšují, u vláken je ve směru podélné osy (nebo ve směru tečení směsi) smrštění menší než ve směru kolmém k podélné ose.

Mezi rozhodující charakteristiky patří druh, množství, tvar a velikost částic plniva a druh použitého spojovacího prostředku.

1.11 Druhy plniv a výztuží

1.11.1 Skleněná plniva

Skleněná plniva a vyztužovadla se používají převážně ve formě vláken, tkanin, rohoží, mikrokuliček a vloček.

Rozlišují se tyto typy skel :

A – sklo : alkalické sodno-vápenato-hlinité bezborité sklo II., popř. III. hydrolytické třídy. Mechanické vlastnosti se blíží E-sklu.

C – sklo : vápenato-hlinito-borité sklo I. hydrolytické třídy, obsah alkálií je do 2%.

E – sklo : bezalkalické vápenato-hlinito-borité sklo I. hydrolytické třídy pro aplikace v elektrotechnice, obsah B_2O_3 v rozmezí 8 – 12%.

Doporučuje se tam, kde se vyžaduje velká propustnost světla a maximální mechanické vlastnosti (cca o 10 % lepší než u A-skla). Používá se pro výztuže polyesterových skelných laminátů a epoxidových laminátů i pro plnění polyamidu (sekaný roving B 54).

1.11.2 Skleněná vlákna

Skleněná vlákna mají největší uplatnění při výrobě *skelných laminátů* (tzv. sklolaminátů) na bázi nenasycených polyesterových pryskyřic. Jde opět o speciální bezalkalickou boritou sklovinu obsahující méně než 1% alkálií (0,0 – 0,12 mg Na_2O) a mající dobrou hydrolytickou odolnost podle výluhu.

Skleněná vlákna se musí zbavit lubrikačních činidel, kterými byla opatřena ihned po spředení, aby se usnadnila textilní, popř. pletářská manipulace. Tato textilní úprava skleněných vláken zhoršuje jejich adhezi k pryskyřici.

Pro zvětšení adheze skleněného vlákna k pryskyřici se delubrikovaná vlákna *apretují* tj. opatřují se pojivou vrstvičkou látky, která je schopna vytvářet vazbu mezi sklem a pryskyřicí. Používá se např. chlorid methakryláto-chromitý – (obchodním názvem *Volan A*), který je vhodný i do skel pro epoxidy a fenolické vrstvené materiály. Ještě lépe působí vinyltrichlorsilan (obchodním názvem *Garan*), vhodné jsou i isokyanáty, polyvinylpyrrolidony apod.



Obr. č. 17 : Svazky skleněných vláken

1.11.3 Skleněné mikrokuličky

Používají se plné nebo duté kuličky. Plné kuličky se nazývají *balotina* (původní výrobce *Ballotini*, Belgie, NSR, Velká Británie). Dodávají se ve velikostech od 4 do 5 000 μm (10). Jimi plněné směsi se vyznačují dobrou zatékavostí, neboť viskozita pouze mírně vzrůstá, což umožňuje použít i velkého obsahu plniva. Kompozity vykazují izotropní chování a jejich povrch je hladší. Udává se příznivý vliv kuliček na mechanické vlastnosti, jako je zvětšení pevnosti v tahu a v ohybu, modulu pružnosti a pevnosti v tlaku. Resp. Snížení tažnosti, houževnatosti a tečení za studena. Nasákavost vodou a odolnost k hoření mají kompozity plněné balotinou stejné jako kompozity plněné skleněnými vlákny, výrobní náklady jsou však ve srovnání s vlákny nižší.

Lisováním polyamidů se vyrábějí např. speciální cívky pro tiskárny samočinných počítačů. Výlisky vyžadují obsah mikrokuliček asi 25 hmot. %. Materiál proudí pětikrát lépe než polyamid vyztužený vlákny a snadno vyplňuje jemné části formy.

V České republice je zavedena výroba balotiny v Jabloneckých sklárnách v Dolním Porubném, kde se vyrábějí o rozměrech 0,1 až 0,5 mm. Jako surovina se používá většinou sklo typu A. Někdy se kuličky kombinují s vlákny. Používají se především pro polyamidy

(injekčně vstřikovaný polyamid 6/6 obsahuje až 40 hmot. % skleněných kuliček), ABS a PVC.

Lehčené duté mikrokuličky

Vyrábějí se z alkalického skla (*Glass Beads*), snižují cenu a hmotnost a zlepšují nehořlavost kompozitu. Mají hustotu 1420 kg / m^3 a tloušťku stěny $1 \mu\text{m}$ (výrobce Emerson a. Cuming, USA pod označením *Eccospheres FTD 146*) nebo 1750 kg / m^3 (výrobce Philadelphia, Quartz Comp., USA, označení *Q-Cel*). Jsou velmi pevné (11). V České republice se vyrábějí v Neštěmicích.

1.11.4 Skleněné vločky

Skleněné vločky se vyrábějí z poloalkalické sodno-vápenato-hlinité skloviny A na rozhraní II. a III. třídy vyluhovatelnosti drcením folií o tloušťce $0,15$ až $0,20 \mu\text{m}$ a tříděním. Používají se hlavně do reaktoplastů, např. do polyesterů pro zvětšení odolnosti proti plísni a kyselinám (10).

1.12 Vliv obsahu plniva a délky vláken na vlastnosti kompozitu

U termoreaktivních pryskyřic, vykazuje závislost mechanických vlastností na obsahu plniva obvykle maximum při velkém obsahu plniva (až několik desítek hmot. %).

Všeobecně však nelze udat optimální koncentraci plniva v plastu, neboť vždy záleží na dané aplikaci, na kombinaci požadovaných vlastností a způsobu zpracování, i na jeho velikosti částic a povrchové úpravě.

Při plnění krystalických polymerů ovlivňuje koncentrace plniva do značné míry kinetiku a termodynamiku krystalizace a vlastnosti mezifázové vrstvy. Pevnostní a elastické vlastnosti plněného polymeru jsou funkcí stupně plnění.

Např. u polykaprolaktamu plněného skleněnými vlákny při nízkých koncentracích plniva, kdy jeho částice jsou mezi sebou málo spojeny, působí vlákna převážně jako plnivo. Teprve při vyšších stupních plnění vytvářejí vlákna prostorový skelet a začínají se uplatňovat jako výztuž (v závislosti na své délce).

U vstřikovaného polyamidu se běžně používá $20 - 40$ hmot. % vláken, u polymeračně odlévaného polyamidu až 65 hmot. %. Pevnost v tahu sice vzrůstá s obsahem skla, avšak

teprve při větších koncentracích. Zpočátku při obsahu cca 5 hmot. %, dosahuje pevnost v tahu minimální hodnoty (12).

K opětovnému vyrovnání dochází až při cca 10 hmot. % skla. Podobný průběh vykazuje i vrubová houževnatost s relativně ostrým maximem kolem cca 30 hmot. %. Pevnost v ohybu vykazuje maximum při cca 50 hmot. %. Tento jev je vysvětlován vyztužujícím účinkem mřížky z vláken kompozit při obsazích kolem 30 hmot. % a nedokonalým rozptýlením a smočením plniva při jeho větším obsahu.

Je nutno konstatovat, že poměry a závislosti jsou specifické nejen pro každý polymer odlišného chemického složení, ale i pro každý typ polymeru s ohledem na jeho relativní molekulovou hmotnost, obsah nízkomolekulárních látek, obsah krystalické fáze, skladbu směsí atd., nehledě na odlišnosti jednotlivých druhů plniv.

U vláken je velmi důležitou charakteristikou jejich velikost, resp. anizotropnost rozměrů (13). Elastické pevnostní chování kompozitního materiálu je tedy do značné míry určováno délkou vláken a jejich orientací.

Existuje kritická hodnota aspektivního poměru l/d pro minimální vyztužení, z níž je možno odvodit kritickou délku vlákna (l_c), pod níž k vyztužení polymeru nedochází. Tato kritická délka je definována vztahem :

$$l_c = d T_f / 2 T_{fp} \quad (2)$$

kde d je průměr částic, T_f je pevnost vláken v tahu, T_{fp} pevnost adheze mezi vlákny a polymerem.

Pro funkci vláknitého plniva v kompozitu je však důležitá i distribuce jeho délky, která má být co nejužší. V praxi se většinou používají vlákna dvojího typu (13):

dlouhá vlákna (5 – 12 mm) – dodávají se v granulích polymeru

krátká vlákna (do 1 mm u mletých typů, 3 – 6 mm u hmot připravených mícháním přímo ve vytlačovacích strojích).

Dlouhá vlákna zajišťují sice dobré zakotvení v polymeru, ale jsou náchylná k lámání. S krátkými vlákny se docílí větší homogenity i z hlediska distribuce, ale kompozit má menší pevnost. Je-li vlákno příliš krátké, vytahuje se z polymeru při nízkém napětí. Uvádí se, že není účelné použití skleněných vláken kratších než 0,1 mm. Pro polyamidy 6 se udává optimální délka vlákna 0,3 – 1,0 mm, spodní mez pak činí 0,15 až 0,25 mm.

Pokud jde o vliv *orientace vláknitého plniva*, bylo zjištěno, že pro délku rovnou $10 l_c$ a tloušťku zkušebního tělíska do 1,3 mm odpovídají rozměry jednoosému vyztužení, při tloušťkách mezi 1,3 až 6,4 mm se dosahuje plenárního (dvouosého) vyztužení a nad 6,4

mm vyztužení tříosého. Přitom lze dosáhnout u jednoosého vyztužení až 95 % teoretického zpevnění, při dvouosém asi 47 % a při tříosém cca 31 %.

U nás se vyrábějí *sekaná vlákna* v délce 3 až 13 mm a 0,21 až 1,0 mm pro rohožové výztuže (*Vertex*, Litomyšl) a *sekaný roving* 354 o délce vláken 3,6 až 12 mm a průměru 13 µm, připravovaný ze skla E apretovaného činidlem *A – 1100*, *stříhaný roving* 454 o délce 6 až 12 mm, apretovaný *A – 187*. Oba výrobky pocházejí ze *Skloplastu* Trnava. Při výrobě skelných laminátů z nenasyčených polyesterových pryskyřic i epoxidových pryskyřic (EP) jsou jako výztuž používány kromě rohoží a vláken různé skleněné textilny.

Při použití plniv je nutné mít na zřeteli, že některé části zařízení jsou citlivé na mechanické a chemické opotřebení (hubice, šterbina, vstřikovací kanálky, tavná zóna atd.) a že všechny výrobky vyžadují kvalitní vzhled, takže plniva nesmí obsahovat vlhkost, nesmí se rozkládat a musí mít určitou vyhovující tvrdost

Vmíchávání velkého množství plniva do polymeru se provádí na speciálních zařízeních typu hnětače Bandury nebo v dvoušnekových či jednošnekových vytlačovacích strojích se speciálním míchacím šnekem (firma *Pfizer*)

1.13 Apretační vazebné prostředky pro výztuž s polymerem

Vlastnosti plněných polymerů lze zlepšit použitím plniv s upravenými povrchy. Zvláště se to projeví při použití polymerů ve vlhkém prostředí a při vyšších teplotách. Používají se speciální činidla, tzv. apretační vazebné prostředky, které zesilují adhezní síly mezi plnivem a polymerem. Prostředkem lze buď plnivo předem impregnovat, nebo jej lze přidávat přímo do polymeru. Přidávání tohoto prostředku přímo do polymeru má nevýhodu ve větší spotřebě činidla a v delším trvání adsorpčních procesů.

K zvětšení snášenlivosti např. hydrofilního plniva s hydrofobním polymerem se používají látky s jedním koncem molekuly hydrofilním a druhým hydrofobním (*povrchově aktivní látky*, jako jsou např. kyselina stearová a její soli). Vlastnosti plněného materiálu se tak podstatně zlepší. Avšak vazba polymeru s takovým pomocným prostředkem není na povrchu plniva trvalá, nýbrž podléhá při dlouhodobém skladování a při aplikacích plněných materiálů vlivům vlhkosti a tím se zhoršují fyzikální vlastnosti materiálů.

Jsou však již známy látky, které jsou schopny vytvořit na rozhraní polymeru a plniva trvalejší vazbu. Nazývají se spojovací nebo apretační vazebné prostředky.

Jako apretační vazebné prostředky se používají zvláště *silany* a *titanáty*, které mají především přednost ve zvětšené dispergovatelnosti a velké chemické odolnosti. Používají se také *koordinační komplexy chromu a látky na bázi fosforu* (13).

1.13.1 Silany

Silanové apretační vazebné prostředky nabývají velkého rozšíření pro svou výjimečnou schopnost spojovat organické polymery s anorganickými materiály, jako jsou sklo, minerální plniva, kovy a oxidy kovů. Silanové prostředky mají dvě odlišné chemické reakční schopnosti založené na kombinaci hydrolyzovatelných skupin s organickými funkčními skupinami v jedné molekule. To jim dovoluje vytvořit mezi vyztužovadlem nebo plnivem a polymerem vazby.

Z organických skupin se uplatňují především tyto radikály: vinyl-, alkyl-, amini-, methakryloxy-, alkylmerkapt- a epoxy-. Jsou použitelné jak pro vazby plnivo-reaktoplast, tak spojení plniv s plasty.

Mechanismus adheze silanových prostředků se vysvětluje vznikem silantriolu odštěpením alkoxylových skupin účinkem vody a vytvořením kovalentních siloxanových vazeb -Si-O-Si- při reakci se skupinami -OH vyztužujícího materiálu.

Je prokázáno, že mezivazebné kationy Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , migrují a koncentrují se na povrchu. Přesun je doprovázen snížením povrchové energie. Alkalické kovy tak na povrchu blokují silanolové skupiny, což zmenšuje chemisorpční schopnosti alkalického skla A ve srovnání s bezalkalickým vápenato-hlinito-boritým sklem E. Na cca 10 % povrchu A-skla vystupují ještě atomy křemíku, takže pomocí skupin může docházet také k adsorpci elektronových donorů. U E-skla jsou na povrchu vedle silanolových skupin ještě skupiny Al-OH , B-OH , Mg-OH , Ca-OH , které rovněž představují adsorpční centra.

Vzájemnou kondenzací silanolů na povrchu skla se současně vytváří nepravidelný vícevrstvý polymerní povlak. Velká část silanolu je však vázána slabšími silami prostřednictvím vodíkových můstků mezi silanolem a povrchovými skupinami -OH nebo adsorbovanou vodou. Tato část silanolového prostředí má pro spojení plniva s polymerem menší význam. Určité množství silonového prostředku odpovídající monomolekulárnímu povlaku však na vláknech zůstává trvale navázáno. Vzniku siloxanové vazby napomáhá sušení apretovaných plniv při vyšších teplotách.

1.13.2 Organotitanátové apretační vazebné prostředky

Titanátové apretační vazebné prostředky vytvářejí molekulové můstky tvořící mezifázi na rozhraní mezi anorganickým plnivem a polymerní matricí. Jejich velkou předností je to, že tvoří na povrchu plniva monomolekulární vrstvu. Nepřítomnost polymolekulárních vrstev na fázovém rozhraní spolu s chemickou strukturou titanátů modifikuje povrchovou energii, což vede k většímu snížení viskozity než u dosud známých vazebných prostředků.

Účinnost těchto apretačních vazebných prostředků spočívá především v třífunkčnosti jejich spojitě polymerní fáze a ve schopnosti vytvářet příčné vazby (síťovat) mechanismem reesterifikace.

1.13.3 Ostatní apretační vazebné prostředky

Jako apretační vazebné prostředky pro systém plnivo-polymer se používají i koordinační komplexy chromu s látkami obsahujícími skupiny $-NH_2$, $-NH-$, skupinu epoxidovou, amidovou nebo isokyanátovou. Doporučují se i kationaktivní látky.

1.14 Způsoby apretace povrchu plniva

Apretační vazebné prostředky se používají v množství 0,5 – 3 hmot. % (vztaženo na plnivo). Nanášejí se z vodných roztoků nebo jako nepolární roztoky (v benzenu, hexanu). V praxi se používá roztok o koncentraci prostředku 0,1 až 0,3 g / l.



Obr. č. 18 : Apretace skleněných vláken

Molekuly některých apretačních vazebných prostředků se na povrchu skla orientují. Je tomu tak např. u γ -aminopropylsilanu. Jeho aminoskupina se orientuje ke skupinám $-OH$ na povrchu skla a dochází tak ke zvětšení pevnosti sorpčních vazeb, povrch obsazený

čínidlem je větší. Kromě toho primární aminoskupiny katalyzují tvorbu siloxanových vazeb.

Ustalování adsorpční rovnováhy apretačních vazebných prostředků z vodných roztoků je velmi rychlé (např. pro E-sklo se udává doba cca 30 sekund).Proto se doba máčení plniva volí okolo 1 minuty, pak se odsaje nadbytečný roztok, aby se zbytečně netvořila centra s nadměrnou koncentrací činidla, a takto upravená výztuž se usuší. Ke zpevnění polymeru není nutné vytvořit mnoho chemických vazeb mezi polymerem a plnivem, neboť jejich nadměrný počet vyvolává napětí v mezifázové vrstvě.

Začíná se také rozvíjet aplikace kombinací silanových a titanátových apretačních vazebných prostředků.

Klíčovým problémem je zařízení a technologie míchání. Jsou doporučovány míchačky typu Bandury a dvoušnekové a jednošnekové vytlačovací stroje se speciálním míchacím šnekem. Některé typy plniva (např. slída) vyžadují speciální technologie zabráňující porušení částic plniva.

2 DISKUSE

Kompozitní materiály nás obklopují ze všech stran. Patří k nim všechny přírodní materiály a také všechny stavební hmoty včetně betonu a železobetonu. V poslední době je prudký rozvoj nových kompozitních materiálů založených na plastech a kaučucích, které tvoří matrice a na extrémně pevných a odolných vyztužujících vláknech, která mohou být nejen ze skla, ale i z uhlíku, boru, oceli nebo keramických materiálů (3).

Oblast plnění plastů se stává v posledních letech předmětem velkého výzkumného úsilí a lze konstatovat, že se v mnohém směru dosáhlo významných úspěchů. Zavedení plniv do polymeru ovlivnilo především pevnostní vlastnosti plněného materiálu - kompozitu, ale také řadu dalších významných vlastností, jako je tvarová stálost při zvýšených teplotách, tepelná roztažnost, tepelná konduktivita a konduktance, propustnost par a plynů atd (2).

Výhodně lze využívat velkou možnost variability vlastností kompozitů změnou technologie výroby, druhu a prostorového uspořádání výztuže, poměru obsahu výztuže a pojiva apod. Díly vyztužené skleněnými vlákny jsou pružné, ale křehké.

Skleněná vlákna však mají lepší elektroizolační vlastnosti a jsou odolnější vůči ohni. Uhlíková vlákna zase vykazují nejen vynikající vlastnosti, ale také velmi pěkný vzhled.

Vyšší modul než skleněná vlákna mají vlákna aramidová. Jsou vysoce odolná ohni, mají při lepších pevnostních vlastnostech menší hmotnost s dobrou rázovou houževnatostí konečného produktu.

Borová vlákna se během procesu zpracování nepoškozuji tak snadno jako vlákna skleněná. Svojí hustotou a křehkostí jsou s nimi srovnatelná, ale borová vlákna jsou extrémně tuhá a pevná.

Skleněná vlákna jsou vlákna anorganická s širokou škálou použití. Ceněná jsou hlavně pro svoje výborné technické vlastnosti jako jsou vysoká pevnost, vysoká hodnota Youngova modulu v tahu, odolnost vůči vysokým teplotám, nehořlavost, dobrá chemická odolnost a dobré elektrické vlastnosti. Vynikajících tepelně a zvukově izolačních vlastností využívá v široké míře stavební průmysl.

Vlastnosti skleněných vláken jsou výhodné zvláště ve výrobě kompozitních materiálů jako vyztužující kontinuální vlákna nebo ve formě stříže. Skleněná vlákna jsou používána ke konstrukci vláknových kompozitů o vysoké kvalitě s vysokými nároky na mechanické a tepelné vlastnosti. Konečné výrobky se využívají především v automobilovém průmyslu,

ve stavebnictví, leteckém průmyslu, (kde hodně záleží na pevnosti, spolehlivosti, ale i na nízké hmotnosti materiálu), chemickém průmyslu, elektrotechnice a v jiných odvětvích. Vezme-li se v úvahu poměr pevnosti materiálu k jeho hustotě překonávají kompozity s polymerní matricí i ty nejpevnější kovy a slitiny.

V elektrotechnickém průmyslu se aplikují zejména ve výrobě laptopů, počítačů a mobilních telefonů. V současné době se věnuje větší pozornost výrobě a použití skleněných vláken ve formě nekonečného vlákna (3).

Moderní kompozitní konstrukční materiály se bez skleněných výztuží neobejdou. V roce 2001 byla celosvětová výroba skleněných vláken na úrovni 2,5 milionu tun (6). V roce 2000 byla v Evropě spotřeba sklolaminátů rozdělena následovně: 37 % dopravní aplikace, 25 % elektrické a elektronické výrobky, 31 % stavební prvky, 5 % výrobky pro sport a volný čas a 2 % ostatní aplikace. Technologie zpracování moderních kompozitních prvků zahrnuje kromě klasického ručního kladení a prosycování textilních vrstev využití autoklávové techniky, navíjení vláken, tažení profilů (pultruze), injekční vstřikování, tlakové prosycování pryskyřicemi (resin transfer molding) a další způsoby.

Budoucnost vyžaduje stále kvalitnější materiály. Lze předpokládat především rozvoj kompozitních materiálů s hybridní výztuží - tedy kombinací skleněných, uhlíkových, aramidových, případně dalších typů vláken. Pro dosažení speciálních efektů budou uplatňovány nanotechnologie, jak v povrchových úpravách vláken, tak i ve funkčních úpravách výrobků. Vysokých pevností kompozitních materiálů určitě využije i výroba energie. Nedávno se spojily firmy GERMAN WIND a DENMARK's LM GLASFIBER a vyvinuly lopatky pro větrnou elektrárnu s výkonem 5 MW. Při průměru rotoru 125 m se jedná o největší lopatky, které jsou sériově vyráběny od roku 2004.



Obr. č.19 : Lopatky větrné elektrárny vyrobené z kompozitních materiálů firmou
GERMAN WIND a DENMARK's LM GLASFIBER

3 ZÁVĚR

První část bakalářské práce obecně charakterizuje různé druhy vláknových kompozitů z hlediska technologických vlastností.

Druhá část se zabývá různými typy a formami vláken používaných jako výztuže např. roving, vyztužující rohože, tkaniny a povrchové rohože.

Třetí část se zabývá jednotlivými druhy vláken. Kromě nejběžnějších skleněných vláken jsou uvedena všechna další nejčastěji používaná vlákna : uhlíková, keramická, whiskery a další. Největší pozornost je věnována v současné době nejvýznamnějším vláknům.

Diskuse je zaměřena na porovnání vlastností jednotlivých vláken především ve srovnání s vlákny skleněnými.

4 LITERATURA

- (1) MAŇAS, M.–VLČEK, J. : Aplikovaná reologie. [Interní skripta] FT, UTB Zlín, 2001,
- (2) ŠUBA, O. : Dimenzování a navrhování výrobků z plastů. [Interní skripta] FT, UTB Zlín,
- (3) RAAB, M. : Materiály a člověk. Encyklopedický dům, 1999,
- (4) MEISSNER, B. - ZILVAR, V. : Fyzika polymerů – struktura a vlastnosti polymerních materiálů. SNTL Praha 1987
- (5) MILITKÝ, J. - VANÍČEK, J. : Vlastnosti vláken. [Interní skripta] TF, TU Liberec
- (6) KROSHWITZ, J.I. : Polymers : An encyclopedic sourcebook of engineering propertis. J. Willey Sons, New York 1989
- (7) BAREŠ, R.A. : Kompozitní materiály . SNTL Praha, 1988,
- (8) BLAHA, A. – EDER, M. : Vlastnosti a použití tažených kompozitních profilů. In: Mezinárodní konference PLASTKO 99, Sborník přednášek, str. 123, 16.- 18. červen 1999, Zlín, Napajedla 1999.
- (9) DOZAUER, J. : Plastikářský manuál. [Firemní materiály] BOCO, s. s r.o., Pardubice, 2000
- (10) MOORE, W.J. : Fyzikální chemie. [Český překlad] SNTL, Praha 1981
- (11) ŠIMONÍKOVÁ, J. – ŠIMONÍK, J. : Plastikářský bulletin. [březen-duben 1975] VÚGPT Gottwaldov
- (12) TOBOLSKÝ, A. V. : Vlastnosti a struktura polymerů. [Překlad z angličtiny] SNTL, Praha 1963
- (13) ŠIMONÍK, J. – LAPČÍK, J. : Plastikářský bulletin. [březen-duben 1975] VÚGPT Gottwaldov
- (14) ALTENBURG, K. – HOLZMULLER, W. : Fyzika polymerů. [Překlad z němčiny] SNTL, Praha 1966

5 SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

PE.....polyetylen
PPpolypropylen
PCpolykarbonát
SANstyren-akrilonitrilový kopolymer
PA6,6nylon
PBTpolybutylentereftalát
PSUpolysulfon
PPSpolyfenylsulfid
PVDFpolyvinylidenfluorid
PESpolyethersulfon
TFEtavitelné kopolymery tetrafluoretylenu
PVCpolyvinylchlorid
PAN.....polyakrylonitril
ABSakrylonitril-butadien-styrenový kopolymer
PTFEpolytetrafluoretylen
PVALpolyvinylalkohol

SiO₂oxid křemíku
Al₂O₃oxid hlinitý
CaOoxid vápenatý
MgOoxid hořečnatý
SiCl₄chlorid křemičitý
B₂O₃.....oxid boritý
NH₃.....čpavek
SiC.....karbid křemíku
HClkyselina chlorovodíková
CH₄.....metan
COoxid uhelnatý

6 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. č. 1 : Schéma polymerů.....	11
Obr. č. 2 : Keramická vlákna.....	12
Obr. č. 3 : Chemické ukládání par.....	12
Obr. č. 4 : Keramická vlákna.....	13
Obr. č. 5 : Azbestová vlákna.....	13
Obr. č. 6 : Příprava SiC whiskerů.....	15
Obr. č. 7 : Skleněná vlákna.....	20
Obr. č. 8 : Termoplastická matrice.....	24
Obr. č. 9 : Termosetická matrice.....	25
Obr. č.10 : Profil vyztužený nekonečnými skleněnými vlákny.....	27
Obr. č.11 : Výrobní linka pro pultruzní tažení.....	33
Obr. č.12 : Pultruzně tažené profily skleněných vláken.....	35
Obr. č.13 : Tažení kontinuálního skleněného vlákna.....	36
Obr. č.14 : Porovnání azbestových a skleněných vláken Cem-FIL.....	36
Obr. č.15 : Vlevo vlákno typu E po několika týdnech v betonu , vpravo vlákno Cem-FIL po několika letech expozice v betonu.....	37
Obr. č.16 : Pramen vláken <i>Cem-FIL ANTI-CRAK HP</i> v betonu.....	38
Obr. č. 17 : Svazky skleněných vláken.....	40
Obr. č. 18 : Apretace skleněných vláken.....	45
Obr. č.19 : Lopatky větrné elektrárny vyrobené z kompozitních materiálů firmou <i>GERMAN WIND a DENMARK's LM GLASFIBER</i>	48

7 SEZNAM TABULEK

Tab. č. 1 : Modul pružnosti a pevnost v tahu některých vyráběných vyztužujících vláken.....	20
Tab. č. 2: Porovnání vlastností čistého polypropylénu(PP) a PP plněného skelnými vlákny při pultruzní výrobě.....	35