ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Perspektivní kompozity pro elektrotechniku

Bc.Tetjana Tomášková **2012**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: **2011/2012**

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení:	**Bc. Tetjana TOMÁŠKOVÁ**
Osobní číslo:	**E09N0060K**
Studijní program:	**N2644 Aplikovaná elektrotechnika**
Studijní obor:	**Aplikovaná elektrotechnika**
Název tématu:	**Perspektivní kompozity pro elektrotechniku**
Zadávající katedra:	**Katedra elektroenergetiky a ekologie**

Zásady pro vypracování:

1. Zpracujte přehled druhů kompozitních materiálů a jejich charakteristiku.
2. Uveďte oblasti využití kompozitů v elektrotechnice.
3. Uveďte nové trendy v oblasti kompozitních materiálů.
4. Zhodnoťte možnosti využití nových kompozitních materiálů v elektrotechnice.

Rozsah grafických prací:	**podle doporučení vedoucího**
Rozsah pracovní zprávy:	**30 - 40 stran**
Forma zpracování diplomové práce:	**tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

1. **Bareš, R. A. : Kompozitní materiály, SNTL, Praha, 1988**
2. **Šavel, J. : Materiály, technologie a výroba v elektronice a elektrotechnice, Praha, BEN, 2005**
3. **Sodomka, L., Fiala, J. : Fyzika a chemie kondenzovaných látek s aplikacemi**
4. **Internetové zdroje**

Vedoucí diplomové práce:	**Doc. Ing. Eva Kučerová, CSc.** Katedra technologií a měření
Datum zadání diplomové práce:	**17. října 2011**
Termín odevzdání diplomové práce:	**11. května 2012**

Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
děkan

L.S.

Doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 17. října 2011

Anotace

Předkládaná diplomová práce obsahuje přehled druhů kompozitních materiálů, jejich charakteristiku, technologie výroby a oblasti využití. Kompozitní materiály jsou rozděleny podle druhu výztuže, a to jak z hlediska rozdílných materiálů (například skleněná, uhlíková, polymerní vlákna atd.), tak z hlediska jejich charakteristik (například částicové, vlaknové). Dále je pojednáno o druzích matric používaných při výrobě kompozitů. V závěru práce jsou uvedeny některé nové druhy kompozitů (například nanokompozity, smartkompozity, kompozitní keramika) a možnosti jejich využití v elektrotechnice.

Klíčová slova

Výztuž, matrice, kompozitní materiály, nanokompozitní materiály, kompozitní keramika, kompozity s piezoelektrickými vlastnostmi.

Abstract

The master theses present contains an overviev of types of compozite materials and its characteristics, production technology and the use of compozite types of tests which must go throudh prior to use.

We present here the distribution of fiber reinforced compozites with continuous fibers are glass fibers, carbon fibers, polymer fibers, basalt fibers, protein fibers, boron fibers, ceramic fibers. Also describe matrix compozite (polymer matrix, metal matrix, ceramic matrix, carbon matrix).

The follwing are the use of new trends and possibilities of using new composite materials in electrical.

Key words

Composite materials, nanokomposite materials, composite ceramics, composites with piezoelectric properties, matrix, fibers.

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracovalá samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této diplomové práce, jsou legální.

V Plzni dne 6.5.2012 Tetjana Tomášková

Poděkování

Tímto bych chtěla poděkovat především vedoucí mé práce paní Doc. Ing Evě Kučerové, CSc. za odborné vedení a korekturu, za předání cenných informací a za její trpělivost, ochotu a vstřícnost, s kterou mi byla vždy nápomocna při psaní této práce.

Ráda bych poděkovala také své rodině za podporu po celou dobu mého studia.

Obsah

OBSAH……8

SEZNAM SYMBOLŮ……9

ÚVOD……11

1 PŘEHLED DRUHŮ KOMPOZITNÍCH MATERIÁLU A JEJICH CHARAKTERISTIK…..12
1.1 DEFINICE A ROZDĚLENÍ KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ……12
1.2 CHARAKTERISTIKA VÝZTUŽE V KOMPOZITNÍCH MATERIÁLECH……17
1.2.1 Skleněná vlákna……21
1.2.2 Uhlíková vlákna……23
1.2.3 Polymerní vlákna……25
1.2.4 Čedičová vlákna……27
1.2.5 Přírodní vlákna……27
1.2.6 Borová vlákna……28
1.2.7 Keramická vlákna……29
1. 3 CHARAKTERISTIKA MATRICE V KOMPOZITNÍCH MATERIÁLECH……..30
1.3.1 Polymerní matrice……30
1.3.2 Kovové matrice……40
1.3.3 Keramické matrice……41
1.3.4 Uhlíkové matrice 42

2 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY V ELEKTROTECHNICE 43

2. 1 *ROZDĚLENÍ KOMPOZITNÍCH MATERIÁLU PRO ELEKTROTECHNIKU* 43
2. 2 *KOMPOZITNÍ MATERIÁLY V ELEKTROIZOLAČNÍCH SYSTÉMECH* 45
2.2.1 Teplotní klasifikace elektroizolačních materiálů……45
2.2.2 Kompozitní materiály v izolačních systémech točivých elektrických strojů……46
2.2.3 Kompozitní materiály v izolačních systémech transformátorů……47
2. 3 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY POUŽÍVANÉ PRO VÝROBU PLOŠNÝCH SPOJŮ……...47
2. 4 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY POUŽÍVANÉ PRO VÝROBU IZOLÁTORŮ……...50

3 VYVOJOVÉ TRENDY V OBLASTI KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ 50

3. 1 NANOKOMPOZITNÍ MATERIÁLY……..50
3.1.1 Historie nanomateriálu……51
3.1.2 Výrobní technologie nanomateriálu……51
3.1.3 Tvary nanomateriálu……52
3. 2 SMART MATERIÁLY……57
3.2.1 Charakteristika smart materiálu……58.
3.2.2 Piezoelektrické materiály……59
3. 3 KERAMICKÉ MATERIÁLY……..60
3.3.1 Rozdělení keramických materiálů……61

4 VYUŽITÍ NOVÝCH KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ V ELEKTROTECHNICE……63

4. 1 VYUŽITÍ NANOKOMPOZITNÍCH MATERIÁLU V ELEKTROTECHNICE……..……..63
4. 2 VYUŽITÍ KOMPOZITU S PIEZOELEKTRICKÝMY VLASTNOSTMI V ELEKTROTECHNICE……64
4. 3 VYUŽITÍ KOMPOZITNÍ KERAMIKY V ELEKTROTECHNICE…..……...66

ZÁVĚR 69

POUŽITÁ LITERATURA.....70

PŘÍLOHY……78

Seznam symbolů a zkrátek

E [Pa]	Modul pružnosti v tahu
σ [Pa]	Napětí v tahu
ρ [kg/m³], [kg.m^{-3}]	Hustota
ε	Poměrné přetvoření
ε_r	Relativní permitivita
tg δ	Ztrátový činitel
ρv [Ω cm]	Vnitřní rezistivita
Ep [kV/mm]	Elektrická pevnost
T_g	Skelný přechod
T_m	Teplota tání
T_f	Teplota viskózního toku
PMC	Polymerní matrice (Polymer matrix composite)
MMC	Kovové matrice (Metal matrix composite)
CMC	Keramické matrice (Ceramic matrix composite)
CMC	Uhlíkové matrice (Carbon matrix compozite)
MMT	Mineral montmorillonit
HMTA	Hexamethylentetraminu
BDMA	Benzyldimethylamin
BPA	Bisfenol A
TGETPM	Třífunkční epoxidy triglycidylethertrifenylmethan
TGAF	Triglycidylaminofenol
TGMDA	Tetrafunkční epoxidy tetraglycidylmethylendianilin
EIS	Elektroizolační systém
EIM	Elektroizolačních materiálů
RTE	Relativní index teplotní odolnosti
FBG vlákna	Fibre Bragg Gratting
QI	Kvaziizotropní laminát
UD	Unidirectional
SWNT	Single-walled Nanotube
MWNT	Multi-walled Nanotube
DPS	Desky plošných spojů

SMA	Shape memory alloy
SMH	Hybridy s tvarovou pamětí
EAP	Electroactive Polymers
SMP	Shape memory.polymers
PZT	Piezoelektrická keramika
nm	Nanometr
µm	Mikrometr
mm	Milimetr
CE	Kyanoestery
PAN	Polyakrylonitril
PTFE	Polytetrafluoretylen
UP	Nenasycené polyestery
VE	Vinylestery
EP	Epoxidy
PP	Polypropylen
PA	Polyamidy
PES	Polyethersulfon
PI	Polyimidy
PU	Polyurethanové pryskyřice
LCP	Polymery s tekutými krystaly
PPSU	Polyfenylsulfon
PPS	Polyfenylensulfid
PSU	Polysulfon
PEI	Polyetherimid
PEK, PEEK, PEKEKK, PEKK	Polyaryletherketony
BMI	Bismaleimidy
PEAR	Polyetheramidy
PET	Polyetyléntereftalát
PEN	Polyetylénnaftalát
UF	Močovinoformaldehydové pryskyřice
MF	Melaminoformaldehydové pryskyřice
PF	Fenolické pryskyřice-fenolformaldehydové

Úvod

Kompozitní materiály jsou vícesložkové (vícefázové) materiály a důležitou roli nehrají pouze složky či fáze, ale také rozhraní mezi nimi. Tyto složky liší se od sebe svými fyzikálními, chemickými, mechanickými vlastnostmi.

Příprava, výroba a aplikace kompozitů se rychle rozvíjí, protože tyto materiály mohou mít vlastnosti, které nemají jednotlivé materiály, ze kterých jsou složené. Například, výhodné je již známý polymer se známými vlastnostmi upravit malým množstvím plniva (částice, vlákna) a získat materiál s vlastnostmi, které se od vlastností čistého polymeru mohou výrazně lišit. Polymery mají poměrně dost výhod oproti kovům, keramice nebo jiným materiálům. Také jejich výroba nebo zpracování je levnější než u kovů a to zejména díky nízkým teplotám, které jsou u většiny polymerů asi pětkrát nižší, než u ocelí. Dalšími výhodami je možnost velmi efektivní sériové výroby dílů nebo hustota polymerů. Zbytky, přetoky se velice jednoduše opět zpracují, což zvyšuje celkovou efektivitu výroby. Ale polymery mají i nevýhody, například mají nízkou pevnost oproti kovům (omezení při výrobě namáhaných dílů), teplotu tání, která zase omezuje použití tam, kde jsou vysoké teploty (kovové a keramické výrobky jsou odolné vůči vysokým teplotám) Další nevýhodou je malá odolnost vůči klimatickým podmínkám. Kompozitní materiály umožní kombinovat vlastnosti zúčastněných složek.

Podle tvaru druhu vyztuží kompozity dělíme na: částicové, krátkovláknové, dlouhovláknové a hybridní kompozity. Vláknové kompozitní materiály s kontinuálními vlákny jsou známé mezi kompozity největší pevností a tuhostí. Vlákna mohou být: skleněná, uhlíková, polymerní, čedičová, proteinová, borová, keramická. Podle rozměrů výztuže kompozity dělíme na: nanokompozitní, mikrokompozitní, makrokompozitní materiály. Matrice (polymerní, kovová, keramická, uhlíková) v kompozitu zajišťuje spojení jednotlivých složek v kompaktní celek a vytvoří tak koneční tvar výrobku.

Velkou pozornost v této práci věnují nanokompozitním materiálům. Struktury a vlastností nanočástic, nanovláken, nanotrubic v materiálech jsou převratnou, moderní technologií, která se využívá v mnoha oborech. V současnosti můžeme získat nanovlákna z několika desítek polymerů včetně biokompatibilních nebo biodegradabilních polymerů.

V posledních desetiletích roste zájem o smart (nazývané také inteligentní nebo chytré) materiály díky své jedinečné schopnosti výrazně a zejména vratně měnit jednu nebo více vlastností, například vodivost, viskozitu, tvar, barvu, za působení vnějších podmínek a kombinaci s jinými materiály.

Keramika diky svým vlastnostem (jako dobrá odolnost proti tepelným rázům, velká odolnost proti poškrábání, nízká tepelná vodivost, nulový koeficient tepelné roztažnosti, velmi dobrá chemická netečnost) se používá při výrobě kompozitu. A její hlavní nevýhoda – křehkost se změní zpevněním izometrickými částicemi, destičkami, whiskry nebo vlákny.

1 Přehled druhů kompozitních materiálů a jejich charakteristika

Kompozitní materiály jsou materiálové struktury složené ze dvou nebo více materiálů, které mají odlišné vlastnosti se synergickým účinkem (synergie znamená spolupráci, společné působení; výsledné vlastnosti složeného materiálu jsou větší než součet složek). Existují tři následující podmínky:

1) podíl výztuže má být větší než 5 %
2) chemické, fyzikální a mechanické vlastnosti výztuže a matrice se liší
3) kompozit má být připraven spojením složek

Tyto podmínky musí být splněny, aby vícefázový materiál byl zařazen mezi kompozitní materiály. Kompozitní materiály oproti kovům a jejich slitinám mají menší hustotu, příznivý poměr pevnosti v tahu a modulu pružnosti k hustotě (dosahují velké měrné pevnosti $\boldsymbol{\sigma_{pt} / \rho}$ a měrného modulu pružnosti $\mathbf{E / \rho}$), kde

E - modul pružnosti v tahu [Pa]
σ - napětí v tahu [Pa]
ρ – hustota [kg/m³], [kg.m^{-3}].
$\mathbf{E = \sigma / \varepsilon}$, kde
ε - poměrné přetvoření.

1.1 Definice a rozdělení kompozitních materiálů

Kompozit je materiál složený ze dvou nebo více fyzikálně a chemicky odlišných fází. Tužší, tvrdší a pevnější nespojitá fáze se nazývá **výztuž**, spojitá a poddanější složka, která plní funkci pojiva výztuže, se nazývá **matrice**. Obecně je známo, že nespojitá fáze slouží k vytvoření nového materiálu, který má vysokou úroveň mechanických vlastností, ale může mít i jiné velice důležité vlastnosti, např. elektrickou vodivost. Výztuž před vlivy vnějšího prostředí chrání matrice. Matrice v kompozitu zajišťuje také spojení výztuže a matrice v kompaktní celek, a vytvoří tak konečný tvar výrobku.

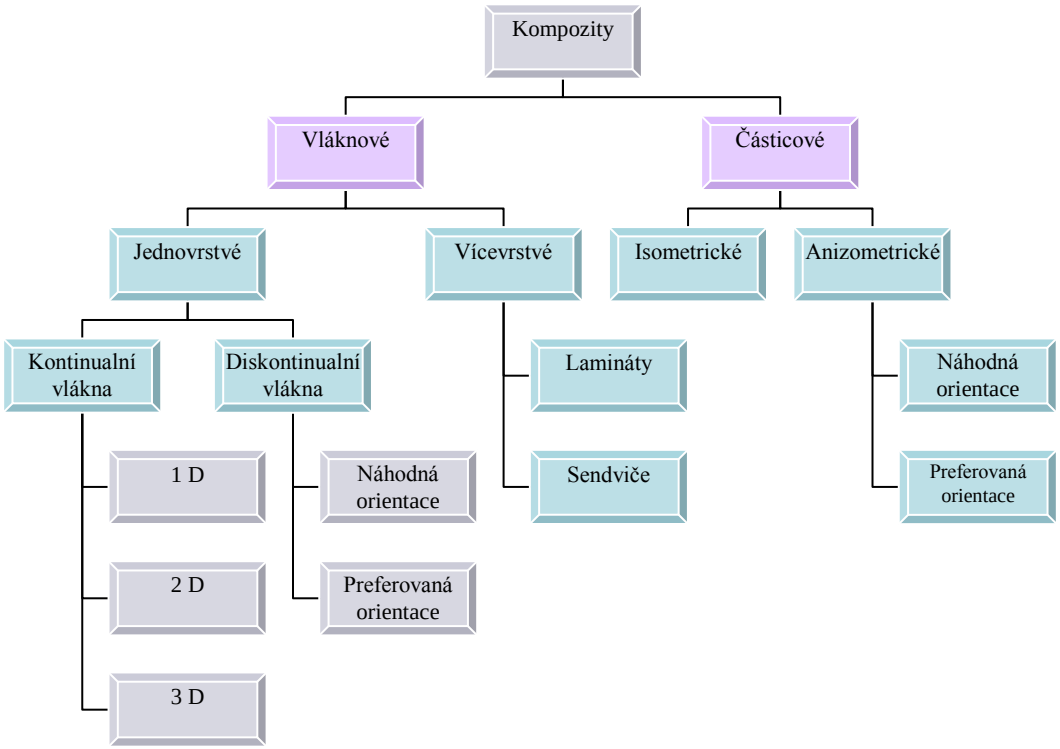
Podle druhu matrice kompozity dělíme na:
- kompozity s polymerní matricí
- kompozity s kovovou matricí
- kompozity s keramickou matricí
- kompozity s uhlíkovou matricí

Kompozity s polymerní matricí (PMC - polymer matrix composite). Matrice může být tvořena termoplasty (polypropylen, polyamid, polykarbonát)**,** reaktoplasty (nenasycený polyester, epoxid) nebo sesíťovaný elastomer. Jako výztuž se nejčastěji používají vláknové materiály, například sklo, uhlík nebo polymery na bázi aromatických polyamidů.

Kompozity s kovovou matricí (MMC - metal matrix composite). Jedná se o kovy, které se spojí s jiným materiálem. Tyto matrice mohou být lehké slitiny hliníku, hořčíku, titanu, také slitiny železa, kobaltu, mědi. Zpevňující výztuží mohou být keramické materiály, například vlákna z karbidu křemíku nebo kovové materiály, například wolframová vlákna, ocel.

Kompozity s keramickou matricí (CMC – ceramic matrix composite). Matrici nejčastěji může tvořit např. karbid a nitrid křemíku nebo oxidy zirkonia a křemíku. Jako vyztužující materiály použijeme keramická nebo uhlíková vlákna.

Kompozity s uhlíkovou matricí (CMC – carbon matrix compozite). Jako matrice slouží uhlík v různém stavu (různá struktura uspořádanosti). Zpevňující fází jsou uhlíková vlákna.



Obr. 1: Rozdělení kompozitních materiálů podle geometrie a orientace výztuže

Podle druhu výztuží kompozity dělíme na:

- částicové kompozity
- krátkovláknové kompozity a dlouhovláknové kompozity
- hybridní kompozity

Částicové kompozity. Ve většině případů to jsou anorganické izometrické nebo anizometrické částice, které mají rozměry cca 12 μm – 300 μm [18]. Jejich složení je rozmanité, například vápenec, oxid křemičitý, oxidy křemíku, hořčíku a hliníku, mikrokuličky (skleněné, plastové, keramické, hlinitokřemičité, kovové, uhlíkové [150]), slída, nebo mikročástice kovů. Částicová plniva mění mechanické vlastnosti matrice (modul pružnosti, houževnatost, tvrdost, hustotu). Kompozitní materiály mohou být s náhodnou orientací částic nebo kompozitní materiály s preferovanou orientací částic. Vyztužující částice mohou mít tvar kulovitý, destičkovitý, tyčinkovitý i nepravidelný.

Krátkovláknové kompozity. Obecně jsou mechanické vlastnosti materiálů, které se vyztuží krátkými vlákny, lepší než vlastnosti nevyztužených materiálů a mohou konkurovat oceli a slitinám hliníku (vzhledem k hustotě materiálů). Nespojitou

sekundární fázi tvoří vlákna, která jsou v matrici dispergována náhodně nebo s přednostní orientací a mají délku přibližně stonásobek jejich tloušťky. Aby došlo ke změně elektrických vlastností materiálu, mohou být přidána vodivá vlákna [96].

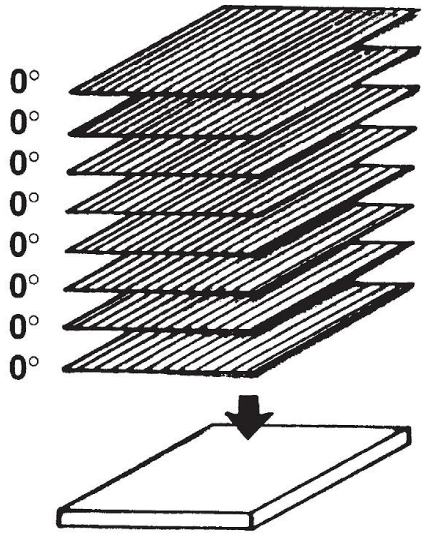
Dlouhovláknové kompozity. Výztuž tvoří diskontinuální vlákna o délce řádově desítek až stovek mm, která mohou být orientovaná náhodně nebo s preferovanou orientací, nebo kontinuální vlákna, která mohou být zabudovaná v matrici s jednosměrnou, dvousměrnou (tkaniny, rohože) nebo trojsměrnou orientací (pleteniny, tkaniny).

Hybridní kompozity vzniknou kombinací vláknových výztuží různého typu (například tkaniny složené z uhlíkových a aramidovych vláken). Kompozity s vláknovou výztuží, které současně obsahují částicová plniva, se také řadí k hybridním kompozitům [67].

Vícevrstvé vláknové kompozity

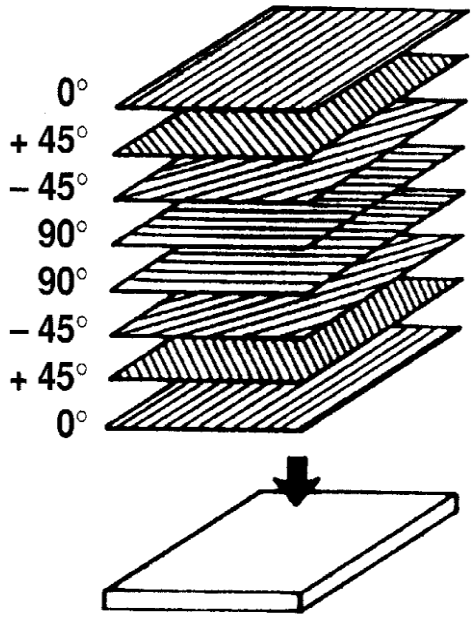
Vláknové kompozity následně můžeme rozdělit na jednovrstvé (kontinuální a diskontinuální) a vícevrstvé (lamináty a sendviče).

Při jednosměrném uspořádání máme všechna vlákna orientována ve stejném směru (zavedeno označení UD – angl. unidirectional), jak je vidět na obrázku 2, a proto má materiál výrazné anizotropní mechanické vlastnosti dosahující maximálních hodnot ve směru vláken a minimálních ve směru kolmém na vlákna.



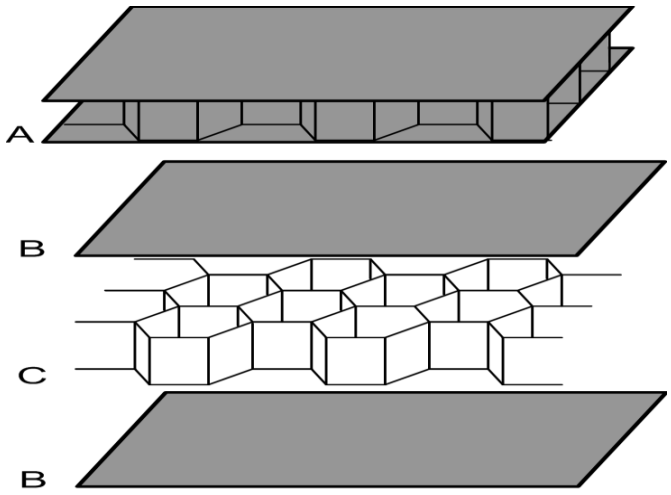
Obr. 2: Jednosměrné UD uspořádání vláken [157]

Orientaci vláken můžeme v jednotlivých vrstvách upravit tak, aby materiál měl ve všech směrech podobné mechanické vlastnosti - kvaziizotropní laminát (QI), což je vidět na obrázku 3.



Obr. 3: Kvaziizotropní laminát [157]

V některých literaturách (například [4]) jsou sendvičové materiály považovány za zvláštní druh kompozitních systémů. Sendvičové materiály (obrázek 4) jsou složené z jádra a dvou povrchových vrstev (potahů). Jádro je lehké, a proto má výsledný materiál velmi malou hmotnost.



Obr. 4: Složení sendvičového kompozitu [268]:
A) sendvičový panel
B) obě vnější vrstvy
C) voštinové jádro laminátu

Povrchové vrstvy dávají kompozitu vysokou tuhost v ohybu a s jádrem jsou spojeny lepením. Jádro je tvořeno voštinami (voština je materiál s různou výškou, velikostí a tvarem buněk, které jsou podobné šestihranné struktuře plástů včelího medu) z různých materiálů, například z tenkého hliníkového plechu, Nomexu (aramidové tkaniny prosycené epoxidovou pryskyřicí [6]), polypropylenu a papíru (prosyceného polyesterovou pryskyřicí [222]). Dalším materiálem použitým na jádro může být tuhá pěna jak polymerní, tak kovová. Syntaktická pěna má větší smykovou pevnost než jiná

sendvičová jádra, dobře absorbuje energii rázu a výbuchu.

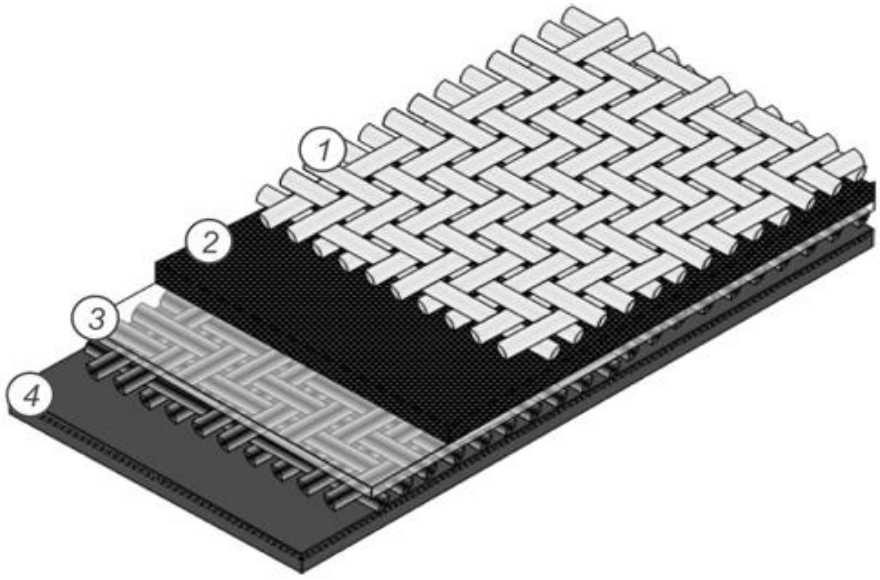
V poslední době se používá na karosériích luxusních vozidel například polotovar SPRINT od firmy Gurit Ltd. (UK) [165], což vidíme na obrázku 5. Na povrchové vrstvy se používají kompozitní materiály s polymerní matricí nebo kovové materiály, například ocel, hliník.

Dalším materiálem, který je známý pevností, nízkou hustotou, odolností proti únavě a dobrými antikorozními vlastnostmi, je aramid (aromatický polyamid) [72], který se používá ve vojenské, letecké (výroba větroňů), kosmické technice a při výrobě lodí.

Sendvičové kompozity se liší od laminátu:

- složením - lamináty jsou kompozitní materiály dvouvrstvé nebo třívrstvé slepené
- hmotností - mají polovinu váhy laminátu
- tuhostí - mají ji trojnásobně vyšší oproti laminátu
- izolačními vlastnostmi - mají je mnohem lepší oproti laminátu až dvojnásobně

Vlastnosti sendvičových materiálů můžeme ovlivnit volbou materiálových kombinací jádra a povrchových vrstev a jejich tloušťkami. Důležité při navrhování sendvičů je volba vhodného lepidla pro spojení jádra s povrchovými vrstvami.



Obr. 5: Schéma kompozitního polotovaru [18]

1 - tkanina ze skleněných nebo uhlíkových vláken
2 - syntaktická pěna
3 - tkanina ze skleněných nebo uhlíkových vláken
4 - povrchový film

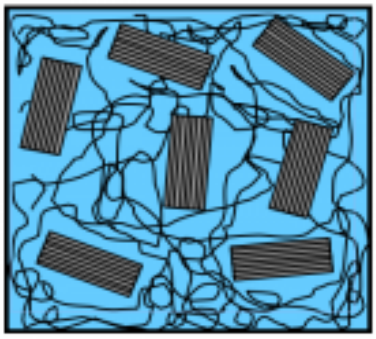
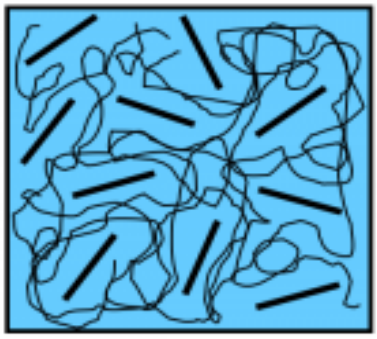
Podle rozměrů výztuže kompozity dělíme na:

- nanokompozitní materiály
- mikrokompozitní materiály
- makrokompozitní materiály

Nanokompozitní materiály jsou kompozity, které mají rozměr vyztužující fáze (délka částice nebo průměr vlákna) v jednotkách až desítkách nm.

Mikrokompozitní materiály mají rozměr výztuže (příčné rozměry částic nebo vláken) od 10^0 μm do 10^2 μm a v průmyslu zatím mají největší význam.

Rozdíl mezi mikrokompozitem a nanokompozitem s nespojitou složkou na bázi destičkových částic jílu (montmorillonitu - MMT) ukazuje následující obrázek 6.

a)   b)

Obr. 6: Rozdíl mezi a) nanokompozitem
b) mikrokompozitem [75]

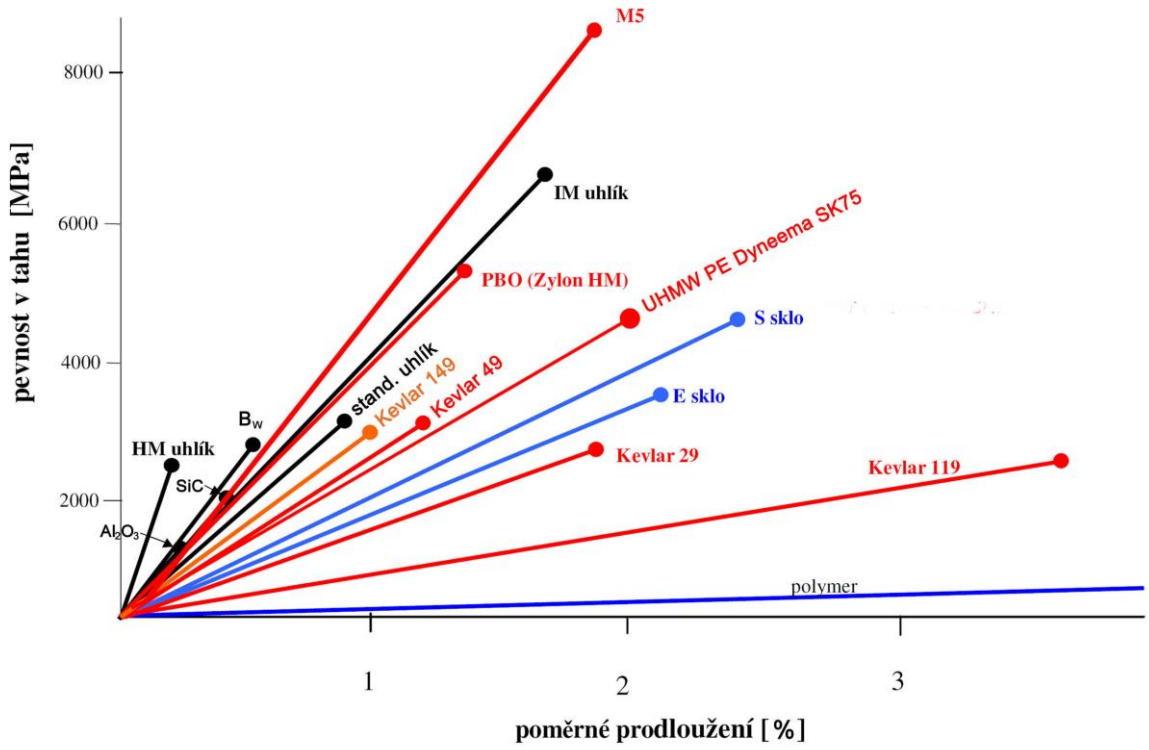
Makrokompozitní materiály jsou kompozity, které mají největší příčné rozměry výztuže 10^0 mm až 10^2 mm a jsou nejvíce používané ve stavebnictví, např. železobeton (beton zpevněný železnými nebo ocelovými lany, pruty) nebo polymerbetony (obsahují drcené kamenivo a pryskyřici). Za makrokompozity můžeme považovat i plátované kovy nebo vícevrstvé materiály (chodník a vozovka).

1.2 Charakteristika výztuží v kompozitních materiálech

Vláknové kompozitní materiály s kontinuálními vlákny jsou známé mezi kompozity největší pevností a tuhostí. Vlákna mohou být:

- skleněná
- uhlíková
- polymerní
- čedičová
- proteinová
- borová
- keramická

Materiál zpracovaný do vlákna má vždy větší pevnost. Rozdíly v pevnostech a modulech pružnosti jednotlivých typů vláken jsou patrné z obrázku 7.



Obr. 7: Tahové zkoušky jednotlivých typů vláken [100]

Vysvětlivky:

HM uhlík - uhlíkové vlákno s vysokým modulem pružnosti
BW - borové vlákno (jádro z wolframu)
Al2O3 a SiC - keramická vlákna vyrobená z polymerních prekursorů
IM uhlík - „středněmodulové“, angl. „InterMediate”, uhlíkové vlákno s vysokou pevností
PBO HM - polymerní vlákno poly-para-fenylenbenzobisoxazolu
uhlík - standardní uhlíkové vlákno
M5 - polymerní polydiimidazopyridinylendihydroxyfenylenové (PIPD)
Kevlar®29 - polymerní poly-para-fenylentereftalamidové (aramidové) vlákno od firmy Du Pont
Kevlar®49 - polymerní aramidové vlákno od firmy Du Pont
Kevlar®149 - polymerní aramidové vlákno od firmy Du Pont
Kevlar®119 - polymerní aramidové vlákno od firmy Du Pont používané pro zpevnění elastomerů
UHMW PE - polymerní vlákno z PE s velmi vysokou molární hmotností

Výhodou je, že rozměry vrozených vad materiálu jsou minimalizovány v tenkých vláknech. Důležité je také to, že tenká vlákna mají oproti vláknům větších průměrů při stejné délce významně menší povrch, což omezí nebezpečnost povrchových vad. Sdružením monovláken vzniknou prameny, které jsou zpracovány na polotovary:
- sekané prameny
- mletá vlákna
- rovingy nebo kabílky
- jednoduchá příze
- rovingové tkaniny

- rohože
- prepregy

Sekané prameny mají určitou délku a jsou určené pro přípravu vstřikovacích nebo lisovacích směsí.

Mletá vlákna jsou malá, krátká a křehká, připravují se mletím.

Rovingy (kabílky) jsou sdružené prameny pro výrobu profilů tažením, pro výrobu prepregů, mohou být s nulovým počtem zákrutů nebo se 40 zákruty na 1 metr [18]. Rovingy jsou dodávány na menších cívkách, které mají konické zakončení a používají se na výrobu tkanin. Mohou být dodávány na válcových cívkách o větší hmotnosti, např. u skleněných vláken do 15 kg [18].

Jednoduchá příze a kablovaná příze vznikne zkrucováním a následným sdružováním jednotlivých pramenů. Jsou určeny pro výrobu technických tkanin. Tkaniny z příze slouží jako izolační, filtrační tkaniny.

Rovingové tkaniny jsou určené pro výrobu profilů tažením (pultruzí, což je způsob výroby vláknových kompozitů [26]), pro laminování, dají se navíjet a zpracovávat do tkaninových prepregů.

Rohože jsou v rovinném uspořádaní kontinuální sekané prameny nebo prameny větší délky, cca 25 mm až 50 mm [18], sekaná vlákna v rohoži (např. netkané textilie nebo rouna), spojena polymerními pojivy.

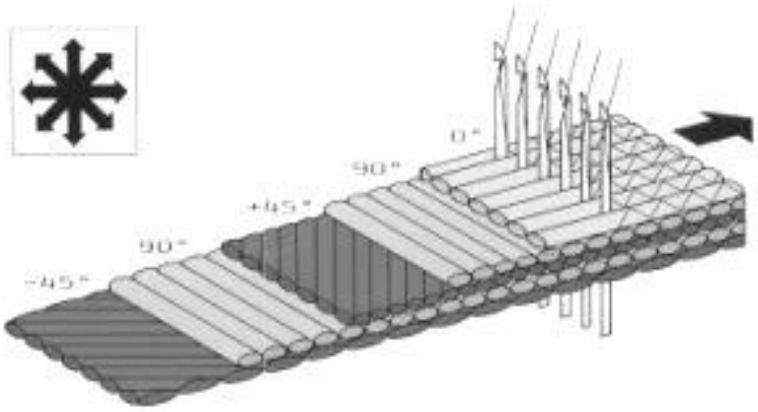
Prepregy značí zkrácený tvar, angl. preimpregnated fibres (česky - předimpregnovaná vlákna). Jsou to role, které mají různou šířku nebo jsou rozřezané na kotouče, obsahují paralelně rozmístěné rovingy, tkaniny či rohož a matrici, která může být nedosušená a má charakter reaktoplastický či termoplastický. Prepregy se používají k výrobě špičkových polymerních kompozitních materiálů. Při výrobě prepregu se tkaniny ve většině případů impregnují roztokem, například bezrozpouštědlové pryskyřice, jako polyimidové, polychinoxalinové, ftalonitrilové, benzoxazínové, bismaleinimidové, epoxidové, fenolformaldehydové a kyanoesterové, mohou ale být použity i polyesterové nebo vinylesterové pryskyřice. Pro elektrotechnické účely se nejčastěji používají epoxidy.

Dělení prepregů podle geometrie výztuže:

- jednosměrné prepregy
- vícevrstvé prepregy
- kombinované prepregy
- prepreg s prostorově vázanou výztuží

Jednosměrný prepreg, který je vyrobený z rovingů, je určen pro mechanicky namáhané díly, které se mohou vyrábět kladením, tažením nebo navíjením pásů. Jednosměrný prepreg je dodáván v kotoučích různé šířky a má tloušťku 0,1 mm až 0,15 mm [18].

Vícevrstvé prepregy [18] se vyrábějí pro získání potřebné tloušťky laminátu. U vícevrstvých prepregů jsou jednosměrně vyztužené vrstvy pootočeny například pod úhly 0°, ± 45° a 90° (vůči sobě), což vidíme na obrázku 8.



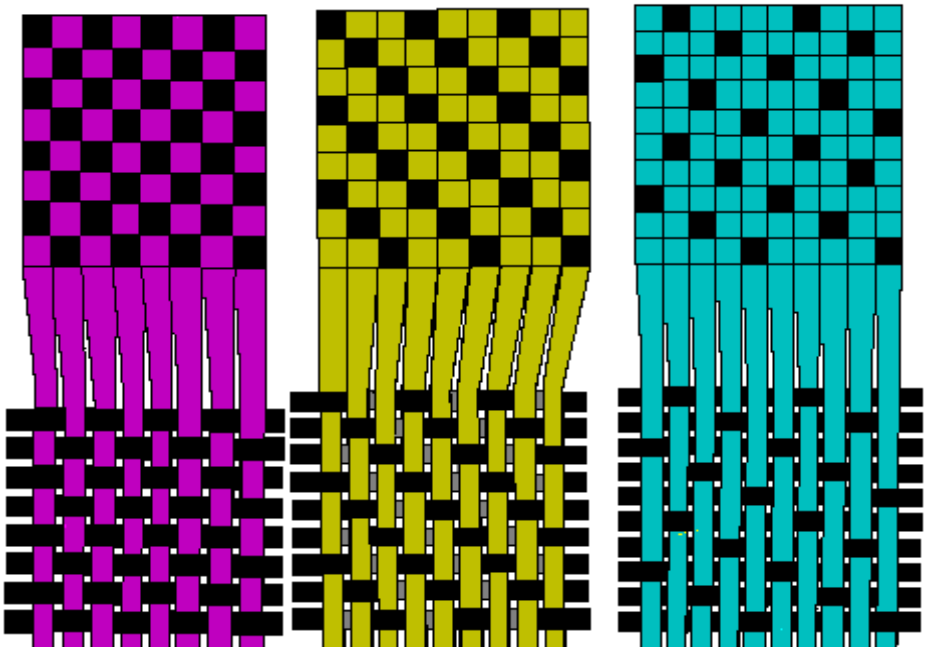
Obr. 8: Schéma vícevrstvé tkaniny, která je tvořena jednosměrnými vrstvami [18]

Kombinované prepregy se dávají u výrobku na stranu, která je více namáhána mechanicky, např. při namáhaní v ohybu na stranu taženou, nebo na stranu, která je vystavena koroznímu prostředí, protože mají větší množství pryskyřice.

Prepreg s prostorově vázanou výztuží mají vlákna tkaná nebo pletená. Voštiny, které jsou určeny pro jádra sendvičů k potahu, se přilepí a v porovnání s distanční tkaninou (distanční pletenina je trojrozměrný útvar, který vzniká z několika základních pletenin, mezi nimiž spojovací nitě udržují určitou mezeru) jsou dodávané ve stlačeném stavu s vlákny, které jsou fixované pojivem. Tkanina (pojivo rozpustné v pryskyřici) s pryskyřicí spolu po styku reagují a dochází k expanzi dané tkaniny v kolmém směru. Voštiny jsou mnohem dražší než distanční tkaniny.

Ze všech typů kontinuálních vláken můžeme vyrábět rohože a tkaniny. Borová a SiC vlákna jsou pro svou tloušťku málo ohebná, mají velké hodnoty pevnosti a jejich tuhost se nejlépe využije při napřímených vláknech.

Na kvalitu vláken má vliv chemické složení, čistota základních surovin, struktura vláken a typy vazeb (na obrázku 9 jsou vidět tři základní typy vazeb - plátnová, keprová a saténová).



Obr. 9: Typy vazeb tkanin. Zleva - plátnová, keprová a saténová vazba [21]

Stabilní mechanické vlastnosti během manipulace s vlákny a při dalším zpracování vláken zaručují povrchové povlaky. Povlaky, které musíme nanést na jednotlivá vlákna ještě před spojením do pramence, nemusíme odstraňovat a zároveň můžou být (ale nemusí) vazebným prostředkem.

Pro další zpracování vláken je důležitý jejich průměr. Při tkaní tkaniny jsou jednotlivá vlákna ohýbána, proto jsou vhodná vlákna menšího průměru. Hodnotu minimálního poloměru ohybu r_{min} (pod nímž vlákna praskají) mají vlákna odlišná. Jenom polymerní vlákna nám umožní na nich udělat uzel a přitom zůstanou nepoškozená.

1.2.1 Skleněná vlákna

Nejrozšířenější a nejpoužívanější (cca 80 % [18]) výztuží v kompozitech jsou skleněná vlákna. Obecně mají skleněná vlákna nižší modul pružnosti v porovnání s vlákny aramidovými nebo uhlíkovými a dosahují větší deformace při přetržení.

Složení skleněných vláken

Vlastnosti skleněných vláken se silikátovým základem (SiO_2) ovlivníme jejich chemickým složením. Skleněná vlákna se vyrábějí tažením roztavené směsi oxidů křemíku (SiO_2) s přidáním oxidů kovu Ca, Al, Pb, Mg, B a s malým podílem oxidů alkalických kovů Na a K. Dloužením proudu skla, které teče tryskami s průměrem 1 mm, se dosáhne potřebného průměru vláken [18]. Není to však konečný průměr skleněných vláken, ten je dán rozdílem mezi rychlostí vytékání a rychlostí odtahování vláken. Na jednotlivá vlákna je ještě za horka nanesena ochranná povrchová vrstva povlaku, což usnadní jejich další zpracování a zároveň ochrání jejich povrch před mechanickým poškozením (při manipulaci s nechráněnými vlákny dochází k mechanickému obrušování povrchu třením – abraze) a vlhkostí (vysoký obsah adsorbované vody překáží vytvoření výborné soudržnosti mezi vláknem a polymerní matricí). Používají se následující ochranné povlaky:

- **lubrikační látky –** polyvinylakohol, vosk, želatina, olej, škrob
- **vazebné prostředky** jsou hlavně organokovové sloučeniny a organosilany, které mají výbornou afinitu jak k vláknům, tak i k matrici, dalšími pozitivními vlastnostmi vazebních prostředků jsou snížení adsorbovaného množství vody (hydrofobizační vlastnost) a antistatická vlastnost (vlákna nepřitahují prach).

Po úpravě povrchu se skleněná vlákna sdružují do pramence a následně jsou navíjena na cívky různých tvarů a velikostí podle dalšího využití. Spojením do pramenů vznikne polotovar roving. Rovingy se zpracovávají přímo technologií stříkání, tažení, navíjení, nebo se používají pro výrobu tkanin a vícesměnných výztuží. Také se používají při výrobě tenkých nebo speciálních hustých tkanin, které jsou vhodné pro použití v elektrotechnice, například pro elektroizolační účely. Prameny nasekané na délku 50 mm [18] se použijí na výrobu pramencových rohoží s náhodně orientovanými vlákny. Prameny nasekané na délku 2 až 6 mm [18] se použijí na výrobu premixů a při vyztužování termoplastů nebo reaktoplastů.

Skleněná vlákna se vyrábějí ze skloviny, jejíž značení je:

- **E**, **S**, **C** a jsou to vlákna odolná kyselinám
- **ACR** jsou vlákna odolná alkáliím
- **L** jsou vlákna se zvýšeným obsahem Pb a křemenná vlákna.
- **D** je borosilikátové sklo, které má dobré dielektrické vlastnosti, vynikající chemické a fyzikální vlastnosti

Složení jednotlivých typů skel uvádí tabulka 1.

Tab.1: Složení sklovin hmotnostní procenta (%) [18]

Oxid	Sklo E	Sklo S	Sklo C	Sklo ACR	Sklo L	Křemenné sklo
SiO2	52-56	65	64-68	64	62,5	99,9
Al2O3	12-16	25	3-5	1	2,6	
CaO	16-25		11-15	5		
MgO	0-5	10	2-3		10,3	
TiO2				3		
ZrO2				13	2,1	
B2O3	5-10		4-6		13,6	
Na2O	<0,8	<0,3	10	14	<0,8	
K2O	<0,8	<0,3	10	14	<0,8	
PbO					8,5	

Skleněná vlákna z E skloviny je to bezalkalické vápenato-hlinito-boro-křemičité sklo, které se vyznačuje perfektní kombinací mechanických a elektrických vlastností (ztrátový činitel - tan d - při 1 MHz je 0,0039 a relativní permitivita je cca 5,9 až 6,4 při frekvenci 1 MHz [18]). Vlákna z E skloviny jsou nevodivá, mají velký povrchový odpor a dobrou odolnost proti hydrolýze, což je rozkladná chemická reakce, při které dochází ke spotřebovávání molekul vody, také mají nejmenší teplotu tavení a jsou nejlevnější. Používají se často v kombinaci s nenasycenými polyestery (PES). V elektrotechnické praxi jsou známé spojením s epoxidy (epoxid je cyklický ether a obecný chemický vzorec éteru je R—O—R).

Skleněná vlákna z S skloviny se používají ve většině případů v kompozitech s epoxidovou matricí. Vlákna ze skloviny S mají větší množství oxidu hliníku a křemíku, jsou dražší a mají vyšší teplotu tání, což nepřispěje k jejich použití do široké technické praxe. Pro hodně mechanicky namáhané výrobky jsou perspektivní S-vlákna, která mají větší pevnost v tahu, větší modul pružnosti v tahu, menší hustotu, jsou velmi korozivzdorné a mají větší teplotní odolnost. E-sklo začíná ztrácet svoji pevnost již při teplotách nad cca 200 °C [4], bezalkalické S- sklo má pevnost konstantní až do cca 250 °C [4].

Skleněná vlákna z C skloviny - s rostoucím množstvím alkálií teplota měknutí klesá, vlákna jsou méně pevná a jejich mechanické vlastnosti se zhoršují s rostoucí teplotou. Větší množství alkalických prvků zlepší odolnost proti rozpouštění v prostředí obsahujícím kyseliny.

Vlákna z ACR skloviny jsou vhodná pro alkalické prostředí.

Skleněná vlákna z L skloviny. Sklo L obsahuje oxid olova, které zabraňuje průchodu rentgenového záření. Využívá se především v medicíně, ve vojenství, ve vědeckých nebo laboratorních přístrojích.

Křemenná vlákna mají stejnou relativní permitivitu (při 1 MHz ε_r = 3,78 [276]) jako aramidová vlákna, ale malý koeficient délkové roztažnosti, nulovou absorpci, vyšší tepelnou odolnost a měknou při teplotě 980 °C [276]. Křemenná vlákna se používají při výrobě tkanin, rohoží, sendvičů (voštiny s křemennými vlákny zaručují výbornou prostupnost elektromagnetické vlny), dále se používají v letectví, ve vojenství.

Skleněná vlákna dutá jsou lehčí než vlákna plná při stejných hodnotách pevnosti a modulu pružnosti.

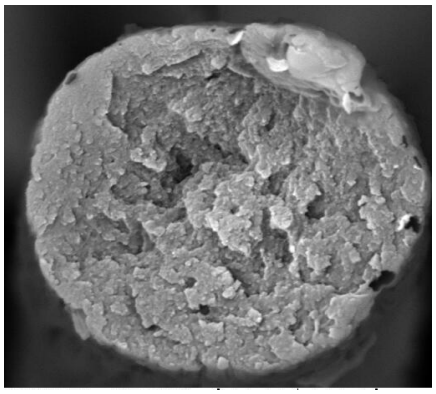
Skleněná optická vlákna jsou dielektrické vlnovody, které slouží pro přenos elektromagnetických vln. Optická vlákna se mohou používat jako senzory, fungují jako snímače teploty, deformace a napětí. Speciální FBG vlákna (angl. Fibre Bragg Gratting) mohou sloužit k monitorování stavu konstrukcí, proto na svém povrchu mají oblast s fotoleptem vytvořenou ryskami. Změna vzdálenosti rysek odpovídá změně vlnové délky odraženého světla (zdrojem světla je laser). Speciální optické vlákno můžeme zabudovat do kompozitních konstrukcí a sledovat změny potřebných veličin, například vlákno FBG zabudované do listu větrné elektrárny neovlivní negativně životnost dané konstrukce ani při dynamické únavě.

1.2.2. Uhlíková vlákna

Uhlíkové vlákno obsahuje uhlík různých modifikací. Atomy uhlíku jsou orientované paralelně k ose vlákna a zároveň jsou spojeny dohromady v mikroskopické krystaly. Mezi jednotlivými mikrokrystaly jsou mikroskopické dutiny, které zajistí, že uhlíkové vlákno je vzhledem ke své tloušťce velice pevné. Vlákno obsahuje také mikroskopické póry, které jsou orientované paralelně k ose vlákna. Uhlíková vlákna se vyrábějí z vláken polyakrylonitrilových (mezinárodní název PAN) a jsou to syntetická vlákna na bázi polyakrylonitrilu [18]. Vlákna z PAN mají modul pružnosti E větší než ocel, protože odklon aromatických rovin mikrokrystalů od podélné osy vlákna je malý. Pevnost středněmodulových vláken je až 7000 MPa [18]. Dnes se uhlíková vlákna vyrábějí také z vláken novoloidu (vláken fenol-aldehydových, chemický vzorec fenolu je C_6H_5OH a aldehydy jsou organické sloučeniny obsahující funkční skupinu (-CHO)).

Mezofázový dehet je zbytek po destilaci ropy nebo černého uhlí a používá se pro výrobu nejtužších uhlíkových vláken, která mají modul pružnosti v tahu E = 900 GPa (modul pružnosti v tahu je závislý na dokonalosti, velikosti mikrokrystalu, úhlu odchýlení aromatických rovin od osy daného vlákna [18]). Pevnost vláken PAN je lepší než pevnost vláken z dehtu, protože pevnost je určována defekty mikrostruktury.

Uhlíková vlákna mají oproti skleněným vláknům menší průměry, jsou totiž lépe ohebná, takže je můžeme použít na výrobu tkanin a pletenin, i když jsou křehčí než skleněná vlákna. Na obrázku 10 vidíme příčný řez uhlíkovým vláknem.



Obr.10: Uhlíkové vlákno [277]

Výrobní sortiment uhlíkových vláken.

Karbonizovaná vlákna (angl. HS – High Strength, AS – Averge Strength, HT – High Tenacity).

Vysokomodulová grafitizovaná vlákna (angl. HM – Higt Modulus) obsah uhlíku nedosahuje 100 %.

V**lákna s vysokým modulem pružnosti (**angl. VHM – Very Higt Modulus, UHM – Ultra Higt Modulus).

Vlákna se středním modulem pružnosti (angl. IM – Intermediate Modulus).

Diskontinuální vlákna porušená tahem (angl. SBCF – Stretch Broken Carbon Fiber). Určitá délka fragmentů (cca 10 cm) zaručí výborné mechanické vlastnosti kompozitu a zároveň zlepší schopnost tvarování okolo hran, v důlcích a vypuklinách (fragmenty ve viskózní matrici reaktoplastu nebo termoplastu se pohybují nezávisle).

Dutá uhlíková vlákna [18] se vytvářejí i při teplotách oxidační stabilizace u vlhkého PAN vlákna a dutý tvar je dosažen obvykle zvlákňovací tryskou. Kompozity z dutých vláken jsou lehčí o 25 % až 40 % a mají průměr větší oproti kompozitům z obvyklých uhlíkových vláken (15 μm 20μm). Kompozity s dutými vlákny mají hustotu 1,15 g/cm^3 a pevnost v tahu 149 MPa. Pro porovnání kompozity s obvyklými vlákny mají hustotu 1,68 g/cm^3 a pevnost v tahu 160 MPa [18].

Mletá uhlíková vlákna se používají k dosažení elektrické vodivosti polymerů a jako jejich výztuž.

Recyklovaná uhlíková vlákna. Růst výroby uhlíkových vláken, vysoká cena a vynikající mechanické vlastnosti naznačují, že uhlíková vlákna se vyplatí recyklovat, ne likvidovat spalováním. Recyklovaná uhlíková vlákna se používají jako výztuž polymerů, ale pouze pro nekonstrukční použití [36].

Úprava povrchu uhlíkových vláken

Účelem úpravy povrchu vyrobeného uhlíkového vlákna je:
- odstranit látky bránící kontaktu s matricí
- omezit další adsorpci plynů
- zvýšit reaktivitu povrchu k vazebnímu prostředku a matrici
- chránit vlákna před vzájemnou abrazí

Když je reaktivita ploch aromatických rovin malá, jejich hrany a rohy vážou kyslík, oxidy uhlíku, karbonylové, hydroxylové, aminové nebo kyanové skupiny a

karboxylové kyseliny. Vysoká vlhkost a plynné látky způsobují potíže při výrobě kompozitů. Během vytvrzování matrice za vyšších teplot vznikají mikroskopické plynové bublinky, které obalí vlákna. Zabránit tomu můžeme vakuovou desorpcí, rozpuštěním adsorbovaných látek v pryskyřici a úpravou povrchu vláken. Nejčastěji se na vyrobená uhlíková vlákna nanáší ochranné polymerní povlaky na bázi epoxidů nebo polyamidů, které zabraňují adsorpci látek a zároveň ochrání vlákna před abrazí. U standardních vláken PAN potřebujeme reaktivitu povrchu zvýšit a povrch zdrsnit, proto použijeme mokrý způsob (chemické působení oxidačních látek jako HNO_3, chromová kyselina, chlornatan sodný) nebo můžeme použít i suchý proces (termická oxidace). V posledních letech se užívá kontinuální úprava studeným vysokofrekvenčním plazmatem (plazma-ionizovaný plyn složený z iontů, elektronů, případně neutrálních atomů a molekul vznikl odtržením elektronů z elektronového obalu atomů plynu, nebo roztržením molekul - ionizací [37]). Je vytvářený reaktorem pracujícím při frekvencích střídavého proudu cca 15 MHz [18].

Podle prostředí, které použijeme, dosáhneme různých výsledků, například:
- leptání a zdrsňování povrchu (plynné prostředí kyslík)
- zvětšení povrchové energie (plynné prostředí argon)
- implantaci funkčních skupin (plynné prostředí čpavek)
- polymeraci monomeru na povrchu uhlíkového vlákna

Uhlíková vlákna se uplatňují ve strojírenství, v armádě, v leteckém, automobilovém, železničním průmyslu, v kosmonautice, při výrobě lodí, pro sportovní a rekreační účely a v řadě dalších oborů díky svým vlastnostem, jako je pevnost, malá hmotnost, nehořlavost, dobrá elektrická vodivost, nízká tepelná vodivost.

Jako příklad úpravy uhlíkových vláken uvedu poniklovaná krátká uhlíková vlákna. Vrstva niklu na povrchu uhlíkového vlákna zvýší elektrickou vodivost, korozní odolnost a zajistí feromagnetické vlastnosti nespojité složky [39].

1.2.3. Polymerní vlákna

Největší předností polymerních vláken je jejich malá hustota. Vlákna, která mají malou hustotu a vysokou pevnost v tahu, mají velkou měrnou pevnost. Vlákna, která jsou velice tuhá, s malou hustotou, mají velký měrný modul. Mechanické vlastnosti uhlíkových vláken jsou dané anizotropní hexagonální strukturou například grafitu nebo alotropní modifikací uhlíku. V hexagonálních rovinách grafitu máji uhlíkové atomy silné kovalentní vazby a mezi rovinami jsou slabé Van der Waalsovy síly. Dloužením z taveniny lze zvýšit pevnost maximálně na 1000 MPa [18], ale modul pružnosti se zvyšuje pouze na hodnoty 5 GPa až 10 GPa u PA vlákna a 15 GPa u PET vláken [18].

Aromatické polyamidy (aramidy, APA)

Aromatické polyamidy jsou vlákna s obchodním názvem Kevlar od firmy Du Pont [32] poly-para-fenyltereftalamid (para-aramid, PPTA). Jejich velkou výhodou je odolnost proti abrazi, malá hustota $\rho = 1440$ kg/m³ [18] a schopnost plasticky se deformovat při působení kolmé síly na osu vlákna (vlákno se plasticky přetvoří), této schopnosti se využívá například při výrobě neprůstřelných vest.

Pro zvlákňování potřebujeme PPTA rozpustit v koncentrované kyselině sírové (H_2SO_4). Roztok se potom vytlačí do ledové vodní lázně, kde se H_2SO_4 vymyje. Dále následuje neutralizace, vysušení a dloužení za tepla. Přítomnost polárních skupin N-H a

O-C-O způsobuje navlhavost aramidových vláken, ale navlhavost neovlivňuje mechanické vlastnosti. Při zpracování nechráněných vláken nedojde k poklesu pevnosti, protože aramidy jsou odolné proti abrazi. Při hydrolýze vláken v daných kyselinách se na jejich povrchu vytvoří aminové skupiny. Některá aramidová vlákna dosahují modul pružnosti v tahu E = 150 GPa - 160 GPa [18] a pevnost v tahu 4870 MPa [18] (například obchodní název Armos od ruské firmy [7]).

Vlákna z ultravysokomolekulárního polyethylenu (UHMW)

Vlákna z UHMW polyethylenu jsou připravená ve většině případů zvlákňováním z gelu. Při dloužení je orientace makromolekul omezená vysokou hustotou zapletením na přirozený dloužící poměr, což je poměr délky vydlouženého vlákna k původní délce. V roztoku, který obsahuje 5 % až 10 % [18] polymeru (před tím bylo zapotřebí rozpustit UHMW PE v látkách jako parafinový olej, parafinový vosk nebo dekalin), se makromolekuly díky rozpouštědlům oddělují a rozplétají a při toku tryskou se paralelně uspořádávají. Vlákno se tvoří při teplotě roztoku cca 135 °C [18]. Termín *zvlákňování z gelu* vznikl díky společně probíhajícím procesům krystalizace a opakovanému rozpuštění krystalů v roztoku, který má charakter gelu. Dále následuje dloužení za tepla daného porézního vlákna.

Velkou výhodou UHMW PE je malá hustota $\rho = 970$ kg/m³ [18] a také vysoká korozní odolnost. Jsou odolné vůči působení většiny chemických látek. UHMW PE při porovnání s aramidy nepřijímají vlhkost a také lépe odolávají UV záření. Nevýhodou UHMW PE vláken je malá tepelná odolnost, proto je velmi důležitá povrchová úprava, což ovlivní spojení s matricemi. V roce 1985 holandská společnost DSM začala vyrábět vlákna DYNEEMA [41]. Další společnosti také vyrábí vlákna z ultravysokomolekulárního polyetylenu, například americká firma Honeywell International vyrábí vlákna SPECTRA [42], německá firma Röchling Engineering Plastics vyrábí vlákna POLYSTONE-M [43].

Vysokomodulová vlákna polypropylenu (vlákna HMPP)

Firma Innegrity, Inc (USA) [44] vyrábí vlákna Innegra, která mají dobrou tuhost a pevnost, hustotu $\rho = 840$ kg/m³, relativní permitivitu 2,2, pevnost v tahu R = 590 MPa, modul pružnosti v tahu E = 18 GPa a jsou známá dobrou chemickou odolností [18]. Vlákna HMPP se používají pro výrobu laminátů, krytů radarů, letadel a lodí, pro výrobu desek plošných spojů (vysoké frekvence), pro výrobu protibalistické ochrany díky stejné houževnatosti jakou mají vlákna Kevlaru.

Vlákna z termotropních aromatických kopolysterů (vlákna LCP)

Nejlepší LCP (angl. Liquid Crystal Polymer) vlákna jsou vyrobena ze dvou a více druhů aromatických polyesterů. Pro konstrukční použití jsou LCP vlákna lepší než polyethylenová, protože jsou odolnější proti teplotě a mají přirozenou afinitu k polymerní matrici. V porovnání s aramidy jsou LCP nenavlhavá. Vlákna z termotropních aromatických kopolysterů (vlákna Ekonol) vyrábí firma Sumitomo Chemical, Tokio, Japonsko nebo firma Kuraray America, Inc. Vyrábí vlákno Vectran [46]. LCP vlákna mají modul pružnosti v tahu E = 52 GPa - 138 GPa [18].

Vlákna na fenol-aldehydové bázi

Fenol-aldehydové vlákno Kynol vyrábí firma Nippon Kynol, Inc., American Kynol, Inc., Kynol Europa GmbH [46]. Vlákno Kynol je díky své chemické struktuře netavitelné a nehořlavé, proto se používá na výrobu ochranných pomůcek. Kynol má modul pružnosti v tahu E = 350 GPa - 450 GPa [18].

Vlákna PBO

Vlákna PBO – poly–para–fenylen - 2,6 benzol [1,2-d-5,4-d'] bisoxazol [18] s názvem Zylon vyrábí japonská firma Toyobo [48]. Vlákna PBO mají větší tuhost než vlákna aramidová a UHMW PE vlákna dále mají modul pružnosti v tahu E = 480 GPa, relativní permitivitu (při 100 kHz) ε_r = 3, ztrátový činitel tgδ = 0,001 a také jsou nenavlhavá, nehořlavá, odolná proti abrazi [18].

Vlákna PIPD

Vlákna PIPD - polypyridobisimidazol - vyrábí firma Magellan Systems International [49] a firma Du Pont Advanced Fiber Systems [50]. Vlákna PIPD mají vysokou pevnost v tahu, modul pružnosti v tahu E = 300 - 450 GPa [18] a mají velkou adhezi k pryskyřicím.

1.2.4 Čedičová vlákna

První pokusy, při kterých došlo k výrobě čedičových vláken, se konaly na začátku 20. století, ale ke zdokonalení výroby došlo teprve po 2. světové válce v ruských a ukrajinských závodech, které jsou v současné době důležitými výrobci čedičových výrobků.

Čedičové vlákno je výrobek, který je získán z čedičové horniny. Čedičová hornina, která se používá k výrobě vláken, obsahuje olivín - $(Mg,Fe)_2[SiO_4]$ [52] - a nefelín - $(NaK)AlSiO_4$ [55]. Používají se kyselé čediče [18] obsahující nejméně 46 % (ve většině případů 58 %) oxidu křemičitého SiO_2 a také čedičová vlákna obsahující Al_2O_3 (cca 17 %), Fe_2O_3 (cca 10 %), CaO (cca 8 %), MgO (cca 4 %), Na_2O (cca 2,5 %), TiO_2 (cca 1,1 %), K_2O (cca 0,9 %).

Čedičová vlákna mají vlastnosti podobné skleněným vláknům typu S, ale jsou až o 40 % levnější, mají hustotu ρ = 2750 kg/dm³, modul pružnosti cca 89 GPa [18], nehořlavost, nízký obsah spalin, minimální nasákavost, dobrou chemickou odolnost (proti vodě, většině chemikálií, anorganickým kyselinám, rozpouštědlům, proti plísním a jiným mikroorganismům). Dále mají nízkou tepelnou vodivost (teplota tavení je 1400 ºC až 1700 °C) [18], vysoký koeficient zvukové pohltivosti, vysoký elektrický odpor a také jsou odolná proti erozi a proti UV záření.

1.2.5 Přírodní vlákna

Proteinová vlákna

Pavoučí hedvábí je proteinové vlákno (proteiny jsou biopolymery a jsou podstatou všech živých organismů). Vlákna pavouků Argiope a Nephila mají vysoké prodloužení při přetržení, v porovnání s vlákny Kevlar až čtyřikrát větší. Přímý hromadný chov pavouků prakticky nejde realizovat, protože pavouci jsou agresivní a

potřebují mít pod kontrolou své teritorium. Žlázové geny pavouků byly transplantovány do mléčných žláz koz, jejich mléko pak obsahuje potřebné proteiny. Mléko se dvakrát odstřeďuje (zbaví se tuku), přidává se k němu určitý druh soli (ke dnu klesnou proteiny) a po dalším odstředění se sediment rozpouští ve vodě. Ze vzniklé zlatavé emulze se spřádá nekonečné vlákno.

Proteinová vlákna nemohou v pevnosti konkurovat výrobkům, jako jsou PBO, PPTA a PIPD, ale mají vysokou tažnost (20-30 %), vyšší pevnost v tahu (1,2-1,8 GPa [18]) a jsou levnější než klasické polymerní vlákno Nylon (PA66).

Známý průmyslový výrobce - kanadská firma Nexia Biotechnologies - vyrábí z pavoučích vláken filamenty (nekonečná vlákna [58]) BioSteel o průměru cca 10 mikronů - 40 mikronů [18].

Vlákna z rostlin

Organická přírodní vlákna se získávají z pěstovaných rostlin jako [18]:

- konopí (angl. Hemp), pevnost v tahu m 0,46 GPa
- juta (angl. Jute), pevnost v tahu 0,442 GPa
- len (angl. Flax), pevnost v tahu 0,84 GPa
- bavlna (angl. Cotton), pevnost v tahu 0,2- 0,8 GPa

Přírodní vlákna z rostlin se používají jako výztuž tvarovaných velkoplošných dílů pro interiéry osobních automobilů. Použití rostlinných vláken v termoplastech přináší některé výhody jako lacinou výztuž, úsporu polymeru, větší tepelnou vodivost, recyklovatelnost odpadu, přírodní vzhled povrchu výrobku, neopotřebení zpracovatelských strojů, nižší cenu výrobku při použití výztuže z přírodních vláken.

Balza

Balza je rychle rostoucí strom, jenž vyrůstá až do 30 m. Balsové dřevo je nejlehčí dřevo na světě, které nehoří, ale doutná. Roste ve Střední a Jižní Americe, dále se vyskytuje ve státech v povodí Amazonky a na ostrovech v Karibiku. Velké buňky, které jsou vyplněny vodou, tvoří strukturu balsového dřeva. Po vysušení daných buněk obsahují vlákna celulózy v ligninové matrici. Tento kompozit (vytvořený přírodou) má hustotu 40 kg/m³ až 340 kg/m³, (nejčastěji 160 kg/m³) [18].

1.2.6 Borová vlákna

Borová vlákna jsou vlákna pro vysokoteplotní aplikace. Mají pevnost v tahu 3,45 GPa, pevnost v tlaku cca 6,9 GPa, hustotu 2,5 g/cm³, modul pružnosti 400 GPa [18]. V porovnání s ostatními vlákny mají borová vlákna velký průměr cca 10^2 μm [18]. Borová vlákna vyrábí firma Specialty Materials, Inc (USA) náročnou metodou chemické depozice z plynné fáze (angl. CVD - Chemical Vapor Deposition) na substrát z wolframového vlákna, což určuje jejich vysokou cenu. Ve většině případů se borová vlákna vyrábějí jako jednosměrné prepregy s epoxidovou matricí. Tkaniny z borových vláken se nevyrábí, ale je dodáván materiál, kde jsou borová vlákna spojena polyesterovou přízí. Firma Specialty Materials, Inc (USA) vyrábí také prepregy HyBor, které jsou hodnoceny podle počtu borových vláken na jeden palec (inch). HyBor je hybridní (hybridizace je vložení dvou či více vláken s různými vlastnostmi do jedné

matrice [70]). Prepreg obsahuje jak uhlíková, tak i borová vlákna. Borová vlákna použijeme na výrobu tlakem namáhaných prvků, na výrobu dílů s malou tepelnou roztažností a roztažností způsobenou vlhkostí absorbovanou do polymerní matrice.

1.2.7 Keramická vlákna

Keramická vlákna stejně jako borová jsou vlákna pro vysokoteplotní aplikace. Hlavní předností keramických vláken je jejich velmi dobrá tepelná a chemická odolnost. V porovnání s uhlíkovým a polymerním vláknem má keramické vlákno větší hustotu, cca 3 g/cm³ u Al_2O_3 vláken, cca 2,5 g/cm³ u SiC vláken [18].

Kontinuální vlákna z karbidu křemíku (SiC)

Kontinuální vlákna SiC s průměrem 10 μm - 100 μm jsou vyráběna firmou Speciality Materials, Inc (USA) stejně jako borová vlákna metodou Chemical Vapor Deposition (CVD) [4]. Zdrojem křemíku a uhlíku jsou alkylsilany, např. CH_3 $SiCl_3$ při CVD výrobě. SiC vlákna, která mají průměr cca 15 μm, se získávají z polymerních prekurzorů. Firma Nippon Carbon Company (Japonsko) vyrábí vlákno Nicalon. Složení Nicalonu je cca 59 % Si, cca 31 % C a cca 10% O [18]. Na Hi-Nicalon je nanášen povlak BN nebo BN/SiC. Polykrystalické SiC vlákno Sylramic [64] vyrábí také firma COI Ceramics, Inc. (USA). Firma UBE Industries (Japonsko) vyrábí polykrystalické SiC vlákno s průměrem 8 μm [18] pod obchodní značkou Tyranno. Vlákno Tyranno je vyrobeno z polytitanokarbosilanu, je amorfní a průhledné, obsahuje Si, C, N, O a také malé množství Al a vydrží bez ztráty hmotnosti vysoké teploty.

Kontinuální vlákna SiC jsou používána s kovovými, keramickými nebo uhlíkovými matricemi a využívají se v leteckém průmyslu a pro díly pracující za vysokých teplot.

Kontinuální vlákna Al_2O_3

Kontinuální vlákna Al_2O_3 jsou elektricky nevodivá, a proto se využívají ve vojenském, leteckém a námořnickém průmyslu, například v kompozitech pro kryty radarů. Tuhost mají v porovnání se skleněnými a polymerními vlákny mnohem lepší. Kontinuální vlákna Al_2O_3 mají vysoký bod tání >2000 °C [18] a relativně nízkou viskozitu. První vlákna Al_2O_3 začala vyrábět firma Du Pont pod obchodní značkou FPÒ [50].

Vlákna Al_2O_3 Nextel vyrábí firma 3M [65], obsahují ve většině případů určité množství SiO_2 a používají se pro konstrukční účely, například rotory, díly letadel a raket. Vlákna obsahující B_2O, jsou sklovitá a jsou určena pro tepelné izolace.

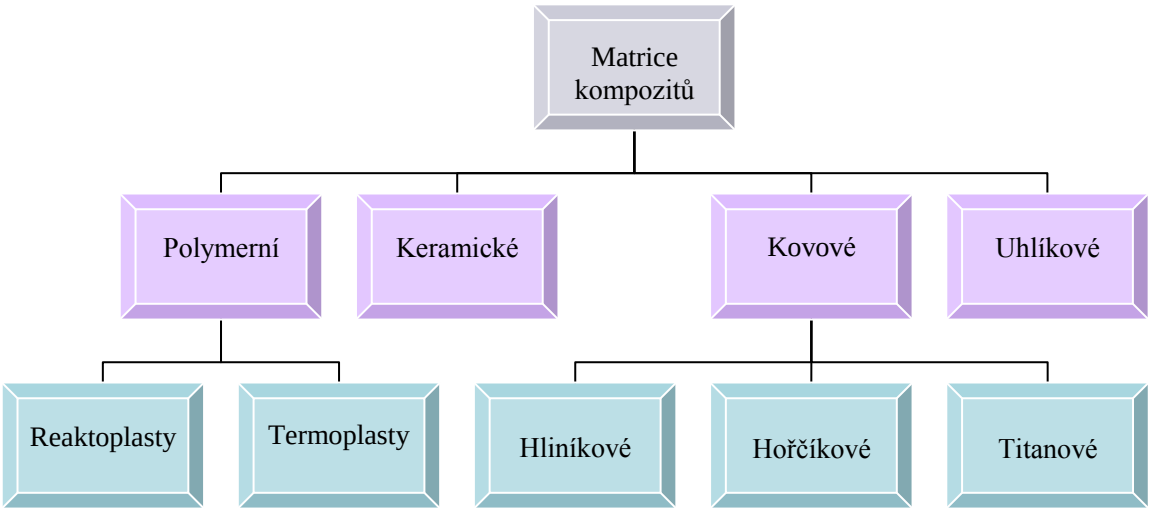
Si_3N_4 vlákna

Tato vlákna se můžou vyrábět jako kontinuální, ale častěji jsou připravena jako whiskerů. Whiskery a vlákna Si_3N_4 jsou elektricky nevodivá a odolná proti opotřebení.

1.3 Charakteristika matrice v kompozitních materiálech

Aby bylo dosaženo optimálního synergického účinku a dlouhé životnosti kompozitního materiálu, musíme klást důraz na přípravu a výrobní postup, na druh vlákna a jeho povrchovou úpravu, na průměr vláken a na to, jaká matrice bude použita. Dále na to, zda bude výrobek z daného kompozitu namáhán staticky nebo dynamicky, za jakých teplot, v suchém nebo ve vlhkém prostředí.

Na obrázku 11 jsou druhy matric kompozitních materiálů.



Obr. 11: Druhy matric kompozitních materiálů

1.3.1 Polymerní matrice

Vláknové kompozity s polymerní matricí jsou nejdéle známé, první záznamy jsou z roku 1916. Pro kompozity s kontinuálními vlákny se nejvíce používají matrice polymerní, buď reaktoplastické nebo termoplastické. Reaktoplasty jsou polymerní materiály, které při zpracování vytvářejí husté, prostorově sesíťované struktury, v nichž jsou atomy C vzájemně provázány kovalentními vazbami. Proces sesítění se nazývá vytvrzování. Reaktoplast je ve vytvrzeném stavu netavitelný a nerozpustný. Termoplasty jsou polymerní materiály, které při zahřívání přecházejí do plastického stavu, kdy je můžeme snadno tvářet a zpracovávat různými technologiemi. Do tuhého stavu přejdou ochlazením pod teplotu tání nebo ochlazením pod teplotu viskózního toku u amorfních plastů. Protože při zahřívání nedochází ke změnám chemické struktury, můžeme proces měknutí a tuhnutí opakovat bez omezení. Reaktoplastické matrice jsou například nenasycené polyestery (UP), vinylestery (VE) a epoxidy (EP) a termoplastické jsou například polypropylen (PP) a polyamidy (PA).

Reaktoplastické matrice

Nenasycené polyestery

Nenasycené polyestery (UP) vytvoříme z lineárního nenasyceného polyesteru, který je připraven reakcí dvou funkčních složek polypropylenglykolu ($C_3H_8O_2$) a

kyseliny ftalové ($C_8H_6O_4$), kyseliny maleinové ($C_4H_4O_4$) nebo anhydridu (ftalanhydridu, maleianhydridu). Dále vzniklý předpolymer rozpustíme v reaktivním rozpouštědle, ve většině případů použijeme styren [84], ale mohou být použity i nestyrenové nenasycené polyesterové pryskyřice, například reaktivním rozpouštědlem může být některý druh metakrylátu. Metakryláty se vyznačují vynikající adhezí, jsou tolerantní vůči nečistotám na povrchu materiálu, charakterizovány vysokou pevností, houževnatostí, odolností proti únavě, dobrou chemickou odolností a dobrou tepelnou odolností. Nevýhodou je nepříjemný zápach a smrštění během vytvrzování cca 16 % [87]. Podíl reaktivního rozpouštědla určuje viskozitu pryskyřice.

Nenasycené polyesterové pryskyřice mohou být [18]:

- **orthoftalová** - maximální pracovní teplota je cca 80 °C, nejlevnější, modul pružnosti E = 3400 [MPa], pevnost v tahu = 55 [MPa]
- **izoftalová** - dobrá chemická a tepelná odolnost, maximální pracovní teplota je cca 90 °C, dražší než orthoftalová nenasycená polyesterová pryskyřice, modul pružnosti E = 3400 [MPa], pevnost v tahu = 75 [MPa]
- **fumarová** - velmi dobrá chemická i tepelná odolnost, maximální pracovní teplota je cca 130 °C, modul pružnosti E = 2800 [MPa], pevnost v tahu = 40 [MPa]
- **chlorftalová** - nehořlavá, maximální pracovní teplota je cca 140 °C, modul pružnosti E = 3400 [MPa], pevnost v tahu = 20 [MPa]
- **tereftalová** - chemická i tepelná odolnost je mnohem lepší oproti výše uvedeným UP, pryskyřice pro pultruzi [26] je levnější než izoftalová nenasycená polyesterová pryskyřice

Nemodifikované nenasycené polyesterové pryskyřice jsou známé velkým smrštěním při vytvrzování (cca 7 % [18]), jsou křehké, snadno v nich vznikají mikrotrhliny. Pro menší smrštění při vytvrzování a kvalitnější povrch kompozitu se používá směs pryskyřice s plnivy nebo práškovými termoplasty. Velký vliv na vlastnosti kompozitů má i kvalita spojení mezi vlákny a matricí. Polyesterové pryskyřice dobře smáčejí skleněná vlákna, ale pevnost vazby mezi matricí a skleněným vláknem je menší v porovnání s epoxidovou pryskyřicí.

Vytvrzené pryskyřice se vyznačují vysokým leskem, dobrými mechanickými a elektroizolačními vlastnostmi, odolností proti vodě, olejům, uhlovodíkům [221]. Účinek prostředí, zejména vody, je velice důležitý. Pouhá absorpce vody cca 1,7 % hm sníží modul na cca ½ hodnoty před absorpcí nebo elektrický odpor sníží o pět řádů [14]. Velmi velká absorpce vlhkosti je známa u polyesterových matricí s aramidovými vlákny.

Kontaktní laminace nenasycenou polyesterovou pryskyřicí - ruční kladení výztuže a její následné prosycování pryskyřicí pomocí štětce nebo stěrky - je technologií s nízkou produktivitou, ale můžeme tak vyrobit i výrobky s velmi vysokou kvalitou. Získáme kompozit s objemovým podílem vláken cca 50 %, když pečlivě odstraníme přebytečnou pryskyřici před jejím zgelovatěním [18].

Vinylesterové pryskyřice

Jsou to nenasycené estery [77] epoxidových pryskyřic. Makromolekula předpolymeru vinylesterové pryskyřice (VE) má méně reaktivních míst v porovnání s nenasycenými polyestery (UP), dvojná vazba je umístěna pouze na koncích řetězce, což vede k větší ohebnosti pryskyřice a větší odolnosti proti tvorbě mikrotrhlin.

Vinylesterové pryskyřice mají ve srovnání s nenasycenými polyestery [18]:

- lepší odolnost proti korozi

- větší tepelnou odolnost
- vyšší cenu
- jsou pomalejší při vytvrzování
- větší mezilaminární smykovou pevnost
- větší houževnatost
- schopnost odolávat absorpci vody

Epoxidové pryskyřice

Epoxidové pryskyřice jsou nejvšestrannější reaktoplasty pro konstrukční použití. Jejich vlastnosti závisí na chemické struktuře, použitém tvrdidle (tvrdidlo může na rozdíl od VE a UP podstatně ovlivnit fyzikálně chemické vlastnosti vytvrzené epoxidové pryskyřice) a případných modifikujících složkách. Tyto pryskyřice v porovnání s ostatními reaktoplasty mají velmi dobrou houževnatost, odolnost proti únavě a tečení, výbornou adhezi k vláknům, dobrou teplotní odolnost, výbornou chemickou odolnost, dobré elektroizolační vlastnosti v poměrně široké oblasti teplot a malé smrštění při vytvrzování.

Epoxidové pryskyřice v nevytvrzeném stavu mají větší viskozitu než nenasycené polyestery a vinylesterové pryskyřice. Podle molekulové hmotnosti jsou to kapaliny (až tuhé nelepivé látky), ale přidáním složek, jako reaktivní ředidlo nebo modifikující složka (pro zvýšení houževnatosti), můžeme užitné i technologické vlastnosti výsledné směsi měnit v širokém spektru. Vytvrzovací reakce u epoxidové pryskyřice je stupňovité povahy, probíhá velmi pomalu, proto ve většině případů nevznikají problémy s exotermickou povahou vytvrzovacího procesu (neplatí to u tlustostěnných masivních výrobků). Dané pryskyřice proto můžeme použít pro všechny technologie, ale jsou dražší než nenasycené polyestery a vinylesterové pryskyřice.

Epoxidová pryskyřice se vyrábí pod obchodním názvem RHENATECH, je vhodná pro mnohé aplikace, v elektrotechnice se například používá jako základní izolační zalévací pryskyřice na transformátory, cívky a senzory. Další obchodní název této pryskyřice je VOTASTAT, aplikuje se pomocí vakuově tlakové impregnace. Používá se pro izolační systémy elektrických točivých strojů a trakčních motorů.

Dále se epoxidové pryskyřice používají například k impregnaci kartitů, při výrobě textitu a sklotextitu.

Houževnaté epoxidové pryskyřice

Vytvrzené epoxidové pryskyřice mají malou lomovou energii, cca G_{ic}=50 Jm^{-2} až 200 Jm^{-2} [18], a proto mají malou odolnost proti vzniku a šíření trhlin. Zvýšení lomové houževnatosti je možné dosáhnout více způsoby [18]:

- reaktivními tekutými kaučuky [108]
- speciálně modifikovanými inženýrskými termoplasty, například polyethersulfon PES, [109], polyetherimid PEI [110], polyaryletherketony PEK, PEEK [110]
- phenoxy termoplastem [107]
- reaktivními rozpouštědly [116]
- neorganickými částicemi (skleněné mikrokuličky, částečky Si, částečky trihydrátu hliníku ($Al(OH)_3$)
- dvoufázovými nanokuličkami (angl.“core-shell”) [112]
- hyper-rozvětvenými polyestery [112]

Epoxidové pryskyřice pro vakuovou infuzi

Epoxidové pryskyřic pro vakuovou infuzi (angl. "Vacuum Infusion Process", zkratka VIP) dovolují bez autoklávu vyrábět rozměrné kompozitové díly (kontejnery, karosérie autobusů, lopatky větrných elektráren) s podílem mikroskopických dutin (pod 1 %) [18] a kontrolovaném podílu pryskyřice/vlákno. Nové epoxidové pryskyřice pro vakuovou infuzi dovolují použít levné formy a mohou se vytvrdit za pokojové (dvousložkové systémy) nebo mírně zvýšené teploty (jednosložkové systémy). Metody vakuového prosycování jsou vhodné pro velkorozměrné díly proto, že jiné metody by byly pracné (ruční kladení) nebo nákladné (technologie RTM, angl. "Resin Tranfer Molding" [18]).

Bismaleinimidové pryskyřice

Bismaleinimidové pryskyřice (BT) se nejčastěji používají se skelnou tkaninou nebo skelným vláknem a mají vynikající elektrické i dielektrické vlastnosti (používají se při výrobě desek plošných spojů), malou permitivitu, velkou odolnost vůči vyšším teplotám (cca 200 °C) a používají se při vyšších frekvencích [212].

Silikonové pryskyřice

Tvrdé silikonové pryskyřice, které jsou připraveny hydrolytickou kondenzací a jsou tvořeny zesítěnými oligosiloxany, mají vzorec RxSiOy, kde R je organická složka ve většině případů s methylenovými (Me) nebo fenylenovými (Ph) skupinami a funkčními skupinami OH a H. Když skupina R je tvořena methylenem, jsou možné různé konformace monomeru (Me3SiO), (Me-methylen) [18]. Jsou čtyři možné siloxanové monomerní jednotky:

- "M" (Me_3SiO)
- "D" (Me_2SiO_2)
- "T" ($MeSiO_3$)
- "Q" (SiO_4)

Silikonové pryskyřice mají vlastnosti typické pro polysiloxany, například:

- odolnost vůči nízkým a vysokým teplotám
- malá změna vlastností v závislosti na teplotě
- hydrofobní účinky
- odolnost vůči UV
- k ostatním materiálům jsou netečné
- k ostatním materiálům jsou nekorozivní a biologicky inertní
- mají dobré elektroizolační vlastnosti (relativní permitivita, ztrátový činitel)

Tyto pryskyřice jsou nejvíce používány s kontinuálními vlákny SiC nebo skleněnými vlákny. Výše uvedené vlastnosti předurčují silikonové pryskyřice pro aplikace, kde je důležitá elektrická izolace při vysokých teplotách a vysokých frekvencích (vysokonapěťové izolační systémy točivých elektrických strojů [6]).

Laminát dodávaný pod obchodním značením TUFNOL 10G/5, dodávaný v podobě desek (skleněná tkanina jako výztuž a silikonová pryskyřice jako matrice), je odolný proti teplotě cca 200 °C, krátkodobě až cca 240 °C [18]. Má také velmi dobrou nehořlavost a odolnost proti vlhkosti. Další skelný laminát s obchodním značením NORPLEX MC507U se silikonovou pryskyřicí má dlouhodobou odolnost proti teplotě

cca 220 °C a krátkodobě vydrží cca 600 °C [18].

Hlavními nevýhodami silikonových pryskyřic je jejich menší pevnost v tahu a malá odolnost proti olejům.

Polyimidy

Polyimidy (PI) se používají pro extrémní teplotní, elektrická a mechanická zatížení. Jsou odolné proti záření, mají nízkou tepelnou a elektrickou vodivost. Používají se na výrobu kluzných součástek, ozubených kol, součástek ložisek, těsnících součástek, kondenzátorů.

Kapton je polyimid, který vznikne bipolykondenzační reakcí aromatického dianhydridu s aromatickým diaminem. Své fyzikální, výborné elektrické a mechanické vlastnosti si udržuje v širokém rozsahu teplot cca -120 °C až +400 °C [6] a se skleněnou tkaninou může být použit jako izolační systém transformátoru.

PI pryskyřice mohou být používané s kontinuálními vlákny SiC, se skleněnou tkaninou (například polyimid vyztužený skleněnou tkaninou je používán na výrobu desek plošných spojů) nebo s čedičovými vlákny.

Polyurethanové pryskyřice

Polyurethany jsou polymery, které se vyrábí polyadicí diizokyanátů a polyolu (obsahují více vázaných -OH skupin) za vzniku urethanové vazby. Tvrdé polyurethanové pryskyřice (PU) se používají pro kompozitní díly, vyráběné kontinuálními procesy, jako je pultruze nebo navíjení [18]. Polyurethanové pryskyřice jsou houževnatější než styrenové nenasycené polyestery a vinylestery. Jejich hlavní předností je větší rázová houževnatost a velká odolnost proti únavě, dále mají velice dobrou adhezi k výztuži, jsou poměrně levné, lehké a pevné. Až donedávna pryskyřice PUR [162] nebyly považovány za vhodné pro kompozity vzhledem k velmi rychlé vytvrzovací reakci (přibližně minuty) a tendenci vytvářet pěnu s vnitřními dutinami, protože reakce je silně exotermická. Situace se změnila výrobou dvousložkových polyurethanů na bázi isokyanátu a polyolu [18]. Tyto pryskyřice použijeme například pro zalévání technologických volných prostorů při výrobě elektrického zařízení.

PU pryskyřice jsou kompatibilní s nanočásticemi jílu, čedičovými, uhlíkovými a skleněnými vlákny. Z těchto kompozitů se dají vyrábět konstrukční díly na ohebné výrobky, například hnací hřídele, spojky a klínové řemeny [278].

Formaldehydové pryskyřice

Močovinoformaldehydové (UF) a melaminoformaldehydové (MF) reaktoplastické pryskyřice vznikají jako produkt polykondenzace [18]. UF a MF se používají pro kompozitní díly, které se vyrábějí lisováním, technologií RTM a injekčním vstřikováním IM (angl. “Injection Molding”) [18]. Tyto pryskyřice jsou používány s kontinuálními vlákny SiC.

Močovinoformaldehydové pryskyřice jsou poměrně levné, nehořlavé, tepelně odolné a odolné proti elektrickému oblouku, tukům, esterům olejů, petroleji, acetonu, alkoholům, detergentům a slabým kyselinám.

Melaminoformaldehydové pryskyřice jsou křehké, ale vyznačují se vysokou adhezí k vláknům, které obsahují celulózu. Když k tvorbě kompozitů použijeme přírodní vlákna, tak v porovnání s kompozity se skleněnými vlákny jsou lehčí, ohebnější, lépe odolávají únavě.

Fenolické pryskyřice - fenolformaldehydové

Vyrábějí se z fenolu (C_6H_5OH) a formaldehydu (CH_2O) kondenzační reakcí, při které se odštěpuje voda.

Fenolické pryskyřice - fenolformaldehydové (PF) jsou nehořlavé a při expozici v plameni nevyvíjejí kouř. Jsou křehké a za normální teploty v tuhém stavu. Dále mají velmi dobrou rozměrovou stálost a platí to i za vysokých teplot. Mohou přenášet zatížení i při teplotách nad teplotu skelného přechodu (Tg), což je následkem vysoké hustoty zesítění.

Pro lamináty se používají novolakové fenolické pryskyřice - fenolformaldehydové. Novolakové PF pryskyřice vznikají kysele katalyzovanou polykondenzační reakcí fenolu s formaldehydem. Běžné fenolické pryskyřice novolakového typu mají technologické parametry [18]:

- tlak při vytvrzování cca 17 MPa - 26 MPa
- teplota vytvrzování cca 130 °C - 160 °C
- pracovní teplota cca 250 °C - 350 °C
- teplota tvarové stálosti za tepla cca 120 °C - 175 °C
- teplota skelného přechodu (Tg) cca 300 °C

Fenolické kompozity se používají pro pojízdná schodiště metra, pro vozy metra, v konstrukcích železničních vagónů. Dále se používají při výrobě desek plošných spojů a při výrobě textitu.

V mnoha literaturách [14], [18] je popsáno, že jak fenol, tak formaldehyd jsou jedovaté látky, které mají karcinogenní účinky.

Reaktoplastické polyetheramidy

Reaktoplastické polyetheramidy (PEAR) [135] jsou odvozené z benzoxazinů a fenolických novolaků. PEAR pryskyřice jsou konkurenčně schopné v porovnání s vícefunkčními EP. Reaktoplastické polyetheramidy jsou tepelně odolné, oděruvzdorné a velmi houževnaté a používají se například při výrobě válců, ozubených kol, řemenových pohonů. Tyto pryskyřice mohou být používány s kontinuálními vlákny SiC, se skleněnými vlákny nebo čedičovými vlákny.

Furanové pryskyřice

Jsou to tekuté reaktoplasty, v nichž polymerní řetězec obsahuje furanový prstenec, který vznikl kondenzací furfuryalkoholu $C_5H_6O_2$ [18].

Furanové pryskyřice odolávají všem organickým rozpouštědlům, mají výbornou odolnost proti kyselinám, proto se používají tam, kde je vysoká agresivita prostředí, například na ochranné nátěry různých konstrukcí. Teplota použití je maximálně 140 °C.

Furanové pryskyřice na bázi tetrahydrofulfurylalkoholu vyrábí firma QO Chemicals Inc. (USA, Austrálie, Belgie) [129], používají se například při výrobě plášťů kabelů a k výrobě elektroizolačních laků.

Tyto pryskyřice mohou být používané s kontinuálními vlákny SiC nebo čedičovými vlákny.

Kyanoestery

Kyanoestery (CE) mají velkou pevnost, minimální absorpci vlhkosti a výborné elektrické vlastnosti v porovnání s ostatními pryskyřicemi [18]. Houževnatost kyanoesteru se zvýší přidáním termoplastu nebo kaučuku. CE mají vynikající odolnost vůči vyšším teplotám, cca 200 °C, a malou permitivitu. Dále se mohou používat při vyšších frekvencích. CE s aramidem se často používají jako náhrada polytetrafluoretylenu (PTFE) [18]. Nevýhodou je jejich poměrně vysoká cena. Kyanoestery se používají v leteckém průmyslu, ve vojenském průmyslu, v námořnictví a v mikroelektronice (například pro desky tištěných obvodů). Americká firma Cytec Engineered Materials, Inc. [139] vyrábí kyanoestery CYCOM 5245 C, CYCOM 5575 - 2, které se používají například na kryty radarů.

Tyto pryskyřice mohou být používané s kontinuálními SiC, aramidovými, čedičovými a skleněnými vlákny.

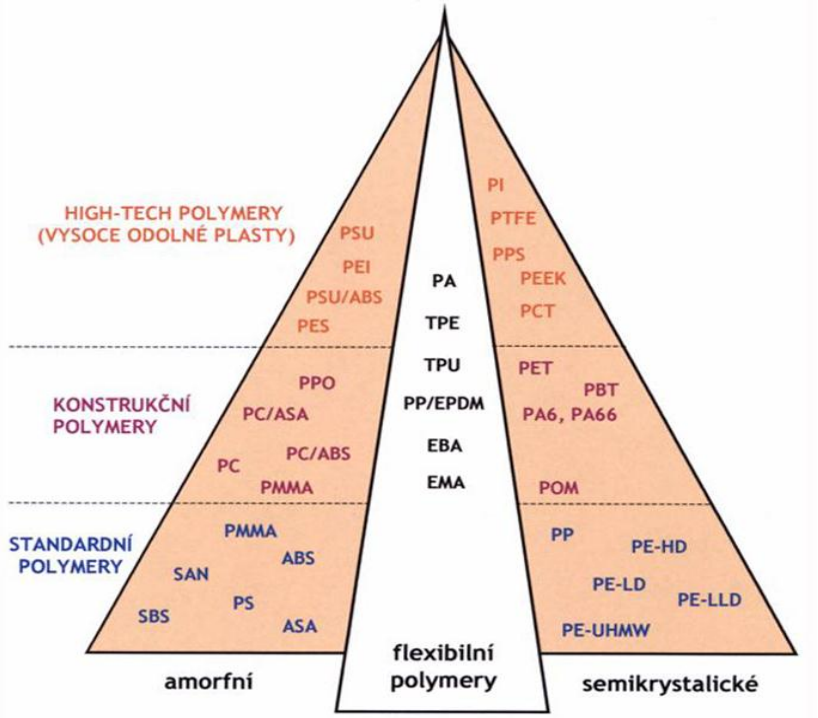
Termoplastické polymerní matrice

Termoplasty jsou polymerní materiály, které při zahřívání přecházejí do plastického stavu, kde je můžeme snadno tvářet a zpracovávat různými technologiemi. Do tuhého stavu přejdou ochlazením pod teplotu tání $T_{m,}$ což platí pro semikrystalické plasty, resp. teplotu viskózního toku $T_{f,}$ což platí pro amorfní plasty. Semikrystalické plasty můžeme efektivněji vyztužit pomocí uhlíkových vláken, protože jsou obklopena jemnou mikrokrystalickou strukturou a výsledkem bude vyšší modul pružnosti.

Hlavní výhody termoplastů jako matric kompozitů jsou [18]:

- neomezená skladovací doba prepregu
- výborná chemická odolnost, neabsorbují vlhkost, oproti nemodifikovaným reaktoplastům mají velmi dobrou houževnatost
- ochrana životního prostředí a recyklovatelnost materiálu kompozitních dílů vyráběných ve velkých sériích (například automobilový průmysl)
- produktivní výroba dílů tvarováním
- vysoká opravitelnost
- vysoká pevnost a odolnost proti nárazu
- příznivé chování ve vlhkém prostředí i za tepla, kdy se neuvolní toxické látky

Špičkové termoplasty, které jsou ve špičce "pyramidy" na obrázku 11, například polyaryletherketony (PEEK PEK, PEKK, PEKEKK), polymery s tekutými krystaly (LCP), polyfenylsulfon (PPSU), polyfenylensulfid (PPS), polysulfon (PSU) a polyamid 46 (PA 46), mají teplotní odolnost mnohem větší v porovnání s běžnými reaktoplasty a jsou nehořlavé.



Rozdělení polymerů dle aplikace a jejich nadmolekulární struktury

Obr. 12: Rozdělení polymerů [141]

Polyfenylensulfid (PPS) má hustotu ρ = 1,35 g/cm, pevnost v tahu 90 MPa [223]. PPS je těžko zápalný, samozhášivý, dobře se obrábí, má extrémně dlouhou použitelnost za vysokých teplot a dobré elektroizolační vlastnosti.

Polyaryletherketony (PEEK PEK, PEKK, PEKEKK) vyztužené 30% skelnými vlákny mají zvýšenou mechanická pevnost, vynikající rozměrovou stabilitu, velmi vysokou odolnost proti záření, vynikající odlnost proti opotřebení, dobrou obrobitelnost, vysokou rázovou houževnatost. PEEK GF30 má hustotu ρ = 1,9 g/cm, pevnost v tahu 156 MPa [223].

Polyamidy (PA) [3], které se vyztuží krátkými skleněnými vlákny, se používají na výrobu dílu automobilů (výfukové potrubí a olejové vany motorů kde nahrazují slitiny hliníku). Firma Toyota Motor Corp. na výrobu sběrné nádoby chladiče používá kompozit z krátkými skleněnými vlákny, který je vyztužen směsi PA6/10 a bio-polyamidu na bázi ricinového oleje.

Polypropylen (PP) má velmi dobrou chemickou a mechanickou odolnost. Používá se pro výrobu lan a provazů, pro izolaci elektrických kabelů v málo větraných prostředích (při hoření neprodukuje kouř) [228]. Úspěch PP plněného částicovým plnivem je v jeho extrémně výhodné kombinaci nizka cena - objem – výborné užitné vlastnosti. Nejrozšířenějšími plnivy pro PP jsou uhličitan vápenatý $CaCO_3$ nebo destičkové plnivo [279]. Plnivo omezující hoření je hydroxid hořečnatý $Mg(OH)_2$ [279]. Na vyztužení PP matrice mohou být použité skleněná vlákna.

Polytetrafluoretylen (PTFE) má charakteristické vlastnosti [231]:
- vynikající chemická odolnost
-výborná odolnost proti vysokým teplotám
- odolnost proti stárnutí
- dobré kluzné vlastnosti.

Polytetrafluoretylen má také výborné elektroizolační vlastnosti, které nezávisí na teplotě a frekvenci a patří mezi nejméně hořlavé plasty. Používá se k výrobě trubek, pístních kroužků, membrán, samomazných ložisek a k výrobě izolací pro dráty, kabely, které jsou vystavené vysoké teplotě.

Tyto pryskyřice mohou být používané se skleněnou tkaninou nebo skleným vláknem, čedičovým vláknem, kontinuálním uhlíkovým nebo aramidovým vláknem.

Firma Du Pont dodává polotovary (pod obchodním názvem TEPEX [144], které mají podobu termoplastických desek, kde v termoplastické matrici na bázi polyamidu (PA), polyaryletherketonu (PEEK PEK, PEKK, PEKEKK), polyfenylensulfidu (PPS), polysulfonu (PSU) jsou kontinuální uhlíková, skleněná nebo aramidová vlákna.

Elektroizolační vlastnosti vidíme v tabulce 2 a mechanické vlastnosti vybraných polymerních matric uvádí tabulka 3.

Tab. 2: Elektroizolační vlastnosti vybranych polymerních matric [3]

Matrice	**Matrice**	**Relativní permitivita εr (1 MHz)**	**Ztrátový činitel $tg\delta$ (1 MHz)**	**Vnitřní rezistivita ρv [Ω cm]**	**El. pevnost Ep [kV/mm]**
Reaktoplastove	**Silikonová**	**3,06**	**$9\cdot10^{-3}$**	**$1{,}85.\ 10^{11}$**	**31**
	Kapton (PI)	**3 – 3,5**	**$3\cdot10^{-3}$**	**$1{,}5\cdot10^{17}$**	**7,7**
	Polytetrafluorethylen (PTFE)	**3**	**10^{-2}**	**10^{13}**	**10**
	Polyamid (PA6/6)	**4 - 25**	**$2\cdot10^{-2}$**	**$\cdot10^{8}$ -10 ^{12}**	**30**
Termoplastové	**Polypropylen (PP)**	**2,3**	**$3{,}5\cdot10^{-4}$**	**$>10^{15}$**	**30-40**
	Polyfenylsulfid (PPS)	**3,3**	**$3\cdot10^{-3}$**	**$>10^{15}$**	**24**
	Polyetylén (PE)	**2,2 – 2,3**	**$6\cdot10^{-4}$**	**10^{15} - 10^{18}**	**45 - 60**
	Polystyren (PS)	**2,5**	**$60\cdot10^{-4}$**	**10^{16}**	**50**
	Polyuretan (PUR)	**3,3 – 3,6**	**$200\cdot10^{-4}$**	**10^{14}**	**20**
	Polyfenylennoxid (PPO)	**2,6**	**$7\cdot10^{-4}$**	**10^{15}**	**20**
	Polyvinylchlorid (PVC)	**3,4**	**$1000\cdot10^{-4}$**	**10^{11}**	**50**

Tab. 3: Mechanické vlastnosti vybranych polymerních matric [157]

Matrice	Matrice	Rm [MPa]	E [GPa]	A [%]	ρ [g.cm−3]
Reaktoplastove	Epoxidova	50-95	3,1	4,0	1,15
	Fenolicka	40-70	8,4	0,4	1,45
	Polyimidova	55-180	4,0	1-60	1,40
	Bismaleinimidová (BT)	45-90	4,0	1-25	1,30
Termoplastové	Polyamid (PA6/6)	97	3,0	30	1,18
	Polypropylen (PP)	24,8	1,1	200	0,91
	Polystyren (PS)	23-70	1,0-3,2	2-50	1,05

Biopryskyřice a biotermoplasty

Mezi klasickými polymery našly své uplatnění i biopryskyřice a biotermoplasty. Používáním bioproduktů můžeme řešit [18]:

- biodegradabilitu materiálů (vlastnost daného materiálu definující jeho kompletní biologickou rozložitelnost a výrobky z biodegradabilného materiálu nepodléhají degradaci, dokud se nedostanou do prostředí, které jim nevyhovuje, což je prostředí bohaté na vlhkost a mikroorganismy) [145]
- vysokou cenu ropy

Jsou známé deriváty na bázi oleje sóji (polyol [149]), kukuřice (ethanol [148]), řepky olejky (methylester [146]) a skočce obecného (ricinový olej). Výzkum biopryskyřic začal v roce 2005 na Ohio BioProducts Innovation Center při Ohio State University [150]. Olej ze sóji a ethanol z kukuřice byly využity k výrobě nenasycených polyesterových pryskyřic pro technologii SMC ("Sheet Molding Compound" - jde o lisovací technologii ve vytápěné ocelové dvoudílné formě [18]).

Firma Ashland Composite Polymers [152] komercionalizovala výrobu nenasycených polyesterů na bázi sójového oleje a ethanolu z kukuřice a vyrábí pryskyřici pod obchodním názvem ENVIREZ 1807 (obsahuje 13 % sójového oleje a 12 % ethanolu z kukuřice) [18]. Mechanické zkoušky potvrzují, že SMC kompozit, který obsahuje pryskyřici ENVIREZ 1807, má vlastnosti podobné kompozitu se standardní SMC pryskyřicí (nenasycené polyestery nebo vinylesterové pryskyřice).

Firma Ashland Composite Polymers využívá výrobku firmy Susterra Inc. (USA), která rafinací kukuřičného sirupu (glykolu) vyrábí 1,3 propandiol (PDO) [152].

Společnost Blair Co. (USA) vyrábí z kukuřičného škrobu nebo z cukrové třtiny také termoplast polylaktid (PLA).

Firma NEC Co. (Japonsko) v roce 2007 oznámila vývoj biomateriálu na bázi PLA, který vyztužila uhlíkovými vlákny.

Firma Solvay SA (Belgie) vybudovala ve Francii závod pro produkci epichlorhydrinu (chlorovaný epoxid [154]) z řepky olejky, který se použije pro výrobu epoxidů.

1.3.2 Kovové matrice

Kompozity s kovovou matricí jsou kovy, které jsou zpevněné jiným kovovým materiálem, například wolframová vlákna, ocel, nebo zpevňující výztuží mohou být keramické materiály, například vlákna z karbidu křemíku nebo whiskery z karbidu křemíku, whiskery z nitridu křemíku.

K charakteristickým vlastnostem kompozitu s kovovou matricí patří výrazně vysoká pevnost, vysoká mez únavy, vysoký modul pružnosti, vysoká houževnatost, vysoká žárupevnost a žáruvzdornost, elektrická vodivost, teplotní vodivost, odolnost vůči vlhkému prostředí, erozi a povrchovému poškození. Výhodou je i možnost slučovat v jednom výrobku vlastnosti, které můžou být i protichůdné, například otěruvzdornost s houževnatostí, vysokou pevnost v tahu s odolností proti korozi.

Z hlediska aplikace mohou být kovové kompozity rozdělené na:

- kompozity s velmi vysokými hodnotami mechanických vlastností, například pevnost, modul pružnosti, tvrdost za normálních i zvýšených teplot
- kompozity s vysokou žárupevností a žáruvzdorností a odolností proti tepelné únavě za vysokých nebo velmi vysokých teplot, například přes 1000 °C [4]
- kompozity se speciálními vlastnostmi, jako je odolnost proti opotřebení, speciální fyzikální vlastnosti, například elektrická vodivost

Matrice může být vytvářena z prášku (například plazmové nanášení), z fólie (například lisování za tepla a válcování), z taveniny (například infiltrace a lití). Výrobní postup musíme zvolit tak, aby došlo k dokonalému smíšení matrice s vlákny bez mechanického poškození vláken a bez jejich degradace a zkřehnutí matrice.

Podle charakteru kovové matrice rozlišujeme základní typy kompozitu:

- kompozity hliníku a jeho slitin
- kompozity hořčíku a jeho slitin
- kompozity titanu a jeho slitin

Kompozity hliníku a jeho slitin

Hliník (Al) patří k nejrozšířenějším kovovým matricím, jako kompozit dosahuje dvojnásobnou pevnost v tahu oproti základnímu materiálu. Kromě hliníku se používají jeho slitiny s mědí (Cu), titanem (Ti), vanadem (V) nebo křemíkem (Si). V mnoha literaturách se vlákna z karbidu křemíku uvádí jako nejslibnější a nejrozšířenější výztuž kompozitů hliníku. Whiskery SiC jsou vhodné k vyztužování matric na bázi slitin Al (například Al slitiny zpevněné SiC whiskery použijeme na výrobu pístu spalovacích motorů [18]). Také bórová vlákna se používají jako výztuž hliníkových slitin [157]. Na bórová vlákna je třeba nanést povlak z keramických materiálů, protože bór chemicky reaguje s kovem.

Kompozity hořčíku a jeho slitin

Hořčík (Mg) je lehčí než hliník, a je proto vhodný pro základní matrici kompozitu, neboť dobře smáčí výztuž. K základním přednostem kompozitu na bázi hořčíku a jeho slitin patří jejich poměrně vysoká měrná pevnost. Tyto kompozity se používají jako konstrukční materiály a vyznačují se kromě vysoké pevnosti také pružností. Zároveň mají nízkou měrnou hmotnost, což je předurčuje pro aplikace, kde je tato vlastnost nutná. Své uplatnění našly především v automobilovém průmyslu, například jako části motoru (hlava válců).

Jako výztuž kompozitu hořčíku a jeho slitin se používají vlákna z karbidu křemíku, bórová vlákna nebo částice (SiC).

Kompozity titanu a jeho slitin

Kompozity titanu poskytují možnost využití při vyšších teplotách, cca 900 °C až 1000 °C [4] v porovnání s hliníkovými kompozity, cca 300 °C až 400 °C [4], zejména s použitím vláken SiC, které prakticky neovlivňuje teplota. Whiskery SiC můžeme použít k vyztužování matric na bázi slitin titanu.

Tyto kompozity se používají v leteckém, vojenském a raketovém průmyslu, například jsou používané jako součásti turbokompresoru turbínových motorů. Mají zajistit zvýšení žárupevnosti při vyšších teplotách a dosažení vyšších hodnot pevnosti, modulu pružnosti a tuhosti za teplot normálních.

Faktory limitující širší použití kompozitů titanu a jeho slitin jsou:

- cena zpevňujících vláken
- drahý proces výroby
- komplikované druhotné zpracování
- obtížná recyklace

1.3.3 Keramické matrice

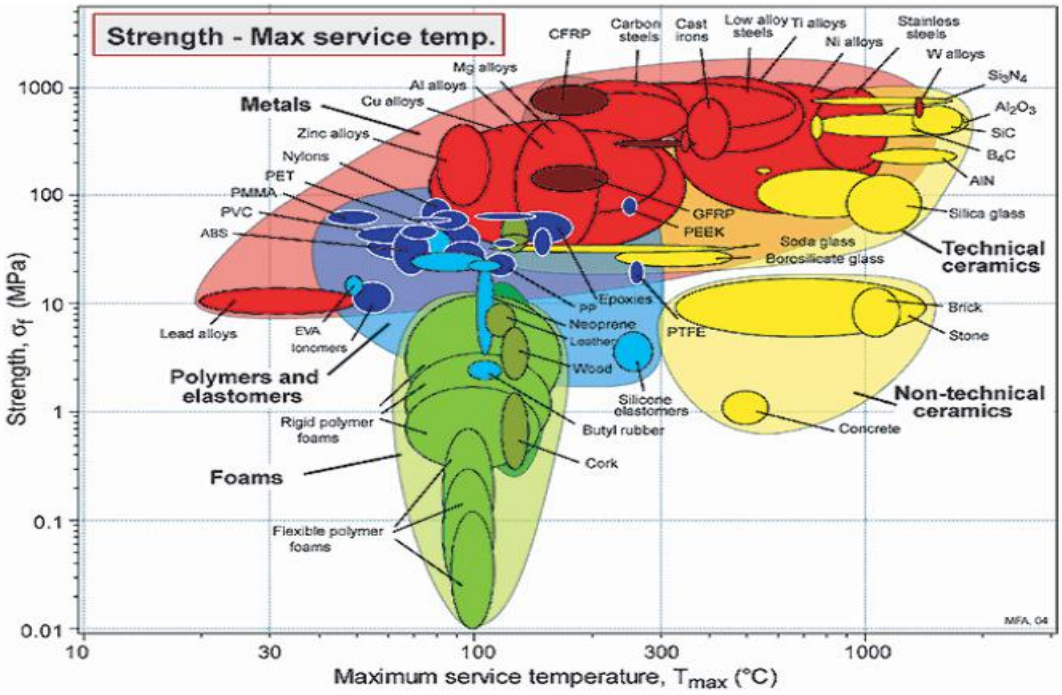
Pod pojmem keramika (krystalický materiál na bázi anorganických sloučenin nekovového charakteru) rozumíme čisté oxidy, nitridy, boridy a karbidy. Keramika je atraktivní materiál mající vysokou pevnost při vysokých teplotách, výbornou odolnost proti oxidaci a poměrně nízkou hustotu. Při vysoké pracovní teplotě (přes 1000 °C) má keramika SiC, Si_3N_4 a Al_2O_3 vysokou pevnost v tahu - cca 800 MPa, což vidíme na obrázku 13 [18]. Když se připraví kompozit s kontinuálními keramickými vlákny v keramické matrici, získáme materiál s větší lomovou houževnatostí v porovnání s monolitickou keramikou. Vyztužením dlouhými vlákny zvýšíme lomovou houževnatost z původních hodnot okolo 5 MPa na 30 MPa, ale je to nízká hodnota v porovnání s kovy [4]. Technické použití keramické matrice je omezeno křehkým chováním a malou hodnotou lomové houževnatosti. Tyto nežádoucí vlastnosti zlepšíme použitím vláken. Jako výztuž můžeme použít vlákna z karbidu křemíku, uhlíku, molybdenu (Mo), wolframu (W), kolumbiumu (Cb), oceli a safírové whiskery. Si_3N_4 a SiC vyztužené whiskery SiC poskytnou výbornou specifickou pevnost při působení vysokých teplot - cca 1400 °C – 2000 °C [4] po dlouhou dobu. Vyztužení wolframovými vlákny podstatně zvýší rázovou pevnost při stejných teplotách. Ještě lepší výsledky byly získány při použití vláken z tantalu (Ta).

Největší teplota využívání se liší podle druhu složek [9]:

- C vlákna a skelná keramika – 1300 °C
- SiC vlákna a křemík – 1410 °C (SiC oxiduje mezi 980 °C a 1150 °C, ale je stabilní mezi 1150 °C a 1410 °C)

Sklokeramické vláknové kompozity tvoří rohož z C nebo SiC zalitá do roztaveného skla (pevnost v tahu cca 1000 MPa). Mohou být použity na vzduchu s C vlákny do 600 °C, se SiC vlákny do cca 1000 °C [264].

Sklokeramika (Sitall nebo skloporcelán [264]). Matrice tvoří hlinitokřemičité sklo nebo fosforokřemičité sklo. V porovnání s čistým sklem má větší pevnost v tahu a ohybu.



Obr. 13: Pevnost v tahu různých materiálů při vysoké pracovní teplotě [18]

1.3.4. Uhlíkové matrice

Uhlík se vyskytuje jako volný prvek, například grafit, saze, uhlí, diamant a ve sloučeninách uhličitanů, například s Ca a Mg. Dále byly objeveny nové modifikace, například vlákna, fulerény, fulerity, fuleridy a karbyny [72].

Kompozit uhlík – uhlík je systém vytvořený uhlíkovým vláknem a uhlíkovou matricí.

Vyznačuje se mimořádnými vlastnostmi [4]:
- odolnost proti velmi vysokým teplotám
- odolnost proti ionizujícímu záření
- výborná odolnost proti teplotním šokům
- velmi dobrá pevnost i ve směru kolmém na vlákna (pevnost roste s teplotou)
- velmi dobrá chemická odolnost
- nízká hustota
- pseudoplasticita (postupné porušování vláken [163])
- biokompatibilita (snášenlivost materiálů v biologickém prostředí [163])

Nevýhodou kompozitního systémů uhlík – uhlík je malá odolnost proti oxidaci při teplotě cca 500 °C, a proto při teplotách nad 500 °C použijeme vhodná antioxidační aditiva (do struktury zabudována) nebo ochráníme povrch povlakem, například SiC [4].

2 Kompozitní materiály v elektrotechnice

Kompozitní materiály pro své vynikající mechanické, tepelné a výborné elektrické vlastnosti, jako velmi dobrá elektrická pevnost, vysoká vnitřní a povrchová rezistivita, odolnost elektrickému oblouku a plazivým proudům a klimatickým vlivům, našly své uplatnění v elektrotechnice. V elektrotechnice jsou využívány především v elektroizolačních systémech (EIS) elektrických strojů a přístrojů, na výrobu izolátorů a součástek, ve slaboproudé elektrotechnice se dále používají jako konstrukční prvky [197].

2. 1 Rozdělení kompozitních materiálů pro elektrotechniku

Z elektrotechnického hlediska byly kompozitní materiály rozděleny na dvousložkové a třísložkové [197].

Dvousložkové kompozitní materiály se používají jak v slaboproudé, tak i v silnoproudé elektrotechnice. V slaboproudých aplikacích jsou využívány jako konstrukční prvky pro desky plošných spojů. V silnoproudé elektrotechnice jsou kompozity využívané například jako plošné a profilové izolanty, kryty elektrických točivých strojů, podpěrné kruhy vinutí statorů, drážkové klíny, podklínové podložky nebo zhášecí komory vypínačů.

Dvousložkové kompozitní materiály můžeme rozdělit na vyztužené:
- papírem
- textilní tkaninou
- skelnou tkaninou

Dvousložkový kompozitní materiál vyztužený papírem. Laminát s obchodním názvem Kartit je vytvořený papírem a pryskyřicí jako pojivem. Na výrobu kartitů použijeme sulfátový papír nebo sulfátovou buničinu. Permitivita a ztrátový činitel (tg δ = 0,06 až 0,1 [6]) závisí na použité celulóze, rezistivita a elektrická pevnost (E_P = 8 kV·mm^{-1} až 10 kV·mm^{-1} [6]), závisí na obsahu nečistot (iontových) a vměstků (kovových). K impregnaci kartitů se ve většině případů používají fenolformaldehydové pryskyřice, které mají nízkou cenu. Dále můžeme použít i epoxidové pryskyřice. Celulózový papír k výrobě kartitu obsahuje cca 40 % až 55 % pryskyřice [219]. Teplotní třída tvrzených papírů je 120 (E) [6].

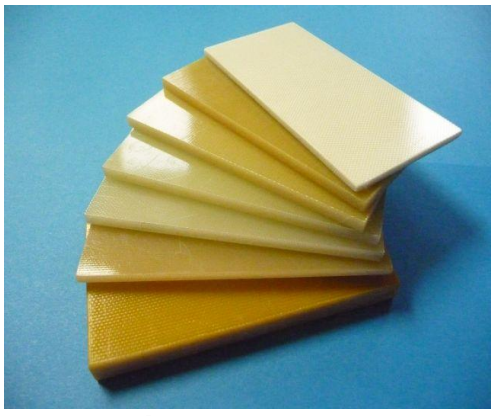
Kartit se používá při stavbě transformátorů například ve formě izolačních mezistěn, krytů nebo vložek, také se používá k výrobě izolačních táhel nebo dílců elektrických rozvaděčů. Na obrázku 14 jsou desky vyrobené z celulózového papíru jako výztuže a fenolformaldehydové pryskyřice jako pojiva. Tvrzené papíry se vyrábí v několika provedeních, mají označení K, E, KE, EV, T, S, SD [197].

Obr. 14: KARTIT Hp 2061 [207]

Dvousložkový kompozitní materiál vyztužený textilní tkaninou se vyrábí například pod obchodním značením Textit ve formě desky. Textilní tkanina (bavlna) je výztuž a epoxidová pryskyřice je pojivo. Prosycená textilní tkanina k výrobě textitů různých druhů obsahuje cca 45 % - 55 % pryskyřice [219]. Používá se například při výrobě elektricky namáhaných součástek, elektroizolačních desek, koster přístrojů, transformátorů nebo skříňových částí rozvoden a rozvaděčů. Textity z různých druhů bavlněných tkanin jsou vyráběny s označením H, J, SJUR, SK, E a mají různou tloušťku tkanin, širší výběr pryskyřic [197]. Textity z různých druhů viskózových tkanin jsou vyráběny s označením HV, JV [197]. Teplotní třída tvrzených textilních tkanin je 120 (E) [6]. Elektrické vlastnosti tvrzených tkanin jsou horší než u kartitů, například E_P = 4 kV·mm^{-1} až 5 kV·mm^{-1} [6].

Dvousložkový kompozitní materiál vyztužený textilní tkaninou se vyrábí například pod obchodním značením Sklotextit. Vyrábí se z upravené skelné tkaniny (výztuž) a epoxykrezolové pryskyřice (pojivo). Má velmi dobré mechanické a elektroizolační vlastnosti (ε_r = 4 – 5, E_P = 10 kV·mm^{-1} až 15 kV·mm^{-1}, tg δ = 0,05 [6]), vysokou klimatickou odolnost, proto se používá v elektrických zařízeních ve vysokých teplotách a ve vlhkém prostředí. Skelné lamináty dělíme podle druhu pojiva [197] – sklotextit RA (fenolická pryskyřice), sklotextit U (epoxidová pryskyřice), sklotextit RU (modifikovaná epoxidová pryskyřice), sklotextit SI (silikonová pryskyřice), sklotextit M (melaminová pryskyřice). K výrobě sklotextitu obsahuje skelná tkanina 30 % - 40 % pryskyřice [219].

a)



b)

Obr. 15 a) TEXTIT® – Hgw 2082.5 [208]
b) SKLOTEXTIT G11 – 155°C [209]

Na obrázku 15 a) jsou desky vyráběné pod obchodním názvem TEXTIT® – Hgw 2082.5 [208], vyrobené z bavlněné tkaniny jako výztuže a modifikované krezolformaldehydové pryskyřice jako pojiva. Mají výborné kluzní a mechanické vlastnosti, dobrou opracovatelnost, velmi dobrou elektrickou pevnost a elektrický odpor ve vlhkém prostředí.

Na obrázku 15 b) je materiál vyráběný pod obchodním názvem SKLOTEXTIT G11 – 155 °C [209], vyrobený ze skelné tkaniny, epoxidové pryskyřice a plniva. Vyznačuje se výbornými mechanickými a elektroizolačními vlastnostmi, které si zachovává i při zvýšených teplotách.

Tyto materiály mohou být použité na výrobu součástek pro elektrická zařízení při vyšších teplotách nebo ve vlhkém prostředí (elektroizolační součástky jako kostry, skříňové části rozvoden, transformátorů, rozvaděčů, elektrických strojů).

Třísložkové kompozitní materiály. Třísložkové kompozitní izolanty se používají hlavně jako izolační systémy elektrických točivých strojů. Dále se užívají k výrobě ohnivzdorných pásek, na ovíjení speciálních kabelů. Zůstávají funkční i po shoření plastového obalu. Se zvyšujícími se požadavky na zlepšení výkonu stroje musí být zachovány potřebné vlastnosti, a proto se používá třísložkový elektroizolační kompozit. Potřebujeme zlepšovat dielektrické, tepelné a chemické vlastnosti, odolnost proti ozonu, statickému a dynamickému namáhání

Třísložkový kompozit se skládá z:

- nosné složky, která určuje mechanické vlastnosti izolačního systému (bavlněná tkanina, polyetylenaftalátová (PEN) tkanina, polyetylentereftalátová (PET) tkanina, papír, polyesterové rouno, polyimidová fólie, skleněná tkanina)
- pojiva, které zajišťuje propojení všech složek kompozitního materiálu, závisí na něm výsledná tepelná třída izolačního systému (epoxidová, silikonová, polyesterová pryskyřice)
- dielektrické bariéry, která zabezpečuje velkou výslednou elektrickou pevnost daného kompozitu (slídový papír)

2.2 Kompozitní materiály v elektroizolačních systémech

Elektroizolační materiál má vykazovat co nejvyšší elektrickou pevnost, co nejvyšší rezistivitu, co nejnižší relativní permitivitu a velmi nízké dielektrické ztráty.

Na izolaci působí velká řada vlivů (klimatické či chemické) a různé druhy namáhaní, například tepelné, mechanické, elektromagnetické pole.

2.2.1 Teplotní klasifikace elektroizolačních materiálů

Pro bezporuchový provoz elektrických zařízení jsou velmi důležité podmínky, v nichž pracují, a jedním z významných faktorů je teplota (převládající činitel způsobující stárnutí izolace). Proces stárnutí izolačního materiálu je popsán jako souhrn chemických a fyzikálních procesů, které zhorší vlastnosti izolantů. Proto provozní teplota je základním měřítkem pro rozdělení izolantů a vzniku teplotních tříd. Teplotní třída je označení elektroizolačních materiálů (EIM)/elektroizolačních systémů (EIS), které se číselně rovnají maximální teplotě použití [6] (norma ČSN EN 60085). Tabulka 4 uvádí relativní index teplotní odolnosti (RTE). Relativní index teplotní odolnosti je číselná hodnota teploty, kterou má materiál po dobu svého života a přitom má

uspokojivé vlastnosti v porovnání se standardním materiálem. Teplotní třída EIS je výslednicí jednotlivých komponentů systému.

Tab. 4: Teplotní klasifikace izolantu [6]

Relativní index teplotní odolnosti (°C)	Teplotní třída (°C)	Předchozí označení
< 90	70	
> 90 – 105	90	Y
> 105 – 120	105	A
> 120 - 130	120	E
> 130 – 155	130	B
> 155 – 180	155	F
> 180 – 200	180	H
> 200 – 220	200	
> 220 – 250	220	
> 250	250	

2.2.2 Kompozity v elektroizolačních systémech točivých elektrických strojů

V izolačních systémech elektrických zařízení roste použití kompozitních materiálů. Izolační systémy točivých elektrických strojů dělíme podle pracovního napětí:

- nízkonapěťové
- vysokonapěťové

Vysokonapěťové izolační systémy točivých elektrických strojů [6] mohou být provedeny dvěma způsoby:

- systém Resin – Rich (systém pryskyřice – bohatý) v literatuře [6] nazývaný jako „již obsahující pryskyřici“
- systém VPI (angl. Vacuum Pressure Impregnation), což je technologie vakuově – tlaková impregnace

Obě techniky využívají izolační materiál, který je tvořen třísložkovým izolačním systémem.

Systém Resin – Rich. Výchozí izolační přeimpregnovaný materiál se dodává jako polotovar. Jeho zpracováním se na vodivé části vytvoří izolační trubka, která bude mít požadovanou tloušťku stěny. Potom takto připravenou část vinutí klademe přímo do drážek stroje. Po pospojování připravených částí vinutí a dohotovení čel může vinutí plnit svoji funkci.

Nosnou složku tvoří skleněná tkanina, která je tvořena stáčenými vlákny a má tloušťku cca 0,14 mm [6], nebo má vlákna srovnána do roviny, tloušťka cca 0,12 mm [6] (výhody: prostorová rezerva – úspora při výrobě stroje; ve stejném počtu ovinů máme stejné množství slídy při menší tloušťce daného materiálu; elektrická pevnost se

zvětší cca 7 % [6]; nižší dielektrické ztráty) dále skleněné vlákna mohou být zpravována jako whiskery. Můžeme použít i jiné materiály, jako jsou například aramidová vlákna nebo fólie, například polyetyléntereftalát (PET) nebo polyetylénnaftalát (PEN).

Dielektrickou bariérou je kalcinovaný slídový papír, který se vyrábí technologií podle francouzského inženýra Bardeta, je hutný, méně nasákavý s lepšími mechanickými vlastnostmi. Izolační bariéra může být tvořena i jiným materiálem, například Kaptonem, (polyimid, který vznikne bipolykondenzační reakcí aromatického dianhydridu a aromatického diaminu; výborná teplotní odolnost – 250 °C po dobu 8 let, 300 °C po dobu 3 měsíců, od -120 °C do + 350 °C krátkodobě [6]).

Jako pojivo se používají různé syntetické pryskyřice, například reaktoplastické bezrozpouštědlové novolakové nebo cykloalifatické epoxidové, polyuretanové, polyesterové či silikonové. Materiál je dodáván už částečně předtvrzen. Na základ vinutí se vytváří vrstva, která se určí podle pracovního napětí stroje. Vytvrzení probíhá při teplotách 160 °C až 170 °C [6] řádově hodinu (doba vytvrzení závisí na druhu pryskyřice a tloušťce izolační trubky). Průběh ochlazování je také velmi důležitý (rozdílné chladnutí jádra a izolační trubky).

Technologie Resin – Rich zaručují vysoký stupeň prosycení kompozitu pojivem, a tak je dosaženo nízkého množství mikronehomogenit (vzduchových bublinek) uvnitř izolačního systému, což značně omezí vnitřní výbojovou činnost, která způsobuje degradaci izolačního materiálu.

Systém VPI (Vacuum Pressure Impregnation) je systém, kde základním materiálem je slídová páska, která se prosytí impregnantem. Nosnou složkou může být skleněná tkanina, polyesterové rouno, popřípadě fólie, polyimidová fólie nebo fólie z polyetylenaftalátu. Impregnantem jsou bezrozpouštědlové epoxidové, silikonové nebo polyesterové pryskyřice (se 100% obsahem sušiny, krátkou vytvrzovací dobou, použití pro třídy 180 (H) a 200) [6]. Systém VPI je náročnější z hlediska technického vybavení a opravy jednotlivých dílů, ale neobsahuje nehomonity v porovnaní s Resin – Rich.

2.2.3 Kompozitní materiály v elektroizolačních systémech transformátoru

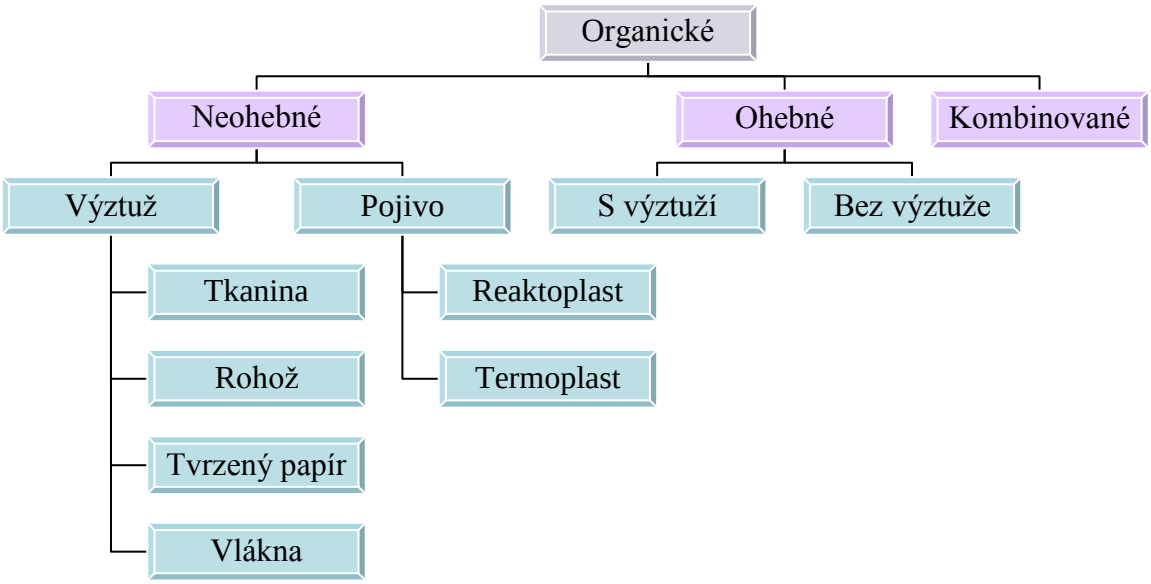
Transformátory můžeme podle provedení izolačních systémů rozdělit na suché, zalévané a spojení kapalných s tuhými izolanty. Zalévané stroje mají cívky zalité do pryskyřice nebo se může provést kompaktní izolace cívek technikou vakuově tlakové impregnace (VPI) nebo Resin - Rich. Obě techniky využívají izolační materiál, který je tvořen třísložkovým kompozitním systémem [6].

2. 3 Kompozitní materiály používané pro výrobu plošných spojů

Materiál desky plošných spojů, který zvolíme, je důležitý pro výslednou spolehlivost výrobku. Výrobek a celá deska plošných spojů je vždy vystavena působení okolních vlivů a podle nich volíme správný základní materiál desky plošných spojů. Tyto materiály jsou elektroizolační nosné podložky, které jsou tvořené dielektrickým materiálem nebo izolovaným kovovým jádrem [212] a slouží k montáži elektronických součástek a mechanických prvků. Neméně důležitým faktorem ve výrobě desek plošných spojů, a tím i při výběru vhodného materiálu pro substrát, bude cena. Obrázek 11 ukazuje dělení základních materiálů (mohou byt organické, anorganické).

Organické materiály se skládají z organických pryskyřic a výztuže (například skelná tkanina, celulózový papír) nebo jsou bez výztuže. Základní materiál můžeme

podle tuhosti rozdělit na neohebné materiály, které používají jako pojivo vysoce zesítěné polymerní řetězce (například epoxidy nebo fenolformaldehydové pryskyřice) a ohebné materiály, které používají jako pojivo termoplasty (materiály s dlouhými lineárními molekulami bez mezimolekulárních vazeb, což umožňuje velkým lineárním molekulám se po sobě pohybovat a materiál proto získá pružnost a odolnost vůči ohybové únavě). Pojivo, které použijeme na výrobu desek plošných spojů, musí mít dobré tepelné, chemické a mechanické charakteristiky. Nejpoužívanějšími reaktoplasty jsou epoxidové (EP), fenolformaldehydové (PF), polyimidové (PI), bismaleinimidové pryskyřice (BT), kyanoestery (CE). Nejpoužívanějšími termoplasty jsou polyeterimid (PEI), polyétersulfon (PES), lineární polyestery jako polyetyléntereftalát (PET) a polyetylénnaftalát (PEN), polyamidové pryskyřice (PA).



Obrázek 16: Dělení základních organických materiálů používaných pro výrobu DPS

Neohebné DPS

Materiály na bázi fenolformaldehydové pryskyřice

Výztuž - celulózový papír. Mezi plnivem (celulózový papír) a impregnantem (fenolformaldehydová pryskyřice) dojde při vytvrzení k chemické reakci, k zesítění a fixaci plniva. Obsah pryskyřice bývá obvykle 35 % - 58 % [211]. Tyto materiály jsou levné.

FR-2 – nehořlavý, používá se pro méně náročné aplikace, jednovrstvé DPS, dvouvrstvé DPS, dobře se vrtá i opracovává. Jeho nevýhodou je velká navlhavost, malá odolnost vůči elektrickému oblouku, horší mechanické vlastnosti, materiál s větším obsahem pryskyřice je křehký.

Materiály na bázi epoxidové pryskyřice:

- FR–3, který je tvořen papírem impregnovaným epoxidovou pryskyřicí. Obsahuje látky, které zpomalují hoření, má velmi dobré elektrické vlastnosti, snadno se opracovává, nahrazuje materiál FR – 2 (fenolformaldehydová pryskyřice + celulózový papír) v náročnějších podmínkách;
- G10 je tvořen skelnou tkaninou (výztuž) a epoxidovou pryskyřicí (pojivo), má dobré elektrické a mechanické vlastnosti

- G11 je tvořen skelnou tkaninou (výztuž) a modifikovaným epoxidem (pojivo); je nejkvalitnější, nejdražší materiál s vynikající tepelnou odolností, ale hůře se opracovává;

- FR-5 je modifikace materiálu G11, nehořlavý; má větší teplotní odolnost než FR-4, velmi dobrou mechanickou i chemickou stabilitu;

- FR-4 je nehořlavá varianta materiálu G10;

Reaktoplastický laminát Lamplex FR – 4 [199] obsahuje skelnou tkaninu s plátnovou vazbou (pro elektroizolační tkaniny se nejvíce využívá plátnová nebo keprová vazba). Jde o epoxidový laminát vyztužený skleněnou tkaninou. Pojivem je bromepoxidová pryskyřice s cca 20 % bromu, dále je užit UV blokátor (snižuje propustnost UV a pozitivně ovlivní elektroizolační vlastnosti). Dvousložkový kompozit Lamplex FR – 4 se také používá v oblasti výkonových elektrických zařízení, například jako plošné a profilové izolanty, drážkové klíny či kryty [199]. Dále se používá v měřící a regulační technice.

Materiály na bázi polyimidu

Základem je skleněná tkanina, která je impregnovaná polyimidovou pryskyřicí. Tyto materiály snášejí vysokou teplotu - cca 290 °C, mají problémy s přilnavostí měděné fólie, mají vyšší cenu než epoxidové lamináty, vyšší navlhlost, konstantní mechanické vlastnosti v teplotním rozsahu 150 ° C [212].

Materiály na bázi polytetrafluoretylenu

Základem je skleněná tkanina nebo skleněné vlákno, materiály mají vynikající elektrické vlastnosti, například rel. permitivita $\varepsilon_r \cong 2{,}3$, malou nasákavost, odolnost vůči vyšším teplotám, můžeme je používat na vysokých kmitočtech - cca 10 GHz [211].

Materiály na bázi bismaleinimidové pryskyřice

Výztuží ve většině případů je skelná tkanina nebo skleněné vlákno. Mají vynikající elektrické a dielektrické vlastnosti, jsou odolné vůči teplotám nad 200 ° C a používáme je při vyšších frekvencích [212].

Materiály na bázi kyanátesterové pryskyřice

Mají vynikající elektrické a dielektrické vlastnosti. Základem je aramidová výztuž, která je vhodná pro zhotovování otvorů plazmou nebo laserem i u vícevrstvých DPS. Jsou odolné vůči teplotám nad 200° C a můžeme je používat při vyšších frekvencích [212].

Materiály na bázi polyesterové pryskyřice

- GPO kompozity (výztuží je skelná rohož, impregnantem je polyesterová pryskyřice)

- FR-6 (skelná rohož tvoří výztuž a polyesterová pryskyřice v samozhášivém provedení je impregnantem)

Materiály s polyesterovou pryskyřicí mají konstantní dielektrické vlastnosti, hlavně v oblasti vysokých frekvencí [220].

Vlastnosti některých materiálů používaných na výrobu DPS uvádí tabulka 5.

Tabulka 5: Vlastnosti některých materiálů používaných na výrobu DPS

Materiál na výrobu DPS	Povrchový izolační odpor (Ω)	Vnitřní izolační odpor (Ω·cm)	Permitivita (1 MHz)	Ztrátový činitel (1 MHz)
FR - 2	**$1 \cdot 10^{10}$**	**$2 \cdot 10^{12}$**	**4,7**	**0,047**
FR - 3	**$3 \cdot 10^{11}$**	**$4 \cdot 10^{12}$**	**4,9**	**0,041**
FR - 4	**$4 \cdot 10^{12}$**	**$8 \cdot 10^{14}$**	**4,7**	**0,019**
na bázi (BT)	**$3{,}6 \cdot 10^{14}$**	**$5{,}8 \cdot 10^{-3}$**	**3,5**	**0,013**
na bázi (PI)	**$5{,}5 \cdot 10^{15}$**	**$4{,}5 \cdot 10^{14}$**	**4,3**	**0,009**

2.4 Kompozitní materiály používané pro výrobu izolátoru

Ve většině případů pro výrobu izolátoru používáme kompozit, kde výztuž tvoří orientovaná skleněná vlákna propojená reaktoplastickou pryskyřicí (polyester, epoxid) - matrice.

Výhody kompozitních izolátorů proti keramickým [233]:

- velmi dobrá odolnost proti mechanickým rázům (proti vandalismu)
- nízká hmotnost (cca 10 % hmotnosti keramického izolátoru - snadnější montáž a manipulace při dopravě)
- vysoká odolnost ve znečištěných a slaných prostředích (na kompozit je nanesen plášť ze silikonu)

3 Vývojové trendy v oblasti kompozitních materiálů

Kompozitní materiály jsou často označovány jako materiály budoucnosti. Vývoj, význam a spotřeba kompozitních materiálů stále roste.

3.1 Nanokompozitní materiály

V současné době se v řadě disciplín, výrobních technologií a výzkumů objevuje často předpona nano- (rozměry v řádu jednotek nebo desítek nanometrů). Výzkum nanokompozitu patří k rychle se rozvíjející oblasti v posledním dvacetiletí. U nanokompozitů můžeme sledovat určité vlastnosti, které se liší od běžně používaných materiálů. Molekulový pohyb je zde omezen silnou vazbou mezi nanoplnivem a základem. Při nano- rozměrech dochází k velkým změnám vlastností proto, že hlavní roli nehrají samotné makroskopické materiály, ale nejdůležitejším faktorem je fázové rozhraní.

3.1.1 Historie nanomateriálů

První pokusy o výrobu nanovlákna byly zaznamenány v letech 1934 až 1944 německým výzkumníkem Formalasem. Ve svých patentech popisuje experimentální instalaci pro výrobu polymerových vláken při použití elektrostatické síly.

V roce 1952 umí Vonnegut a Neubauer vyrobit proud vysoce elektrifikovaných uniformních kapiček a o tři roky později vyzkoumal Drozin rozptylování řad tekutin do aerosolů při vysokém elektrickém potenciálu.

Další krok učinil v roce 1966 Simon - patentuje přístroj na výrobu ultratenkých a ultralehkých nanovlákenných tkanin, které mají různé vzorky (při použití elektrického zvlákňování). Simon zjistil, že vlákna z nízkoviskózních roztoků mají tendenci se zkracovat a zjemňovat, ale vlákna z vysoceviskózních roztoků byla poměrně stále spojitá.

V roce 1971 Baumgarten zhotovuje přístroj k elektrozvlákňování akrylických vláken s nanoprůměrem. Zvlákňovaná kapka se uvolňovala z kapilárové trubky (z nerezové oceli) a její stálá velikost byla udržována úpravou rychlosti, která se přiváděla infuzní pumpou. Kapilárová trubka se spojila s elektrodou (vysoké napětí) a vlákna byla zachycována na uzemněné kovové cloně.

V roce 1980 byl vyroben snímací tunelový mikroskop, který uměl zhotovovat snímky jednotlivých atomů na povrchu materiálu a na trhu byly první výrobky z nanovláken.

V roce 1991 objevil profesor Sumio Iijima (Japonsko) uhlíkové nanotrubice.

V roce 2003 byl sestaven první nejmenší tranzistor na světě (tvořen z jednoho atomu fosforu). Testy ukázaly, že atom fosforu může velmi dobře působit jako klasický tranzistor používaný v elektrotechnice, nebo může být použit jako přepínač a zesilovač elektrických signálů [173].

V roce 2004 byla vyrobena žárovka s vláknem z uhlíkových nanotrubic a měla lepší účinnost a životnost.

Dnes se výrobou nanovláken zabývají firmy Reneker a Chun a Larronda a Manley a také se tento experimentální výzkum provádí na univerzitách, například v Cambridge v Anglii.

Na tyto badatele a na jejich následníky navázal výzkumnou činnost tým profesora Oldřicha Jirsáka z Technické univerzity v Liberci. V roce 2005 začala liberecká firma Elmarco s výrobou a prodejem zařízení Nanospider.

3.1.2 Výrobní technologie nanokompozitů

I když první výrobky nanovláken přišly na trh v 80. letech minulého století, vývoj technologie je ještě v počátečním stadiu.

Dnes je nanotechnologie tvořena z [169]:

- mikroskopů, které pracují s rozlišitelností v nanometrech
- nanoelektroniky, která nahrazuje stávající elektronické obvody
- molekulární nanotechnologie, která vychází z poznatků mechaniky a chemie (například vývoj nanomotorků)
- nanomateriálů

Malé množství (jednotky hmotnostních procent) nanoplniva ovlivní výsledné vlastnosti kompozitního materiálu. Nejčastěji se zkoumají nanokompozity na bázi epoxidové pryskyřice, polyamidu a nanoplniv, například jíly, křemičitany a oxidy kovů. K přípravě polymerních nanokompozitů se používají plniva, většinou anorganická, u kterých mají částice dispergované v matrici polymeru (alespoň jeden rozměr) velikost v nanometrech. To umožní velmi blízké spojení plniva a matrice. Interakce mezi částicí a molekulou vytvoří na povrchu dané částice spojenou oblast, která znemožní pohyb určité části polymerní matrice.

Při výrobě nanokompozitních materiálů je důležité vzájemné působení mezi výztuží (nanočásticemi) a matricí, dále jsou důležité fyzické a chemické vlastnosti jejich povrchů, obsah nečistot nebo příměsí a musíme prozkoumat změny jejich mechanických a tepelných vlastností.

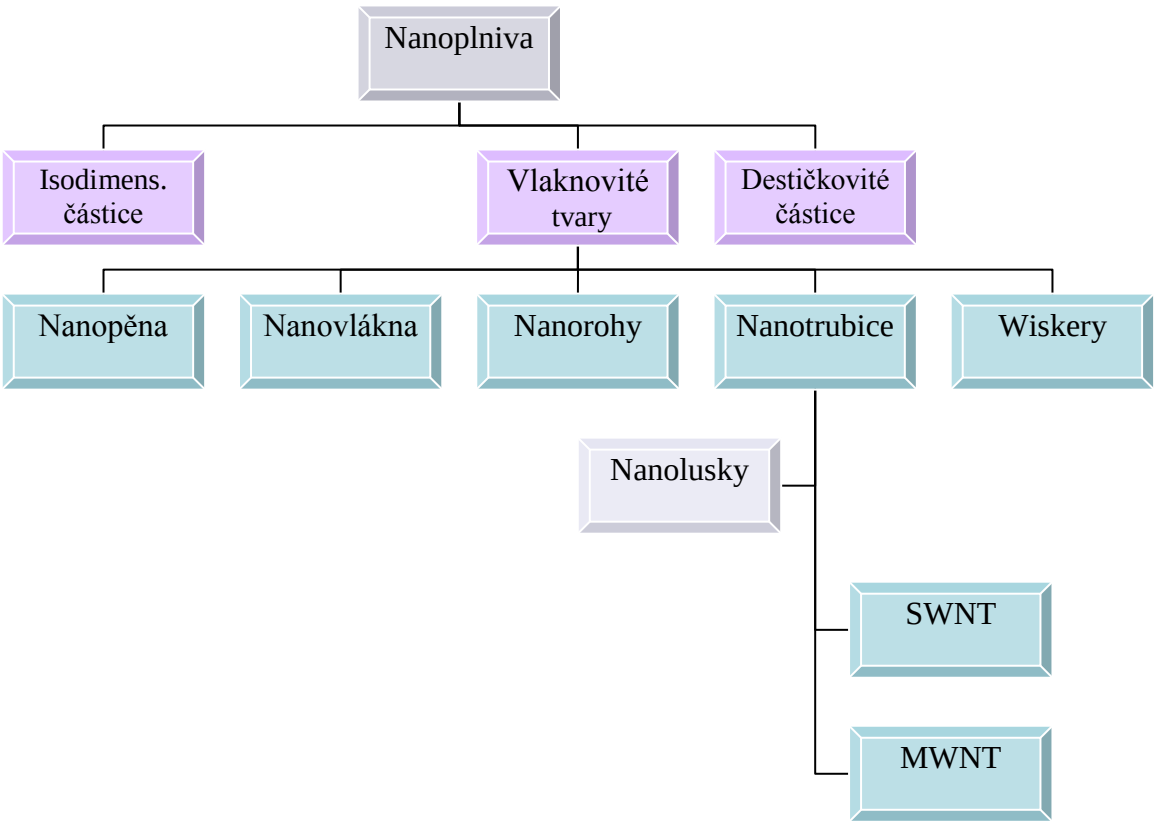
3.1.3 Tvary nanomateriálu

Využívání struktury a vlastností nanočástic, nanovláken, nanotrubic v materiálech je převratnou, moderní technologií, která se využívá v mnoha oborech a oblastech lidské činnosti. Vlastnosti nanovláken značně ovlivní materiál, ze kterého jsou vyrobena. V současnosti můžeme získat nanovlákna z několika desítek polymerů včetně biokompatibilních nebo biodegradabilních polymerů, které jsou šetrné k životnímu prostředí. Velká pozornost je proto věnována polymerním materiálům. Nanoplniva mají důležitou roli při zlepšení elektrických vlastností, tepelné vodivosti, tepelné odolnosti a koeficientu tepelné roztažnosti.

Podle tvaru můžeme plniva rozdělit na [182]:

- isodimensionální částice (například pyrogenní SiO2)
- vlákna (například whiskery, uhlíkaté nanotrubice)
- destičkovité částice (například grafit, vrstevnaté silikáty) tloušťku jedné vrstvy mají cca 1 nm a příčné délky těchto vrstev jsou od 30 nm do několika mikrometrů (v literatuře nanokompozitů je jíl častým synonymem pro vrstevnatý silikát), nejčastěji používaným plnivem je vrstevnatý jíl, minerál montmorilonit (MMT), složený hlinitokřemičitan je součástí bentonitu (bentonit je hornina, která vznikne zvětráváním třetihorní horniny z čediče, má vysoký obsah jílových nerostů). [30]

Na obrázku 17 vidíme rozdělení nanokompozitních plniv podle tvaru.



Obr. 17: Rozdělení nanokompozitních plniv podle tvaru

Nanovlákna

Nanovlákna se zpracovávají jen ve formě netkaných textilií (vrstvy z náhodně uložených vláken).

Mezi hlavní výhody nanovlákna patří to, že má:
- tisícinásobně větší povrchovou plochu v porovnání s mikrovláknem
- vysokou pórovitost a malou velikost pórů
- malý průměr vláken (nm)
- vynikající tuhost
- velmi dobrou houževnatost
- vysokou propustnost

Když se vyřeší výrobně technické problémy, bude možné použít nanovlákna v mnoha oborech, například podstatně se zlepší vlastnosti u kompozitů, v kapalinové filtraci, v oblasti vzdušné filtrace (odstraňují velmi efektivně submikronové částice včetně virů a bakterií), při ochraně životního prostředí nebo u ochranných oděvů, dále se počítá například s výrobou solárních plachet, které poslouží k pohonu vesmírných plavidel. Nanovlákna nabízí možnost pro získání výrobku, který bude mít nové vlastnosti, umožňují modifikaci nebo funkcionalizaci (určení vlastností, připojení funkčních skupin k povrchu [174]) nanovlákenné vrstvy. Funkcionalizací můžeme zlepšit povrchové vlastnosti a získat například vodoodpudivé (superhydrofobní) nebo nasákavé (superhydrofilní) materiály.

Technická univerzita v Liberci našla další využití nanovláken - chce je začít používat jako zvukovou izolaci. Nový materiál bude použit při pohlcování zvuků

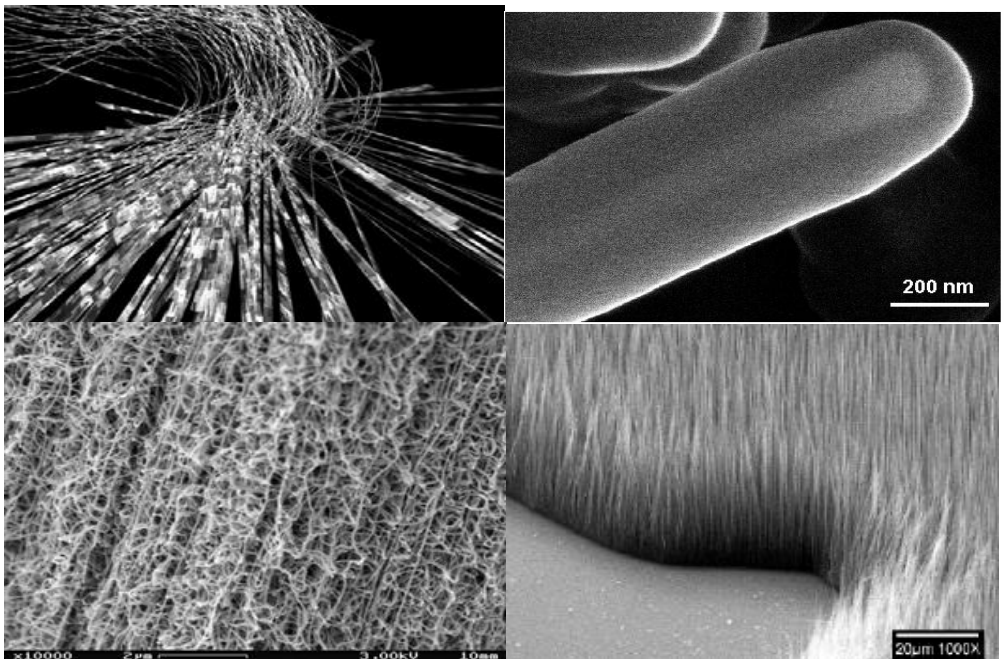
nízkých frekvencí pod tisíc hertzů a měl by být velmi univerzální ve svém použití od letectví po stavebnictví [172].

Nanotrubice

Nanotrubice můžeme považovat za protažené fullereny (sférické struktury tvořené atomy uhlíku cca 0,7 nm, nejdůležitější z fulerenů - C_{60}, C_{50} a C_{70} obsahují 60, 50, 70 atomů uhlíku) [274]. Nanotrubice mají výjimečnou mechanickou pevnost, tepelnou a elektrickou vodivost, patří mezi nejmodernější uhlíkové materiály a jsou nejvíce zkoumány [180]. Na obrázku 18 jsou snímky nanotrubic v různém zvětšení.

V oblasti nanotechnologií a nanomateriálů se musím zmínit o zcela revoluční formě uhlíku – grafenu [274] (síť z vrstvy atomů uhlíku uspořádaných do tvaru šestiúhelníků), což je nejtenčí a nejpevnější známý materiál, má unikátní vlastnosti, které ho předurčují k výrobě nových tranzistorů, mikroprocesorů, pamětí, displejů. Protože grafen je průhledný a dobře vodivý, můžeme ho použít při výrobě průhledných dotykových obrazovek nebo solárních článků.

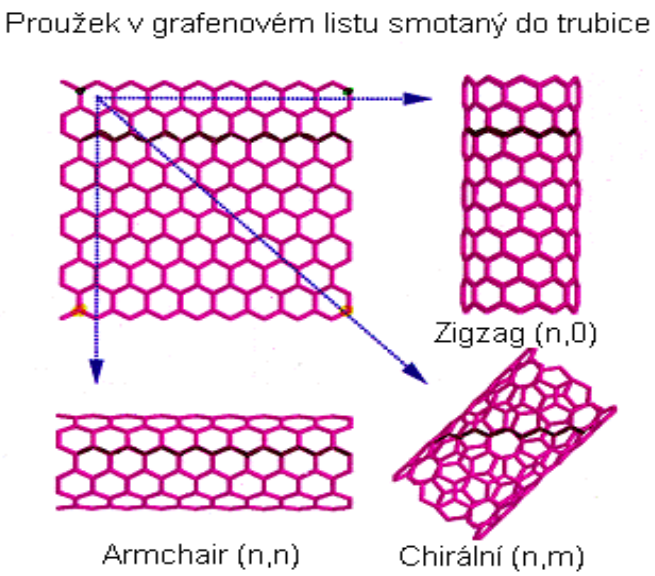
Nanotrubice mohou být použité jako výztuž nanokompozitu, protože mají výbornou odolnost vůči namáhání v tahu, vynikající mechanické vlastnosti - například modul pružnosti 1000 GPa a pevnost v tahu (se předpokládá) až 200 GPa [179].



Obr. 18: Nanotrubice v různém zvětšení (SEM – Scanning Electron Microscope) [175]

Nanotrubice podle druhu srolování rozlišujeme [179]:
- armchair
- zigzag
- chirální

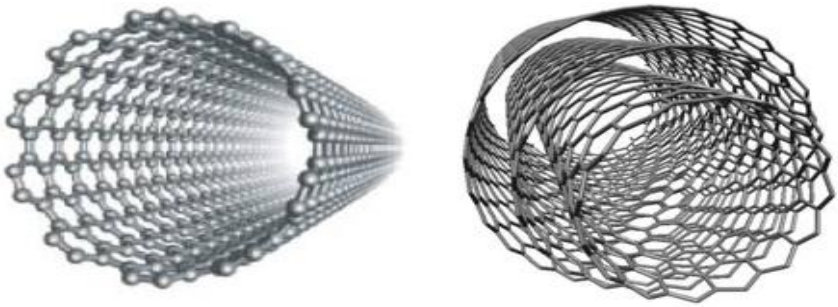
Na obrázku 19 je ukázáno srolování grafenového listu do uhlíkové nanotrubice a tři konfigurace.



Obr. 19: Příklad konfigurací nanotrubic [179]

Na univerzitě v Cambridge v Anglii byly laboratorně vyrobeny (katalytickým rozkladem plynů) uhlíkové nanotrubičky s jednoduchou stěnou (obrázek 20 a) - zkratka SWNT, angl. Single-walled Nanotube) s modulem pružnosti 1000 GPa - 5000 GPa a s tažnou pevností 13 GPa - 53 GPa, s vícenásobnou stěnou (obrázek 20 b) - zkratka MWNT – angl. Multi-walled Nanotube) s modulem pružnosti 800 GPa - 900 GPa a s tažnou pevností 10 GPa - 150 GPa [179]. Průměr nanotrubičky s jednoduchou stěnou se pohybuje cca 0,6 nm až 2 nm, u nanotrubic s vícenásobnou stěnou je nejmenší vnitřní průměr cca 0,4 nm a vnější až několik stovek nm (typicky cca 2 nm a menší jak 100 nm) [179]. Vzdálenost mezi jednotlivými stěnami v mnohostěnné nanotrubičce se mění od 0,34 do 0,38 nm, ale se vzrůstajícím průměrem se vzdálenost mezi stěnami zmenšuje [179].

Proud při měření vodivosti s kontakty na okrajích mnohostěnných nanotrubic je veden pouze vnější povrchovou nanotrubicí. Šířka zakázaného pásu (u MWCNT - 0 eV, u SWCNT - struktura vodivá se zakázaným pásem 0 eV nebo polovodivá se zakázaným pásem 0,4 eV - 0,9 eV) závisí na uspořádání šestiúhelníků vůči ose nanotrubice [179].



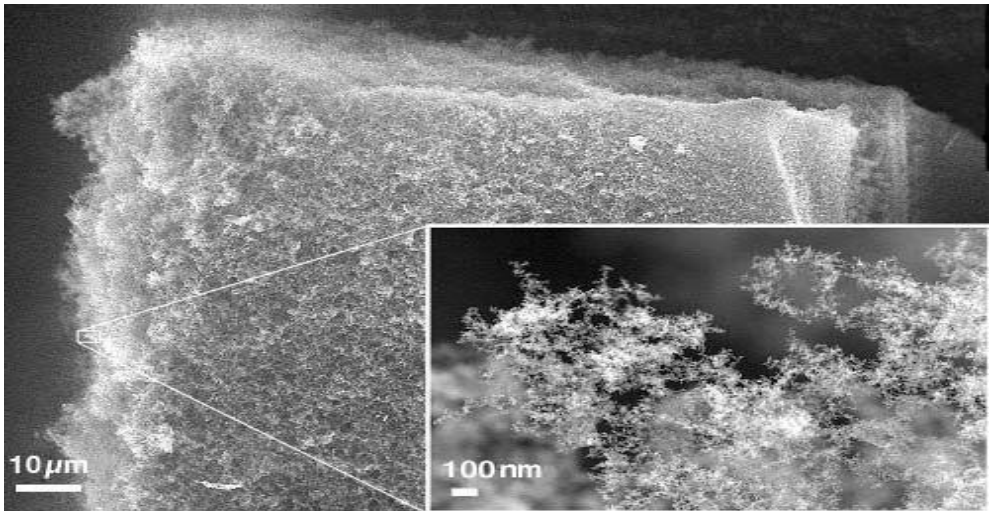
a) b)

Obr. 20: Dělení uhlíkových nanotrubic podle počtu stěn [179]
a) jednostěnné
b) mnohostěnné

Dnes se zkoumá možnost umístění cizího atomů dovnitř nanotrubice. Nanotrubice vykazují elektrickou vodivost, a proto se mohou použít jako miniaturní vodiče. Vzhledem k tomu se předpokládá využití nanotrubic v elektronice nebo jako základního materiálu pro nanotechnologie a mikrotechnologie. Dále mohou být nanotrubice použité jako materiál pro výrobu extrémně pevných uhlíkových vláken [160]. Uhlíkové nanotrubice byly například použité při výrobě mimořádně pevných a lehkých spojovacích součástí (kde nanotrubice jsou libovolně rozptýleny v hliníkové matrici), nebo výrobě vodivých inkoustů pro výrobu elektroniky [160].

Uhlíková nanopěna

Uhlíková nanopěna je další poznanou formou uhlíku. Jedná se o pospojovanou síť uhlíkových nanotrubiček dlouhých cca 5 nm [160]. Vzájemně pospojovaná síť je připravena vystavením uhlíkového terčíku (v argonové atmosféře) k působení vysoce výkonného pulzního laserového systému. Připravil ji kolektiv fyziků z australské národní laboratoře v Canbeře [176]. Struktura nanopěny je na obrázku 21. Uhlíková nanopěna je materiál vykazující paramagnetické chování (ostatní jsou diamagnetické). Mezi navrhované oblasti použití zatím patří především medicína. [160]



Obr. 21: Uhlíková nanopěna (SEM) [160]

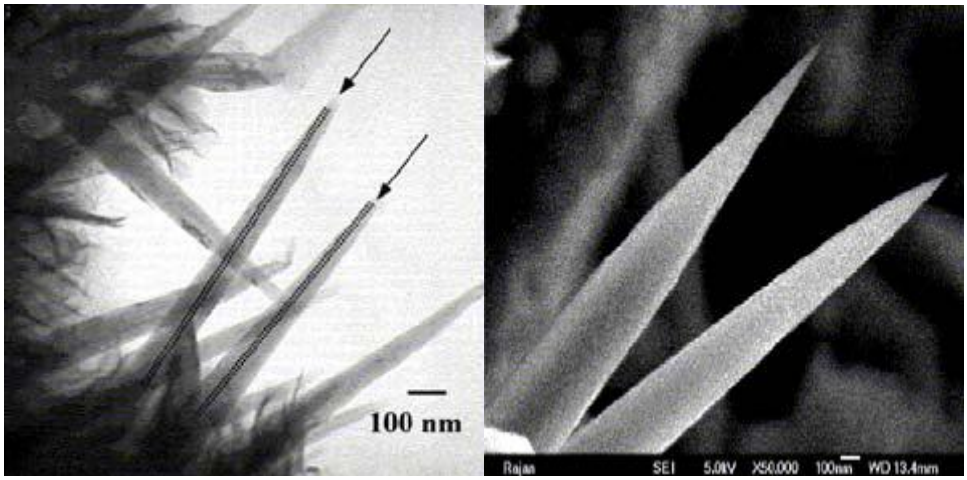
Nanorohy a nanolusky

Objemová výroba nanorohů zkráceně SWCNH (angl. „Single-Walled Carbon NanoHorns“) vychází z katalytického rozkladu plynů [160] obsahujících vhodně vázaný uhlík na podložkách (katalyzátory obsahují například Ni, Fe). Ale při velmi rychlém katalytickém růstu vzniknou útvary ve tvaru nanorohů, což vidíme na obrázku 22.

Nanorohy mohou být používané jako výztuž kompozitů. Proto se studují vlastnosti jednoduchých uhlíkových nanorohů a mnohovrstevných uhlíkových nanotrubiček mixovaných s terpolymerem (kopolymer skládající se ze tří různých monomerů [280]). Studie ukázaly, že tyto uhlíkové nanomateriály podporují adhezi v daném kompozitu [281].

Metodou laserového rozrušování se podařilo vytvořit uhlíkové nanolusky.

Uhlíkové nanolusky jsou nanotrubice, které v sobě obsahují fullereny a jsou důležitým materiálem v oblasti supravodivosti při pokojové teplotě.



Obr. 22: Nanorohy v různém zvětšení (SEM) [175]

Whisker

Whiskery jsou monokrystaly ve tvaru krátkých vláken a při malém průměru (cca <1 μm) mají vysoký štíhlostní poměr [18]. Pro whiskery je charakteristická velká pevnost způsobená minimem mřížkových poruch. Whiskery mohou být:

- kovové nebo sloučeniny kovů
- keramické, například nitridy Si_3N_4, oxidy Al_2O_3, karbidy SiC
- uhlíkové

Uhlíkové whiskery GCN (angl. Grown Carbon Nanoparticles) mají průměr cca 1μm a pevnost v tahu cca 20 000 MPa [18]. Jsou dvě metody výroby uhlíkových whiskerů GCN z plynných sloučenin za působení kovových katalytátorů a bez kovů:

- ve vznosu za přítomnosti organokovových sloučenin - $Fe(CO)_5$, $(C_5H_5)_2Fe$, $(C_5H_5)_2Ni$, $Ni(CO)_5$, $Co_2(CO)_8$
- na křemíkové nebo hliníkové podložce - uhlovodíky C_2H_2, C_2H_4, CH_4

Vysoce čistý uhlík GCN se využívá například pro elektrody baterií nebo ve zdravotnictví. Whiskery malého průměru jsou dobře ohebné a velmi pevné, proto se smykovými silami v matrici neporušují - v porovnání s krátkými skleněnými nebo uhlíkovými vlákny. Vdechnuté whiskery mají karcinogenní účinek podobný jako u úlomků vláken azbestů.

Největší význam pro keramické matrice (SiC, Al_2O_3, Si_3N_4) mají whiskery keramické, například SiC a Si_3N_4. Whiskery mohou být použité i pro zpevnění polymerních matric vyztužených kontinuálními vlákny. U laminátů zvýší mezilaminární pevnost [18].

3. 2 Smart materiály

Vývoj techniky v posledních desetiletích přinesl nové požadavky – na přesnost, rychlost a reprodukovatelnost mechanických pohybů. Proto roste zájem o smart (nazývané také inteligentní nebo chytré) materiály díky své jedinečné schopnosti výrazně a zejména vratně měnit jednu nebo více vlastností, například vodivost,

viskozitu, tvar, barvu, za působení vnějších podmínek (teplo, světlo, pH, mechanické napětí, elektrické pole).

3.2.1 Charakteristika smart materiálů

Citlivost smart materiálů na konkrétní vnější podmínky určuje způsob jejich použití. Smart materiály umožňují řadu aplikací žádaných z hlediska úspor energie, automatizace a elektronizace různých průmyslových zařízení [238].

Elektro - reologické materiály se vyskytují v kapalné podobě, zejména v podobě olejových suspenzí s obsahem dielektrických a polovodičových částeček cca 0,04 μm – 50 μm [241]. Při vystavení elektrickému poli mění tyto materiály své reologické vlastnosti, například viskozitu.

Magneto - reologické materiály mají vlastnosti analogické vlastnostem elektro -reologických materiálů. Ale řídící veličinou je v tomto případě magnetické pole a částice jsou kovové, cca 3 μm – 5 μm [241].

Materiály s tvarovou pamětí [250], [251]. Kovové materiály s tvarovou pamětí - SMA (angl. Shape memory alloy) patří do skupiny intermetalik (sloučeniny dvou a více kovů se vzájemnou uspořádanou krystalickou strukturou a vymezeným poměrem kovů). Nejrozšířenější slitiny s tvarovou pamětí NiTi jsou známé pod obchodním názvem Nitinol, můžou byt binární nebo s příměsí třetího prvku (například Cu, Hf, Nb, Pd). Dále známé SMA slitiny AuCd, CuZnAl, CuAlNi a v současné době ve vývoji slitiny FePd, TiPd, NiMnGa, CoNiA. Tvarovou pamětí se rovněž vyznačují některé polymery – SMP (angl. Shape memory polymers). Roste zájem o kompozitní materiály složené z obojího, nazývané hybridy s tvarovou pamětí (SMH).

Elektroaktivní polymery – EAP (angl. Electroactive Polymers) jsou látky s řádově 10x větší vodivostí v porovnání s klasickými polymery a mají 3-5x nižší vodivost v porovnání s kovy [241]. Používají se dva druhy EAP materiálů - iontové EAP, které obsahují iontové polymery s kovy, vodivé polymery s uhlíkovou nanotrubičkou a elektronické EAP, které obsahují feroelektrické, elektretové, piezoelektrické, dielektrické nebo elektrostriktivní polymery.

Piezoelektrické materiály mají vysokou mechanickou životnost, dobrou odolnost vůči vlivům okolního prostředí, relativně vysokou účinnost přeměny elektrické energie na mechanickou, cca 50 % [241].

Pyroelektrické materiály. Podobně jako mechanickým tlakem můžeme deformovat krystalickou mřížku dielektrik také změnou teploty a tento jev je nazýván jevem pyroelektrickým (změnou teploty se vytváří dipólový moment). K tomuto jevu existuje obrácený jev, který spočívá ve změně teploty krystalu vloženého do elektrického pole – jev elektrokalorický [238]**.**

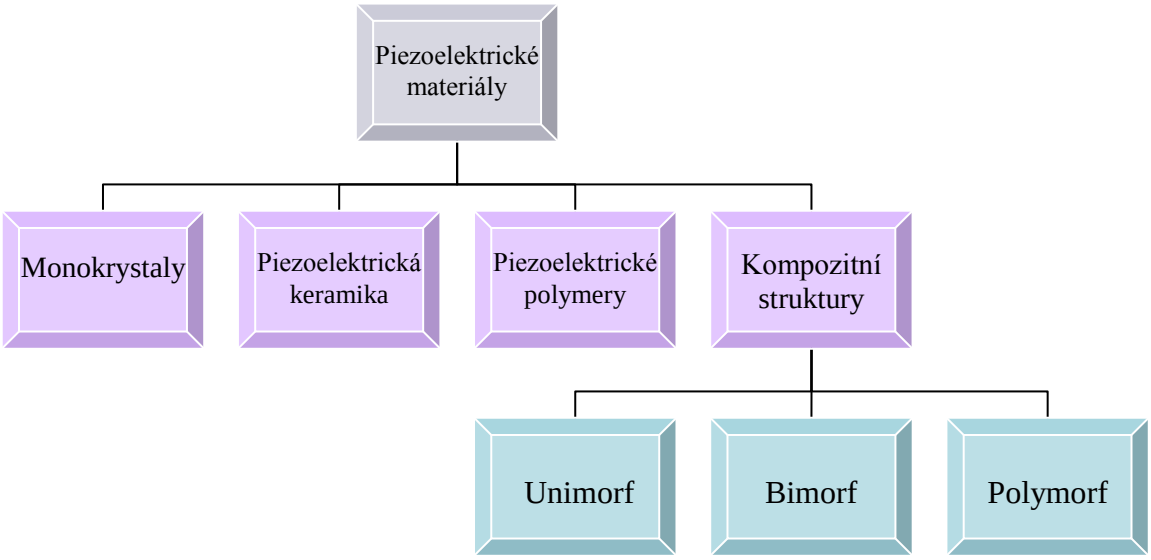
Feroelektrické materiály jsou látky, u nichž existuje v krystalové struktuře dipólový moment trvale a samovolně. Feroelektrický materiál je současně také pyroelektrický i piezoelektrický a má vysoké hodnoty permitivity [238].

3.2.2 Piezoelektrické materiály

V dielektrických materiálech působíme na nosiče náboje mechanickým tlakem a spolu s deformací krystalové mřížky se posouvají i elektrické náboje. Nemá-li krystalová mřížka střed symetrie, vznikne nesymetrické uspořádání nábojů charakterizované nenulovým dipólovým momentem (velikost je přímo úměrná velikosti působícího tlaku). Piezoelektrický jev - schopnost krystalů generovat elektrické napětí při jejich deformaci. Obrácený piezoelektrický jev (elektrostrikce) – při působení vnějšího elektrického pole posunutí iontů, což vede k deformaci krystalu. Při působení vysoké teploty dochází u materiálu ke ztrátě piezoelektrických vlastností (je narušeno uspořádání iontů) [241].

Rozdělení piezoelektrických materiálů

Typy piezoelektrických materiálů podle struktury:
- krystalické piezoelektrické látky (monokrystaly)
- polykrystalické piezoelektrické látky (piezoelektrická keramika)
- organické polymery (piezoelektrické polymery)
- kompozitní piezoelektrické struktury



Obr. 23: Rozdělení piezoelektrických materiálů

Krystalické piezoelektrické látky [239], například oxid křemičitý (SiO_2), lithium niobát ($LiNbO_3$), lithium tantalát ($LiTaO_3$), germanium bizmut ($Bi_{12}GeO_{20}$), triglycin sulfát (TGS), oxid berylnatý (BeO), sirník zinečnatý (ZnS), sirník kademnatý (CdS), galium arsenid GaAs, galium fosfid (GaP), oxid zinečnatý (ZnO). Monokrystalické piezoelektrické látky, které mohou být přírodní nebo vytvořeny uměle. Piezoelektrický prvek dostaneme výbrusem z monokrystalu. Přírodní monokrystaly dosahují velkých rozměrů, ale nejsou dokonale čisté [241].

Polykrystalické piezoelektrické látky [239], například titaničitan barnatý ($BaTiO_3$), zirkoničitan olovnatý ($PbZrO_3$), titaničitan olovnatý ($PbTiO_3$), olovozirkonát titanát ($PbZrO_3 \cdot PbTiO_2$).

Piezoelektrické keramiky nazýváme PZT keramikami (materiály na bázi tuhých roztoků oxidů $PbZrO_2$ (PZ) a $PbTiO_3$ (PT). PZT můžeme dělit podle pohyblivosti doménových stěn na tvrdé, které jsou vhodné pro výkonové aplikace, a měkké, které nejsou vhodné pro výkonové aplikace. Nepoužívaná PZT keramika stárne rychleji než používaná (dochází k opětovné polarizaci působením elektrického pole). PZT může byt použita jako výztuž kompozitu.

Organické polymery [239], například polyvinylchlorid (PVC), polyvinylfluorid (PVF), difluorpolyetylén (PVF), polyvinylidenfluorid (PVDF). Výhodou organických polymerů je velká pružnost. Nevýhodou těchto polymerů je poměrně náročná technologie výroby.

Tým inženýrů z University of California v Berkeley vyrobil z nanovláken nanogenerátory, které můžou (díky piezoelektrickým vlastnostem) přeměnit mechanickou energii na energii elektrickou. Nanogenerátor je vyroben z PVDF nanovláken, která mají velmi dobré mechanické vlastnosti, což znamená, že pohyb, kroucení, ohyb nanovlákenného nanogenerátoru by mohl vést k nabití elektronických zařízení jako mobil nebo iPad.

Silně piezoelektrické krystaly, například $Pb(Zn_{1/3}Nb_{2/3})O_3$-$PbTiO_3$ (PZN - PT) a $Pb(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O_3$-$PbTiO_3$ (PMN - PT) jsou látky s perovskitovou strukturou. Monokrystaly PMN - PT byly použity pro výrobu PMN - PT / epoxid 1-3 kompozitu, vlastnosti tohoto kompozitu ještě jsou zkoumány, ale předpokládá se jeho využití v letectví (například jako snímače) [282]. Kompozit PZN – PT / polymer byl také zkoumán pro případné použití u ultrazvukových snímačů [283].

Kompozitní piezoelektrické struktury můžeme rozdělit na [241]**:**

- **unimorf** - ohybový kompozit, který se skládá ze dvou vrstev, první vrstvu tvoří piezoelektricky aktivní materiál a druhá vrstva je z piezoelektricky neaktivního materiálu (např. kovový plech), [242]
- **bimorf** je tvořen dvěma plátky piezoelektrické keramiky, které jsou nalepené na společné kovové destičce, keramika je polarizována tak, aby se při aplikaci elektrického napětí jeden z keramických prvků rozpínal a druhý stlačoval; bimorfy můžeme používat jako aktuátory, nebo jako elektrické snímače ohybové deformace [243]
- **polymorfy** mají více než dvě vrstvy PZT keramiky

RAINBOW (angl. Reduced And Internally Biased Oxide) THUNDER (angl. Thinlayer Unimorph DrivER) jsou vícevrstvé kompozitní piezoelektrické struktury, které jsou schopné velkých mechanických deformací při působení elektrického pole [244].

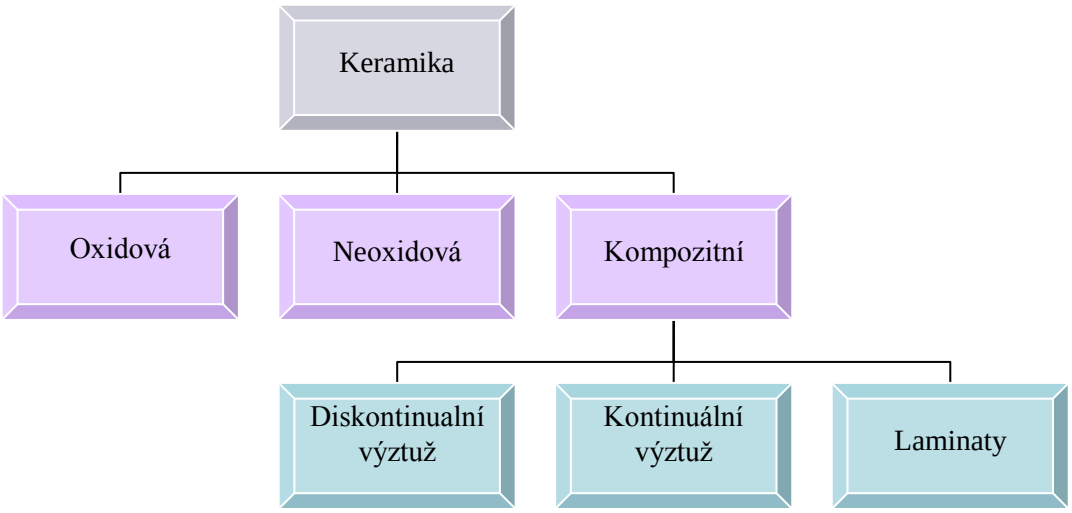
Piezoelektrické materiály se používají v řadě aplikací například jako oscilátory, senzory, aktuátory, zapalování zážehových spalovacích motorů, parkovací nebo nárazová čidla.

3. 3 Keramické materiály

Hlavní nevýhodou keramiky je křehkost, a proto při zpevnění izometrickými částicemi, destičkami, whiskry nebo vlákny zvýšíme lomovou houževnatost na hodnotu

cca 10 MPa - 20 MPa·m1/2 [262]. Kompozitní keramika může být použita na výrobu raket, proudových motorů, turbíny elektráren, stěn termonukleárních reaktorů, brzd letadel. Použití keramických materiálů místo těžkých slitin znamená úsporu na váze.

3. 3. 1 Rozdělení keramických materiálů



Obr. 24: Rozdělení keramických materiálů

Keramika může být rozdělena podle složení na [266]:

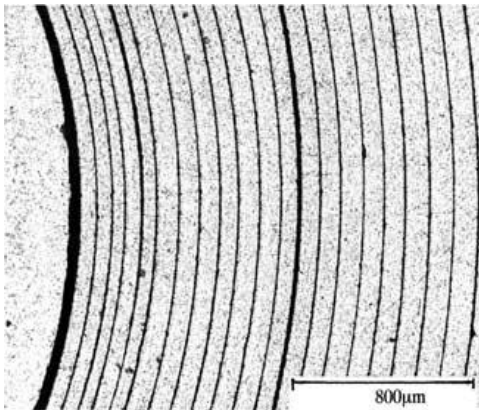
- **oxidová**, například na bázi SiO_2, Al_2O_3, ZrO_2, TiO_2, MgO, CaO, ferity $MeO.Fe_2O_3$, směsné struktury (Me = kov); v kompozitech se používá například jako výztuž - oxidová keramická vlákna (základ tvoří oxid hlinitý (Al_2O_3), většinou ve směsi s oxidem křemičitým (SiO_2), nebo s příměsí oxidu boritého (B_2O_3) nebo zirkoničitého (ZrO_2), mohou se pro určitá vlákna použít směsi nazývané mullit - $3Al_2O_3.\ 2SiO_2$) [284];
- **neoxidová**, například karbidy (CaC_2, Fe_3C, TiC, SiC, ZrC, B_4C), nitridy (BN, $(CN)_2$, P_3N_5, S_4N_4, TaN), boridy (TiB2, ZrB2, CrB2), silicidy (Fe_3Si, Mn_3Si, Ti_5Si_3, $CaSi_2$); v kompozitech se používá například jako výztuž - neoxidová keramická vlákna, která se vyrábí na bázi křemíku nebo s uhlíkem (SiC), některé druhy s příměsí titanu, boridu, nebo zirkonia [284];
- **kompozitní keramika** [263], například SiC/Si_3N_4, SiC whiskery / Al_2O_3 matrice, SiC whiskery a Si_3N_4 jako matrice, carbon (výztuž) a carbon (matrice) kompozity, SiC (výztuž) a SiC (matrice) kompozity (byly vyvinuty kvůli zvýšené odolnosti proti oxidaci);

Kompozity s diskontinuální výztuží. Na částicích, které nereagují s matricí, dochází k vychýlení trhliny - nárůst houževnatosti. Když mají částice velmi odlišnou teplotní roztažnost, může to také vést ke zhouževnatění například kompozit, kde je matrice Al_2O_3 vyztužena částicemi TiC. Kromě zvýšené pevnosti a houževnatosti mají tyto kompozity také spolehlivost a snášenlivost vůči defektům. Ale deformace do lomu je stále stejná jako u monolitických keramik. Do keramických matricí se ve většině případů přidávají whiskery SiC nebo Si_3N_4, například přidáním whiskerů SiC do matrice Al_2O_3 lomová houževnatost za pokojové teploty vzroste dvakrát a pevnost cca 50 % [266].

Kompozity s kontinuální výztuží. Vlákna jsou amorfní či polykrystalická s velmi malými zrny (nm), proto jsou přítomny pouze malé defekty a pevnost může byt vysoká. Vlákna se mohou vyrábět z různých keramických materiálů, například uhlíková vlákna, která mají výborné mechanické vlastnosti, ale horší odolnost proti oxidaci a používají se za teploty cca 300 °C [266]. Do další skupiny můžeme zařadit oxidová vlákna, která mají lepší odolnost vůči oxidaci v porovnání s neoxidovými vlákny, ale často reagují s okolní matricí.

Keramické lamináty v porovnání s vláknovými kompozity mají mnohem nižší nároky na rozhraní, a proto je snadné je spojit s jakýmkoliv materiálem. Typ rozhraní mezi vrstvami určí celkové chování keramického laminátu. Existují dva typy rozhraní, slabé (nekřehkého porušení dosaženo díky značnému odchýlení trhliny [266]) a silné (dochází k nárůstu houževnatosti díky zbytkovým napětím [266]).

Zvýšením lomové houževnatosti ale klesá pevnost a soudržnost materiálů. Rozšíření laminátů s vrstevnatou strukturou brání fakt, že u nich dochází k delaminaci ve dvou směrech (ztráta integrity). Proto byla desková struktura nahrazena soustřednou válcovou (redukcí směrů delaminace ze dvou až na žádný [266]). Hlavní výhodou prstencové struktury v porovnání s monolitem a deskovými lamináty je to, že při šíření trhliny drží materiál pohromadě. Na obrázku 25 je laminát SiC/C, kde šedá barva jsou vrstvy SiC o vysoké hustotě a černá barva jsou porézní vrstvy SiC, které vznikly z grafitu [266].



Obr. 25: Keramický laminát SiC/C [266]

Bylo zjištěno, že se vzrůstající teplotou u keramického laminátu na bázi Al_2O_3 / ZrO_2 se lomové chování mění od rychle spontánní delaminace přes lomové chování až k lomům bez odklonu trhliny, což je důkazem vlivu zbytkových napětí na šíření trhliny [266].

Keramické lamináty mohou přizpůsobit své mechanické vlastnosti podle určitých konstrukčních požadavků. Používají se například v kondenzátorech, palivových článcích, optických přístrojích, kyslíkových membránách, senzorech, v mikroelektronických zařízeních, v řezných nástrojích, jako součásti plynových turbín a tepelných výměníků [266].

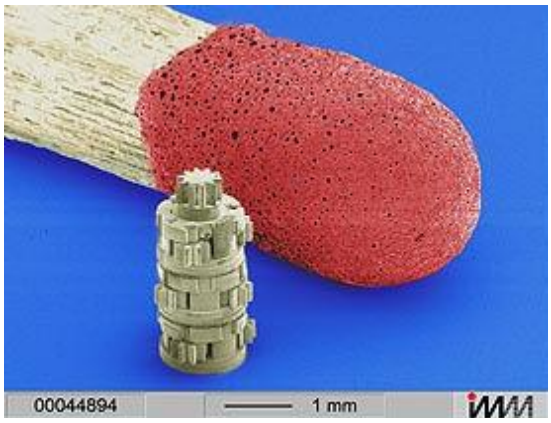
Sialonové keramiky jsou nitridové keramiky s proměnlivým obsahem oxidů, a proto můžeme ovlivňovat výslednou strukturu materiálu a mechanické vlastnosti (tvrdost, lomovou houževnatost) [272]. SiAlON má vynikající odolnost proti opotřebení a korozi a používá se pro vysoké teploty tvářecích nástrojů a valivé elementy ložisek [273].

4 Využití nových kompozitních materiálů v elektrotechnice

4.1 Využití nanokompozitních materiálů v elektrotechnice

Nanokompozity jsou díky svému velkému poměru mezi délkou a průměrem, výborným mechanickým vlastnostem, vysoké elektrické a tepelné vodivosti a nanometrickým rozměrům perspektivním materiálem pro mnohé aplikace.

V 80. letech minulého století se v literatuře objevuje termín MEMS – mikroelektromechanické systémy (angl. Micro-electro-mechanical-systems). Za termínem MEMS se skrývají nové mechanické systémy na čipu, například elektrické mikromotory, ozubená kola, rezonátory a rohatková ústrojí. Nanokompozity ovlivňují budoucnost součástek MEMS, potřebujeme zvyšovat jejich výkonnost a snižovat rozměry senzoru. Výroba součástek MEMS je založena na nástrojích a metodách, které jsou využívány k formování malých struktur o velikostech řádu mikrometru nebo nanometru ([179], [187]). Na obrázku 26 je zobrazen ilustrační příklad mikrostroje - planetová mikropřevodovka.



Obr. 26: Planetová mikropřevodovka [187]

Nanovlákna - citlivé senzory vlhkosti

Výzkumný tým z Zhejiang University vyrobil metodou elektrostatického zvlákňování polyanilínová (PAN) nanovlákna s přidáním polyethylenoxidu (PEO) a polyvinylbutyralu (PVB) a pozorováním morfologie zjistil, že výskyt „korálků“ v nanovláknech ovlivňuje adhezi k substrátu. Žádaná hydrofilita (tato vlastnost molekul a jejich částí umožňuje interagovat s vodou) povrchu je regulována poměrem přidaného PEO a PVB. Nové nanovlákenné senzory měly mnohem vyšší citlivost a rychlou odezvu [173], [189]. Relativní vzdušná vlhkost, která je všude kolem nás, ovlivňuje také celou elektrizační soustavu od výroben, přenosu, po spotřebiče elektrické energie. Ve většině případů jsou její následky nežádoucí, například degradace velké škály stavebních a elektrických materiálů. Vlhkost, která obklopuje elektrické stroje, přístroje a zařízení, zhoršuje jejich vlastnosti (struktura a chemické složení se mění). Regulace vzdušné vlhkosti je nezbytná u většiny průmyslových výrobních procesů, protože má velmi velký vliv na kvalitu výsledného produktu a na bezpečnost práce.

Nanovlákna z Pt-TiO2

Oxid titaničitý je součástí mnoha kompozitů díky svým fotokatalytickým vlastnostem (samočisticí povrchy, dezinfekce vody nebo vzduchu). Nové kompozity Pt-

TiO_2 mají lepší fotokatalytické vlastnosti nebo mohou být součástí nového typu solárních článků [232].

Uhlíkový nanokompozit

Firma Fujitsu Laboratories vytvořila uhlíkový nanokompozit z uhlíkových nanotrubiček a grafénu [234]. I když oba materiály jsou tvořeny stejnými atomy uhlíku, mají rozdílné vlastnosti. Vlastnosti uhlíkových nanotrubiček zahrnují vysokou tepelnou vodivost a grafén se vyznačuje vysokou pohyblivostí elektronů. Uhlíkové nanostruktury, ve kterých jsou zkombinovány tyto dva materiály, se stávají atraktivním materiálem například pro elektroinstalace, rozptyl tepla, emitory elektronového pole.

Nanokompozitní dielektrika

Nanoplniva mohou zlepšit vlastnosti dielektrických systémů. Permitivita roste, když plníme polymery anorganickými plnivy mikrometrových rozměrů [214], [215]. Plniva mají vyšší permitivitu než neplněné polymery a způsobují mezivrstvovou polarizaci Maxwell - Wagnerova typu [6], která zvyšuje tg δ. Ale když je kompozit plněn nanočásticemi, pozorujeme pokles permitivity.

Nanostruktury mají tendenci snižovat prostorový náboj v nanokompozitech epoxid – oxid titaničitý, oxid hlinitý a ZnO, PP a EVA (kopolymer ethylen – vinyl – acetát [218]), v nanokompozitech s vrstvenými křemičitany a v nanokompozitech LDPE (angl. Low-Density Polyethylene [216]) – oxid titaničitý. Při mikrorozměrech plniva je elektrické pole prostorového náboje dvojnásobné oproti případu, kdy se použije nanoplnivo. V polymeru EVA při cca 6 % [167] plnění dojde přidáním nanoplniv ke zmenšení náboje v silném poli a ke zvýšení ve slabém poli.

Nanokompozity epoxid a oxid titaničitý nevykazují žádnou změnu ve stejnosměrné krátkodobé elektrické pevnosti až do přidání cca 10 % [167] hmoty nanoplniva. Nanokompozity mají kladný vliv na elektrickou pevnost v porovnání s mikrokompozity. Nanokompozity epoxid a ZnO nebo epoxid a vrstvený křemičitan také vykazují zlepšení elektrické pevnosti ve střídavém poli. Přidáním velmi malého množství cca 0,5 % až 1 % hmoty ZnO nanočástic do epoxidové pryskyřice zvýšíme doby do průrazu [167]. Růst průrazného „stromečku“ se zpomalí, částice nanoplniva mu blokují cestu, a proto čas do průrazu vzrůstá, což bylo experimentálně pozorováno [167]. Elektrická pevnost nanokompozitu epoxid a vrstvený křemičitan je v porovnání s čistou pryskyřicí o cca 10 % vyšší [167].

Odolnost proti částečným výbojům je u nanokompozitů zvýšena a byla zjištěna v nanokompozitu polyamid a vrstveného křemičitanu nebo silikonovo - elastomerového nanokompozitu.

Polymerové nanokompozity jsou díky svým výborným vlastnostem, které byly popsány výše, slibnými dielektriky [167].

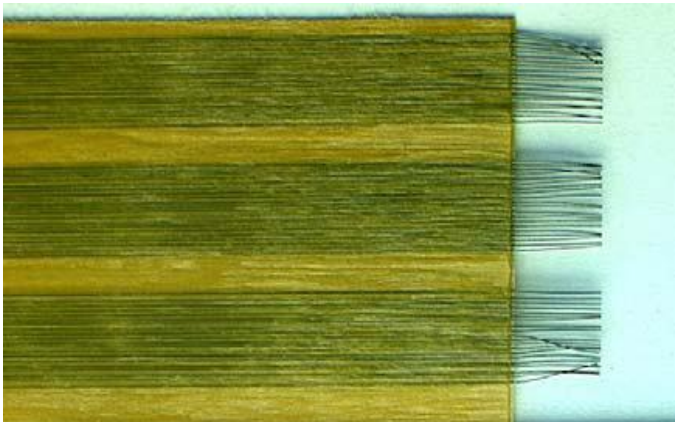
4. 2 Využití kompozitu s piezoelektrickými vlastnostmi v elektrotechnice

PZT kompozity. Vlastností piezoelektrických materiálů se využívá při výrobě smart kompozitů. Firma Advanced Ceramics, Inc. (USA) [35] vyvinula technologii pro výrobu keramických piezoelektrických vláken. Průměr PZT vláken se pohybuje od 13 μm do 250 μm [18]. Piezoelektrická keramická vlákna jsou vyráběna procesem Viscose Suspension Spinning Process [18]. Pás z piezoelektrických vláken je uložen v epoxidové pryskyřici, vnější vrstvy kompozitu tvoří polyimidový film s elektrodami

[245]. Smart kompozity jsou známé jako aktuátory (měnící tvar dílu, například u vrtulníků se používají aktuátory s PZT vlákny, aby podle potřeby mohly upravit tvar listu rotoru, což je spojeno se změnou hlučnosti rotoru a jsou o 35 % lehčí než klasické [18]) a senzory. Snímače na piezoelektrické bázi, které jsou zabudovány uvnitř vláknových kompozitů, mohou sledovat stav konstrukce stejně jako optická vlákna. V námořnictví se využívají piezoelektrická vlákna tak, že jsou zabudovaná do kompozitních bójí, které mechanickou energii určitých vln převádějí na elektroluminiscenční světlo.

SMA kompozity

Slitiny SMA (kovové materiály s tvarovou pamětí - SMA - angl. Shape memory alloy) můžeme kombinovat s materiály jako kov, keramika, polymer a vytvářet nové adaptivní kompozitní materiály s novými nebo měnitelnými vlastnostmi. Kompozit SMA / polymer vzniká z tenkých NiTi drátků zabudovaných do desek vyztužených skleněným vláknem z epoxidové pryskyřice, což je vidět na obrázku 27. NiTi dráty jsou zabudovány do desek v částečně martenzitickém stavu (fáze vznikne ochlazením nebo působením vnějších sil). Při zahřátí (teplotou okolí nebo elektrickým proudem) se NiTi drátky vrací do původního austenitického stavu (fáze existuje při vyšší teplotě), ale okolní matrice z epoxidové pryskyřice jim v tom brání. Změnou teploty můžeme ovlivňovat elastické vlastnosti daných kompozitních desek, měnit jejich tvar a omezovat mechanické vibrace [251].



Obr. 27: NiTi drátky zabudované do vyztužených desek z epoxidové pryskyřice [251].

Kompozit na bázi polymeru PVC a magnetických částic Fe

Vývoj vysokofrekvenční elektroniky a bezdrátové komunikace pořád roste, proto je velkým problémem elektromagnetické rušení mezi různými elektronickými zařízeními. Vedle již existující řady absorpčních materiálů, které mohou být použity k potlačení elektromagnetického rušení, se stále častěji používají kompozitní matriály na bázi polymeru, mikročástic nebo nanočástic. U kompozitů můžeme dobře regulovat mechanické vlastnosti při dobré efektivitě (například snížení ztrát způsobených vířivými proudy). Na rumunské univerzitě Alexandra Ioan Cuza University byl vytvořen kompozit složený z PVC nanovláken (mají piezoelektrické vlastnosti a průměr cca 100 nm – 500 nm [246]) a nanočástic železa. Při změně koncentrace nanočástic byly sledovány absorpční vlastnosti kompozitu pro frekvenci mezi 8 a 12 GHz. Měření prokázalo, že tento kompozit může být použit jako ochrana materiálu v X-pásmu (frekvence cca 10,5 GHz), což v budoucnosti má mít velký potenciál pro stínění elektromagnetického rušení [246].

PMN-PT monokrystalový / epoxidový 1-3 kompozit

Kompozit PMN-PT monokrystalový / epoxidový 1-3 kompozit (rozložení složek se popisuje pomocí čísel vyjadřujících návaznost jednotlivých složek, například - jedna složka rozložena ve formě tyčí v druhém materiálu je materiál označen čísly 1-3 proto že první složka na sebe navazuje jenom v jednom směru, druhá složka navazuje ze všech směrů [259]) byl vyvinut pro vysokofrekvenční ultrazvukové snímače s cílem získat kombinaci piezoelektrických a mechanických vlastností. Výsledky ukázaly, že daný kompozit má lepší vlastnosti v porovnání s jinými piezoelektrickými materiály [255]. Při použití tohoto typu kompozitního materiálu se zlepší rozlišení [256].

Fononické krystaly

Fononické krystaly jsou kompozitní materiály s nelineárními disperzními vlastnostmi (závislost vlnové délky na frekvenci). Heterogenní struktura obsahuje složky s rozdílnými elastickými tuhostmi, což při určitém geometrickém uspořádání vede ke vzniku zakázaných frekvenčních pásem, kdy je potlačeno šíření elastických vln [235]. Uvažuje se o piezoelektrických kompozitních materiálech, kde jsou vysoké kontrasty v elasticitě a i v dalších piezoelektrických parametrech (například piezoelektrických koeficientech) [236].

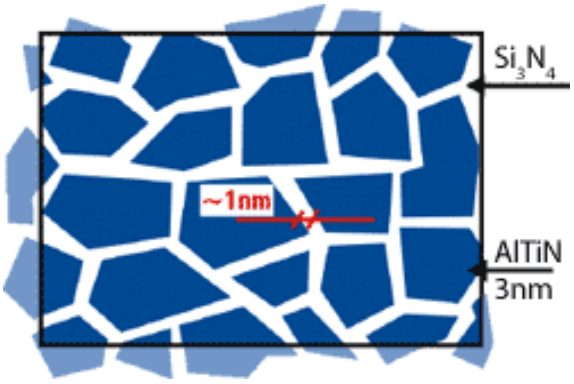
Ultrazvukové zobrazovací metody se využívají i v elektrotechnické praxi, například při lokalizaci defektů v namáhaných materiálech. Používají se přitom speciálně tvarované akustické čočky, které ohýbají zvukové vlny (podobně jako klasická čočka ohýbá vlny optické). V budoucnosti může použití fononických krystalů nabídnout zlepšení rozlišovacích schopností až do měřítek blízkých vlnové délce zvukové vlny (vzdálenost dvou nejbližších bodů vlny se stejnou fází a amplitudou – cca 1 mm) [237].

4.3 Využití kompozitní keramiky v elektrotechnice

Nanokrystalické kompozitní vrstvy typu nc-($Ti_{1-x}Al_x$)N/a-Si_3N_4

Firma SHM (ČR) v roce 1995 vyrobila otěruvzdornou vrstvu TiAlSiN, což vedlo k výrobě nanokrystalické kompozitní vrstvy typu nc-($Ti_{1-x}Al_x$)N/a-Si_3N_4 s obchodním jménem MARWIN®SI (nanokompozitní povlak pro frézovací, lisovací, vrtací stroje) [252].

Firma SHM vyrábí další nanokompozitní povlak tvořený TiAlSiN a zakončený kluznou vrstvou s obsahem oxidů a uhlíku na obrábění barevných kovů s obchodním jménem LUBRIK®SI.



Obr. 28: Nanokrystalické kompozitní vrstvy typu nc-($Ti_{1-x}Al_x$)N/a-Si_3N_4 [253]

Uvedené nanokrystalické kompozitní vrstvy jsou připravovány moderními PVD (angl. Physical Vapor Depostition [4]) metodami a mají vynikající odolnost proti nárazu, vůči vysokým teplotám, výbornou odolnost proti opotřebení, korozi a kyselinám.

Keramická vlákna Nextel

Americká firma 3M Ceramic Textiles and Composites vyrábí keramická vlákna Nextel. Tato keramická vlákna byla vyráběna již dříve, například vlákna typů 312 ($Al_2O_3+B_2O_3+SiO_2$), 440 (γ-Al_2O_3+mullit+SiO_2), 610 (γ-$Al_2O_3+SiO_2$), 650 (α-Al_2O_3) a 720 (α-Al_2O_3+mullit), ale nyní jsou vyráběna s nanovlákny nebo nejnověji s povlaky ZrO_2, $La_2O_3.6Al_2O_3$ [257]. Vlákna průměru 10 μm - 12 μm můžeme snadno zpracovávat na tkaniny, papíry, pásy, hadice a CMC kompozity [257]. Provozní teplota těchto vláken je cca 1370 °C při nízké roztažnosti a vysoké rozměrové stabilitě [257]. Byl vyvinut kompozit (AMC) na bázi hliníku vyztuženého nanokrystalovými vlákny Nextel 610 (pevnost cca R_m = 3100 MPa) [258]. Tento kompozit má poloviční hmotnost, vyšší pevnost a odolnost vůči opotřebení v porovnání s ocelí a trojnásobnou pevnost v porovnání s hliníkem.

Všechny typy byly ověřeny pro aplikace na tepelné bariéry motorů, obraceče tahu, protipožární obložení.

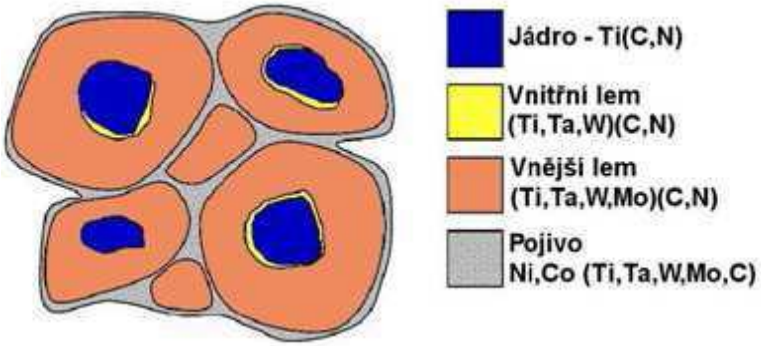
Nanokompozitní materiál SiC/Si_3N_4

Nanokompozit SiC/Si_3N_4 [265] je tvořen SiC částicemi (výztuž), které jsou rovnoměrně rozmístěné v Si_3N_4 matrici (matrice z nitridu křemíku je při vysokých teplotách méně stabilní než karbid křemíku [263]). Daný kompozit má výborné mechanické vlastnosti, mohou být použity ve vysokoteplotních aplikacích, jako součásti turbinových motorů nebo jako výměníky tepla.

Kompozitní materiál WHIPOX Kompozit WHIPOX (angl. Wound Highly Porous Oxide Ceramic Composite) z pórovité oxidové keramiky Al_2O_3, vyztužené alumosilikát / mullitovými vlákny. Kompozit WHIPOX byl vyvinutý v německém centru letectví a kosmického výzkumu DLR a může být použit krátkodobě při teplotě 1750 °C a dlouhodobě při 1200 °C [258], má vysokou mechanickou pevnost a malou hmotnost. Tento kompozit může být použit na výrobu dílů pro motory.

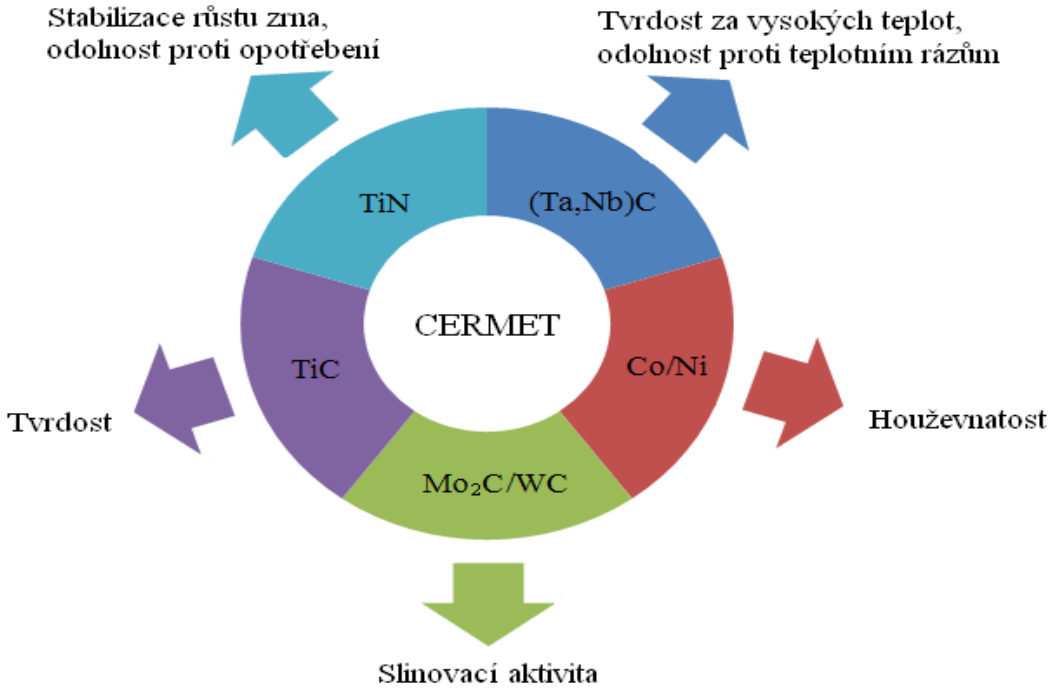
Cermety

Označení „cermet" - „**cer**amics" (keramika) a „**met**al" (kov). Cermety obsahují tvrdé částice, například karbid titanu (TiC), nitrid titanu (TiN), karbonitrid titanu (TiCN) a nitrid tantalu (TaN), v kovovém pojivu například niklu (Ni), molybdenu (Mo), kobaltu (Co). Tvrdost cermetů je přibližně srovnatelná se slinutými karbidy - wolframu (WC), karbidů niobu (NbC), karbidů titanu (TiC), karbidů tantalu (TaC) v kovovém pojivu kobaltu (Co) - houževnatost a pevnost je nižší.



Obr. 29: Schéma struktury cermetu [269]

Vlastnosti cermetů jsou závislé na vlastnostech materiálů, z kterých jsou složené, což je vidět na obrázku 30.



Obr. 30: Vliv výchozích materiálů na vlastnosti cermetů [269]

Cermety (například Co/Ni; WC; TaNbC; TiCN [269]) mají vynikající oxidační odolnost, dobrou houževnatost a jsou určeny pro soustružnické a frézovací aplikace. Cermety (například WC-Co) se používají pro žárové nástřiky, při kterých se vytváří povlak s charakteristickou lamelární strukturou [270]. Jsou to žáruvzdorné materiály a mohou být použity například pro teplotní čidla [271].

Závěr

Cílem této diplomové práce bylo podání přehledu o kompozitních materiálech obecně a dále se zaměřit na nové kompozitní materiály a hlavně na jejích použití v elektrotechnice. V mnoha literaturách se uvádí, že kompozitní materiály jsou materiály budoucnosti (a nejen v elektrotechnice), což se potvrdilo i v této práci.

Po celou dobu lidské historie od pravěku přes dobu kamennou a železnou byl pokrok vždy spojen s využitím nových materiálů pro technické aplikace. Ve 20. a 21. století díky rozvojí informačních technologií, elektronice a mikroelektromechnických systému se materiálový výzkum zrychlil a přináší stále nové a nové materiály se stále vzrůstající mírou inteligence. Smart kompozity - inteligentní materiály s jednou nebo několika vlastnostmi (například tvar, barva, skupenství, vodivost), které se mohou na základě podmínek vnějšího prostředí**,** jako světlo, teplo, elektrické pole výrazně měnit. Těžiště významu těchto materiálů je především ve způsobu přímé reakce na vnější podnět bez řídicího systému, který by změnu vyvolal. Změny se dějí námi požadovaným způsobem, což umožňuje smart materiály spolehlivě využít jako senzory, aktuátory nebo čidla.

Pojmy nanotechnologie, nanomateriály a kompozitní materiály pronikají do povědomí člověka stále více a více. Vývoj, význam a také spotřeba nanokompozitů pořad roste díky vlastnostem mechanickým, fyzikálním a elektrickým. Polymerní nanokompozitní materiály jsou slibnými dielektriky. Nanovláknové citlivé senzory vlhkosti také mají budoucnost nejen v elektrotechnice.

Ale, jsou nanomaterialy bezpečné? To je otázka, kterou si kladou v současnosti všichni, kterým se do povědomí nanokompozity dostaly a kteří výrobky obsahující nanomateriály používají. Nanočástice jsou snadněji inhalovány a mohou vykazovat zatím neznámé toxické účinky. Je to zatím neprozkoumaná oblast a není k dispozici žádné rozsáhlejší studie.

Kompozitní keramika diky výborným mechanickým vlastnostem a malé váze může být použita na výrobu raket, proudových motorů, turbín elektráren, stěn termonukleárních reaktorů, brzd letadel.

Kombinace nanočástic a smart materiálů nebo kombinace nanočástic a keramiky nebo kombinace keramiky a smart materiálů mohou vest ke zlepšení mnoha vlastnostem.

Použitá literatura

[1] Hassdenteufela J.a kol.:*Elektrotechnické materiály*, Praha, SNTL 1967
[2] Kučerová E.: *Elektrotecnické materiály*, ZČU, 2002
[3] Šavel J.: *Materiály, technologie a výroba v elektronice a elektrotechnice*, BEN
[4] Janovec J., Cejp J., Steidl J.: *Perspektivní materiály,* Praha, ČVUT 2008
[5] Svoboda J. a kol.: *Telekomunikační technika,* Praha, Sdělovací technika 2000
[6] Mentlík V.: *Dielektrické prvky a systémy,* Praha, BEN 2006
[7] Sodomka, L., Fiala, L.: *Fyzika a chemie kondenzovaných látek*, Liberec 2004
[8] Peters P. T.: *Handbook of Composites*, Chapman & Hall 1998
[9] Bareš R. A.: *Kompozitní materiály,* Praha, SNTL 1988
[10] Rous B.: *Materiály pro elektroniku a mikroelektroniku,* Praha, SNTL 1991
[11] Zeman L.: *Vstřikování plastů,* Praha, BEN 2009
[12] Bhagwan D. Agarwal, Lawrence J. Broutman: *Vláknové kompozity*, Praha, SNTL
[13] Lidařík M. a kol.: *Epoxidové pryskyřice,* Praha, SNTL 1983
[14] Kovačič L., Bína J.: *Plasty,* Bratislava, Alfa 1974
[15] Macek K., Janovec K., Jurči P., Zuna P.: *Kovové materiály,* Praha, ČVUT 2006
[16] Sequenz H. a kol.: *Technologie vinutí el. strojů točivých,* Praha, SNTL 1980
[17] Míšek. B.: *Kompozity*, Brno, Technický dozorčí spolek, 2003
[18] Kořínek. Z.:*Kompozity*, (Definice a historie kompozitů. Vlákna. Matrice. Laminaty. Technologie.) dostupne na http://www.volny.cz/zkorinek/ [08.09.2011]
[19] http://cs.wikipedia.org/wiki/Sendvi%C4%8D_(lamin%C3%A1t) [08.09.2011]
[20] http://www.vscht.cz/sil/chemtech/vyzkum/vlakna/index.htmm[08.09.2011]
[21] http://www.csve.cz/cz/clanky/materialy-pro-laminovani-rotorovych-listu/316[08.09.2011]
[22] http://manufacturing-fabrication.globalspec.com/Industrial-Directory/s2_glass_composite[08.09.2011]
[23] http://glassproperties.com/glasses/[08.09.2011]
[24] http://altimabohemia.cz/?str=vlastnosti [11.09.2011]
[25] http://www.mech.northwestern.edu/fac/cao/nsfworkshop/briefs/Langer_Pickett.pdf [11.09.2011]
[26] http://cs.wikipedia.org/wiki/Pultruze[11.09.2011]
[27] http://www.bellus.cz/cz/1_kovove_ctvercove.htm[11.09.2011]
[28] http://www.grepnet.cz/cs/sluzby/internet/opticky/[12.09.2011]
[29] http://www.jiast.cz/clanky/svetlo-xii-opticke-vlakno[12.09.2011]
[30] http://wikipedia.org/wiki/Montmorillonite[14.09.2011]
[31] http://www.odetka.cz/net20/cz/specmat_kevlar.aspx[15.09.2011]
[32] http://www2.dupont.com/Kevlar/en_US/index.html[15.09.2011]
[33] http://cs.wikipedia.org/wiki/Polyakrylnitrilov%C3%A1_vl%C3%A1kna [19.09.2011]
[34] http://cs.wikipedia.org/wiki/Uhl%C3%ADkov%C3%A9_vl%C3%A1kno [19.09.2011]
[35] http://www.advancedcerametrics.com/pages/products/ [19.09.2011]
[36] http://www.adherenttech.com/composite_recycling.htm[19.09.2011]
[37] http://cs.wikipedia.org/wiki/Plazmat [21.09.2011]
[38] http://www.carbonmax.cz/zpracovani-uhlikovych-vlaken.html [21.09.2011]
[39] http://www.tohotenax.com/tenax/en/products/mc.php [21.09.2011]
[40] http://cs.wikipedia.org/wiki/Epoxidov%C3%A1_prysky%C5%99ice [21.09.2011]
[41] http://en.wikipedia.org/wiki/Dyneema [21.09.2011]
[42] http://en.wikipedia.org/wiki/Honeywell [21.09.2011]

[43] http://www.rochling.plastics.cz/produkty/ [21.09.2011]
[44] http://www.innegrity.com [21.09.2011]
[45] http://www.innegrity.com/InnegraS.htm [29.09.2011]
[46] http://en.wikipedia.org/wiki/Vectran [29.09.2011]
[47] http://www.kynol.com/ [29.09.2011]
[48] http://en.wikipedia.org/wiki/Zylon [29.09.2011]
[49] http://www.m5fiber.com/magellan/ [29.09.2011]
[50] http://www2.dupont.com/ [29.09.2011]
[51] http://www.basfiber.com/ [12.10.2011]
[52] http://cs.wikipedia.org/wiki/Oliv [12.10.2011]
[53] http://cs.wikipedia.org/wiki/Čedičová_vlákna [12.10.2011]
[54] http://www.basaltex.cz/cedic/cedic_charakteristika_cz.htm[12.10.2011]
[55] http://cs.wikipedia.org/wiki/Nefel [12.10.2011]
[56] http://cs.wikipedia.org/wiki/Protein [12.10.2011]
[57] http://cs.wikipedia.org/wiki/Pavou%C4%8D%C3%AD_hedv%C3%A1b%C3%AD [12.10.2011]
[58] http://www.nexiabiotech.com [12.10.2011]
[59] http://cs.wikipedia.org/wiki/Filament [27.10.2011]
[60] http://en.wikipedia.org/wiki/ochroma_pyramidale [29.10.2011]
[61] http://cs.wikipedia.org/wiki/Balsa [14.11.2011]
[62] http://cs.wikipedia.org/wiki/Chemick%C3%A1_depozice_z_plynn% [14.11.2011]
[63] http://cs.wikipedia.org/wiki/Vl%C3%A1kna_z_karbidu_k%C5%99em%C3%ADku [14.11.2011]
[64] http://www.coiceramics.com/pdfs/Sylramic_1-17-06.pdf [14.11.2011]
[65] http://www.3m.com/market/industrial/ceramics/materials/nextel.html
[66] http://www.advtech.ru/lirsot/english.htm [14.11.2011]
[67] http://www.matnet.sav.sk/index.php?ID=1122 [14.11.2011]
[68] http://www.kompozity.info/index.php?pr=1&uid=&id= [14.11.2011]
[69] http://cs.wikipedia.org/wiki/Vl%C3%A1knov%C3%A9_kompozity [14.11.2011]
[70] http://www.kmt.tul.cz/edu/podklady_kmt_magistri/KM/Kompozity [15.11.2011]
[71] http://cs.wikipedia.org/wiki/Vo%C5%A1tina_(kompozit) [15.11.2011]
[72] http://www.ped.muni.cz/wphy/fyzvla/FMkomplet3.htm [16.11.2011]
[73] http://www.matnet.sav.sk/index.php?ID=1038 [16.11.2011]
[74] http://www.volny.cz/zkorinek/historie.pdf [16.11.2011]
[75] http://www.posterus.sk/?p=5374 [23.11.2011]
[76] http://cs.wikipedia.org/wiki/Jednosm%C4%9Brn%C3%A1_v%C3%BDztu%C5%BE [23.11.2011]
[77] http://cs.wikipedia.org/wiki/Estery [23.11.2011]
[78] http://www.netcomposites.com/education.asp?sequence=10 [23.11.2011]
[79] www.dow.com/ [23.11.2011]
[80] en.wikipedia.org/wiki/Mobay [23.11.2011]
[81] http://www.chemicalregister.com/Amoco_Chemical_Co/ [23.11.2011]
[82] http://en.wikipedia.org/wiki/Epoxy [26.11.2011]
[83] Zatloukal R.: *Technologie výroby řadicí páky pro sportovní automobily*, Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Bakalářská práce 2010 dostupné na http://dspace.knihovna.utb.cz/bitstream/handle/10563/11147/zatloukal_2010_bp.pdf [27.11.2011]
[84] http://cs.wikipedia.org/wiki/Styren [27.11.2011]
[85] http://www.irz.cz/repository/latky/styren.pdf [27.11.2011]
[86] http://arnika.org/styren [27.11.2011]

[87] http://www.bisi.cz/produkty/lepidla-a-tmely/467/metakrylaty/470 [29.11.2011]
[88] http://fibrolux.com/cs/main/kompozitni-profily/pultruze/pryskyrice/ [30.11.2011]
[89] http://www.plastor.cz/systemy.htm [30.11.2011]
[90] http://cs.wikipedia.org/wiki/Exotermick%C3%A1_reakce [10.12.2011]
[91] http://de.wikipedia.org/wiki/Benzyldimethylamin [10.12.2011]
[92] http://www.chemicalbook.com/ChemicalProductProperty_DE_CB8240778.htm [10.12.2011]
[93] http://www.plastiquarian.com/index.php?id=98&osCsid= [10.12.2011]
[94] http://cs.wikipedia.org/wiki/Epichlorhydrin [10.12.2011]
[95] http://www.stomateam.cz/index.php?clanek=616 [10.12.2011]
[96] Smrcková M.: *Hybridní kompozity kombinující krátká houževnatá vlákna a částicové plnivo v polymerní matrici*, Vysoké ucení technické v Brne, Fakulta chemická, Brno 2011, dostupné na http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=37554 [11.01.2012]
[97] http://www.cideas.cz/free/okno/technicke_listy/5tlv/TL08CZ_2522-40.pdf [12.01.2012]
[98] http://en.wikipedia.org/wiki/Bisphenol_A_diglycidyl_ether [15.01.2012]
[99] http://www.spolchemie.cz/produkty-spolchemie.aspx [16.01.2012]
[100] Sedláček J.: *Efektivní obrábění vláknově vyztužených kompozitních materiálů,* Vysoké ucení technické v Brne, Fakulta strojního inženýrství, Brno 2010, Disertační práce, dostupné na http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=23996 [16.01.2012]
[101] http://www.vscht.cz/pol/Fyzika%20polymeru/05%20KAPITOLA%203.pdf [16.01.2012]
[102] http://www.ateam.zcu.cz/zkousky_zalozene_na_principu_sireni_defektu.pdf [16.01.2012]
[103] Krba J.: *Termogravimetrická charakterizace polymerních materiálů*, Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Bakalářská práce 2010, dostupné na http://dspace.knihovna.utb.cz/bitstream/handle/10563/10250/krba_2009_bp.pdf?sequ e [17.01.2012]
[104] http://cs.wikipedia.org/wiki/Nitril [18.01.2012]
[105] Vlcek D.: *Technická dokumentace částívyrobených z kompozitních materiálu,* Vysoké ucení technické v Brne, Fakulta strojního inženýrství, Brno 2010, Bakalárská práce, dostupné na http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=39361 [27.01.2012]
[106] http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:9:www.techtydenik.cz/ [27.01.2012]
[107] http://www.phenoxy.com/products/products.html [28.01.2012]
[108] http://www.cog.de/cz/o-krouzkyvyrobky/materialy/b-butadien-akrylonitrilovy-kaucuk. [28.01.2012]
[109] http://de.wikipedia.org/wiki/Polyethersulfon [28.01.2012]
[110] http://en.wikipedia.org/wiki/Polyetherimide [28.01.2012]
[111] http://www.ensinger-online.com/de/hochleistungskunststoffe-werkstoffe [28.01.2012]
[112] http://dspace.knihovna.utb.cz/handle/10563/7539 [28.01.2012]
[113] http://www.ft.vslib.cz/depart/ktm/files/20060106/prednaska2.pdf [28.01.2012]
[114] http://www.silent-czech.cz/czech/page325e.htm [28.01.2012]

[115] http://www.sciencelearn.org.nz/Contexts/Nanoscience/NZ-Research/Nanoscience [29.01.2012]
[116] http://www.miller-stephenson.com/assets/1/Store%20Item/Heloxy%20Modifiers.pdf [29.01.2012]
[117] http://www.huntsman.com/advanced_materials/eng/About_us/Our_vision [30.01.2012]
[118] http://www.nfgsales.com/files/active/0/RENINFUSION%208605_Ren%208605.pdf [30.01.2012]
[119] http://en.wikipedia.org/wiki/Silicone_resin [12.02.2012]
[120] http://www.povrchoveupravy.cz/2008-03-clanek01.html [12.02.2012]
[121] http://cs.wikipedia.org/wiki/Polyuretan [12.02.2012]
[122] http://cs.wikipedia.org/wiki/Isokyan [12.02.2012]
[123] http://www.ruukki.cz/Produkty-a-reseni/Stavebni-reseni [13.02.2012]
[124] http://nepalgroup.cz/pir-panely-desky.html [16.02.2012]
[125] http://en.wikipedia.org/wiki/Polyisocyanurate [17.02.2012]
[126] http://chemie.gfxs.cz/data/plasty/plasty.pdf [17.02.2012]
[127] http://de.wikipedia.org/wiki/Furfurylalkohol [17.02.2012]
[128] http://uoch.vscht.cz/cz/download/Heterocyklicke_slouceniny.pdf [17.02.2012]
[129] http://www.patentgenius.com/assignee/QOChemicalsInc.html [17.02.2012]
[130] http://www.cylex-usa.com/company/qo-chemicals-inc--15771747.html [17.02.2012]
[131] http://www.globalspec.com/Industrial-Directory/furan_resin [19.02.2012]
[132] http://www.ped.muni.cz/wphy/fyzvla/FMkomplet4.htm [19.02.2012]
[133] http://cs.wikipedia.org/wiki/Urotropin [19.02.2012]
[134] http://www.hexcel.com/contacts [27.02.2012]
[135] http://www.chemsynthesis.com/ [28.02.2012]
[136] http://www.elchemco.cz/rubriky/zalevaci-hmoty-pro-elektroniku-a-elektrotechniku/?gclid=CMvA4sXNpK4CFYWDDgodtmCIIw [28.02.2012]
[137] Zapletal L.: *Porovnání mechanických vlastností u ozářeného a neozářeného TPE,* Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Bakalářská práce 2010, dostupné na http://dspace.knihovna.utb.cz/bitstream/handle/10563/13862/zapletal_2010_bp.pdf? [28.02.2012]
[138] http://composite.about.com/ [29.02.2012]
[139] http://search.cytec.com/ [29.02.2012]
[140] http://www.scitopics.com/thermoplastic_matrix_composites.html [29.02.2012]
[141] http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/01.htm [29.02.2012]
[142] http://ateam.zcu.cz/download/plasty.pdf [29.02.2012]
[143] http://www.answers.com/topic/composite-material&usg=ALkJrhiXKOxJJqaLtamynbG_YKf0Rp9YkQ [29.02.2012]
[144] http://www.bond-laminates.com/en/tepexr-materials/tepexr-benefits.html [29.02.2012]
[145] http://www.hbabio.cz/caste-otazky/#c176 [29.02.2012]
[146] http://cs.wikipedia.org/wiki/Metyl [29.02.2012]
[147] http://cs.wikipedia.org/wiki/Esterifikace [30.03.2012]
[148] http://cs.wikipedia.org/wiki/Ethanol [30.03.2012]
[149] http://cs.wikipedia.org/wiki/Alkoholy#D.C4.9Blen.C3.AD_alkohol.C5.AF [30.03.2012]
[150] http://solutions.3mcesko.cz/wps/portal/3M/cs_CZ/EU-ManufacturingIndustry/Home/ [30.03.2012]
[151] http://www.osu.edu/ [30.03.2012]

[152] http://www.ashland.com/ [30.03.2012]
[153] http://de.wikipedia.org/wiki/Propandiol [30.03.2012]
[154] http://www.petrecycling.cz/PLA_Sidel.htm [30.03.2012]
[155] http://cs.wikipedia.org/wiki/Epichlorhydrin [30.03.2012]
[156] http://www.metal2012.com/files/proceedings/metal_04/papers/172.pdf [30.03.2012]
[157] Vlček D.: *Technická dokumentace částí vyrobených z kompozitních materiálů,* Vysoké učení technické v Brně, dostupné na http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=39361 [01.03.2012]
[158] http://delta.fme.vutbr.cz/mikromechanika/kompozityA4.pdf [01.03.2012]
[159] http://en.wikipedia.org/wiki/Pyrex [01.03.2012]
[160] Hrazdíra M.: *Materiály na bázi uhlíku a jejich využití,* Vysoké ucení technické v Brne, Fakulta strojního inženýrství, Brno 2010, Bakalárská práce, dostupné na http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=29700 [01.03.2012]
[161] http://en.wikipedia.org/wiki/Creep_(deformation) [02.03.2012]
[162] http://nemat.zcu.cz/MN/Prednasky/Lecture%208/polymery_p%F8ehled.pdf [02.03.2012]
[163] http://vydavatelstvi.vscht.cz/knihy/uid_es-001/hesla/pseudoplasticita.html [02.03.2012]
[164] http://lekarske.slovniky.cz/pojem/biokompatibilita [02.03.2012]
[165] http://www.gurit.com/prepreg-and-sprint-products.aspx [02.03.2012]
[166] http://www.matnet.sav.sk/index.php?ID=1122 [02.03.2012]
[167] http://ketsrv.fel.zcu.cz/diagnostika/konference/Sbornik/Sekce4/95.pdf [02.03.2012]
[168] http://cs.wikipedia.org/wiki/Nanovl%C3%A1kno [02.03.2012]
[169] http://www.hobbystranky.cz/zajimavosti/nanovlakna-material-3-tisicileti [02.03.2012]
[170] http://www.techtydenik.cz/detail.php?action=show&id=3476&mark= [02.03.2012]
[171] http://aktualne.centrum.cz/ekonomika/penize/clanek.phtml?id=639520 [03.03.2012]
[172] http://technet.idnes.cz/ceska-firma-ma-druhy-vyrobek-z-nanovlaken-f1a-/tec_technika.aspx?c=A060823_080129_tec_checktech_vse [04.03.2012]
[173] http://www.nafigate.com/cs/app/article/detail/69818-o-nanovlaknech [05.03.2012]
[174] http://www.plasma.de/cz/glossary/447-0-funkcionalizace--ur269en-vlastnost.html [05.03.2012]
[175] http://centrum.tul.cz/centrum/centrum/3Aplikace/3.1_zaverecne_zpravy/[3.1.09].pdf [05.03.2012]
[176] http://cs.wikipedia.org/wiki/Canberra [05.03.2012]
[177] http://centrum.tul.cz/centrum/centrum/3Aplikace/3.2_publikace/[3.2.45].pdf [06.03.2012]
[178] http://centrum.tul.cz/centrum/centrum/3Aplikace/3.2_publikace/[3.2.51].pdf [06.03.2012]
[179] Pekárek J.: *Katodové nanostruktury v MEMS aplikacích,* Vysoké ucení technické v Brne, 2008 Diplomová práce, dostupné na http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=7132 [06.03.2012]
[180] Šeda M.: *Tlakový senzor typu MEMS využívající nanokompozity*, Vysoké ucení technické v Brne, 2008 Diplomová práce, dostupné na http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=7624 [06.03.2012]
[181] http://www.tyden.cz/rubriky/veda-a-technika/veda/uhlikove-nanotrubicky-by-mohly-

nahradit-poskozene-neurony_97249.html [06.03.2012]
[182] Cerný M.: *Polymerní nanokompozity - metody prípravy*, Vysoké ucení technické v Brne, 2010 Diplomová práce, dostupné na http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=26872 [07.03.2012]
[183] http://www.chemicke-listy.cz/docs/full/2010_03_138-146.pdf [08.03.2012]
[184] http://www.springerlink.com/content/51535322q5732777/ [08.03.2012]
[185] http://www.nafigate.com/cs/app/article/detail/69860-nanovlakna-pro-vysokofrekvencni-aplikace [08.03.2012]
[186] http://www.springerlink.com/content/51535322q5732777/ [08.03.2012]
[187] http://www.csnmt.cz/nanosekce/publikace/vyzkum-a-aplikace-mikrotechnologii-v-ceske-republice/ [09.03.2012]
[188] http://www.nafigate.com/cs/advanced-materials/app/news/detail/69764-nanovlakna-jako-citlive-senzory-vlhkosti [09.03.2012]
[189] http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925400511010793 [09.03.2012]
[190] http://www.nafigate.com/cs/energy/energy-storage/app/news/detail/69806-nanovlakenna-revoluce-v-bateriich [09.03.2012]
[191] http://www.dreamweaverintl.com/home/ [09.03.2012]
[192] http://www.techdaily.eu/articles/science/worlds-smallest-silicon-transistor-built-by-australian-scientists-140.html [09.03.2012]
[193] http://www.nafigate.com/cs/app/article/detail/69858-nanosvarovani-kovovych-nanovlaken-svetlem-pro-aplikace-v-elektronice [10.03.2012]
[194] http://engineering.stanford.edu/news/stanford-engineers-weld-nanowires-light [10.03.2012]
[195] http://www.nafigate.com/cs/app/article/detail/69844-nanovlakenne-nanogeneratory-elektrina-v-obleceni-nemusi-byt-jen-vize [11.03.2012]
[196] http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/nl9040719 [11.03.2012]
[197] Skřivan V.: *Kompozitní materiály v elektrotechnice*, ZČU Plzeň, 2010, Bakalářská práce, knihovna ZČU
[198] http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=38198 [11.03.2012]
[199] Sušír J.: *Aspekty určení stavu exponovaného dvousložkového kompozitu,* ZČU Plzeň, 2010, Disertační práce, knihovna ZČU
[200] Hevier D.: *Kompozity pro extrémní tepelné namáhání*, ZČU Plzeň, 2005, Diplomová práce, knihovna ZČU
[201] http://cs.wikipedia.org/wiki/Rezistivita [13.03.2012]
[202] http://cs.wikipedia.org/wiki/Permitivita#Relativn.C3.AD_permitivita [13.03.2012]
[203] http://cs.wikipedia.org/wiki/Dielektrikum [13.03.2012]
[204] http://www.directindustry.com/prod/zyvex-performance-materials/carbon-fiber-fabric- epoxy-resin-prepregs-63008-410151.html [13.03.2012]
[205] http://cs.wikipedia.org/wiki/Whisker [13.03.2012]
[206] http://en.wikipedia.org/wiki/Monocrystalline_whisker [13.03.2012]
[207] http://www.labara.cz/cs/vrstvene-izolanty/izolacni-desky/151-kartit-hp-2061[14.03.2012]
[208] http://www.labara.cz/cs/vrstvene-izolanty/izolacni-desky/150-textitr-hgw-20825[14.03.2012]
[209] http://www.labara.cz/cs/vrstvene-izolanty/izolacni-desky/154-sklotextit-g11-155dc[14.03.2012]
[210] http://www.janoud.cz/sub/jcueltech/09bTechnologie_plosnych_spoju.pdf[14.03.2012]
[211] http://epso.wz.cz/stahovani/sps/Technol_III-1DPS_SMT.pdf[14.03.2012]
[212] Kostka R.: *Upínací přípravek pro recyklaci PC desek,* Univerzita Tomáše Bati ve

Zlíně 2009 Bakalářská práce dostupné na http://dspace.knihovna.utb.cz/bitstream/handle/10563/10699/kostka_2009_bp.pdf?sequence=1 [14.03.2012]
[213] http://www.hexcel.com/products/aerospace/acf_carbonfibers&ei=o4M9T_TAC8jd4QSjoo2aCA&sa=X&oi=translate&ctresult&resnum=2&sqi=2&ved=0CC8Q7gEwAQ&prev=/search%3Fq%3DHexcel%2B(USA).%26hl%3Dcs%26biw%3D1024%26bih%3D505%26prmd%3Dimvns [15.03.2012]
[214] http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs_all.jsp?arnumber=5411947 [15.03.2012]
[215] http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs_all.jsp?arnumber=5729324[15.03.2012]
[216] http://en.wikipedia.org/wiki/Low-density_polyethylene[15.03.2012]
[217] http://www.novplasta.cz/hdpefolie.html?utm_source=Adwords&utm_medium=PPC&utm_campaign=hdpe[15.03.2012]
[218] http://en.wikipedia.org/wiki/Ethylene-vinyl_acetate[15.03.2012]
[219] Svoboda M.: *Obrábění elektroizolačních materiálů,* Vysoké Učetní Technické v Brně, 2009 Diplomová práce dostupné na http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=17204[16.03.2012]
[220] Starý J.: *Plošné spoje a povrchová montáž,* Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií VUT v Brně,dostupné na http://files.gamepub.sk/Bakalar/ET1/Plosne_spoje_a_povrchova_montaz.pdf [16.03.2012]
[221] http://ketsrv.fel.zcu.cz/diagnostika/konference/Sbornik/Sekce4/61.pdf
[222] http://www.havel-composites.com/clanky/4-Technologie/74-Vseobecny-a-zakladni-popis-materialu-pouzivanych-pri-vyrobe-kompozitu.html[18.03.2012]
[223] http://www.mphservis.cz/plasty/20-peek/57-peek-gf30-extrudovany/ [19.03.2012]
[224] http://zozei.sos-soubrno.cz/plosne-spoje-pajeni-a-technologie/ [20.03.2012]
[225] http://web.elchemco.cz/KAPTON.php [21.03.2012]
[226] Bariš M. :*Studium elektrických vlastností kompozitu,* VUT v Brně, BP 2009, dostupné na http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=35899 [21.03.2012]
[227] Ružička M. : *Hodnocení samozhásivých vlastností zakladních materiálu FR 4,* VUT v Brně, BP 2010, dostupné na http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=31288 [21.03.2012]
[228] http://www.vmplast.cz/polypropylen.php?s=60[21.03.2012]
[229] http://www.eppplasty.cz/new/pdf/TECHTRON_HPV_PPS.pdf[21.03.2012]
[230] http://web.elchemco.cz/silikonovy-neroztekavy-tixotropni-kaucuk-rtv-ochranu-desek-plosnych-spoju-elektroniky-elektronickych-soucastek-vlhkosti- sc4188.php [21.03.2012]
[231] http://www.sittech.cz/ptfe/teflon_informace.htm [21.03.2012]
[232] http://www.nafigate.com/cs/app/news/detail/69896-nanovlakna-z-pt-tio2 [23.03.2012]
[233] http://www.dribo.cz/pdf/CZ_Kompozitni_izolatory_VVN.pdf [23.03.2012]
[234] http://www.matnet.sav.sk/index.php?ID=1052 [23.03.2012]
[235] http://is.cuni.cz/studium/dipl_st/index.php?do=main&doo=detail&did=61454 [24.03.2012]
[236] http://zcu.cz/ntc/vysledky/sw/NTC-SW-12-09.html [25.03.2012]
[237] http://www.aldebaran.cz/bulletin/2004_49_vln.html [25.03.2012]
[238] http://3pol.cz/812-piezoelektrina-a-dalsi-elektromechanicke-jevy-i [25.03.2012]

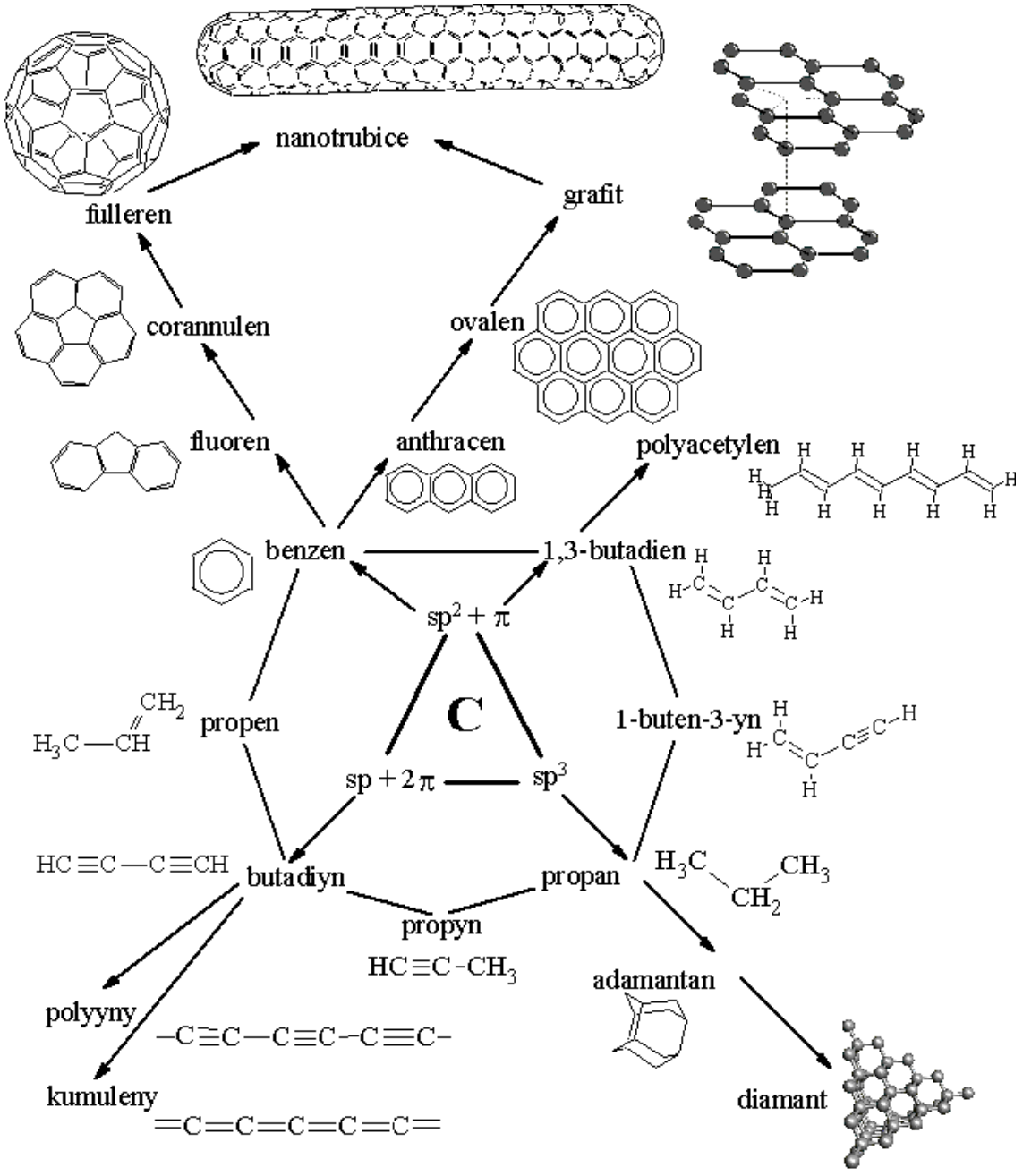
[239] http://fyzika.fs.cvut.cz/fzmt/FZMT_11.pdf [25.03.2012]
[240] Strejček J.: *Studium syntézy a struktury keramických materiálu pro energetické aplikace*, VUT v Brně, BP 2010, dostupné na http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=31012 [25.03.2012]
[241] Hradil A.: *Návrh mikroaktuátoru s využitím smart materiálu*, VUT v Brně, BP 2011, dostupné na http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=40145 [25.03.2012]
[242] http://katedry.fp.tul.cz/kfy/katedra/erhart/clanky/Elektro_3-2002_4.pdf [29.03.2012]
[243] http://www.fm.tul.cz/files/temata_KFY_PR_2006.pdf [29.03.2012]
[244] http://katedry.fp.tul.cz/kfy/katedra/erhart/clanky/Elektro_11-2002_4.pdf [29.03.2012]
[245] http://cs.wikipedia.org/wiki/Piezoelektrick%C3%A1_vl%C3%A1kna [29.03.2012]
[246] http://www.nafigate.com/cs/app/news/detail/69860-nanovlakna-pro-vysokofrekvencni-aplikace [29.03.2012]
[247] http://www.nafigate.com/cs/app/news/detail/69910-nanovlakenne-piezoelektricke-nanogeneratory [29.03.2012]
[248] http://www.crr.vutbr.cz/system/files/brozura_06_1112.pdf [29.03.2012]
[249] http://www.crr.vutbr.cz/system/files/prezentace_06_1112_1.pdf [29.03.2012]
[250] http://21stoleti.cz/blog/2011/03/23/technologie-a-budoucnost-chytre-materialy-ktere-meni-svet/ [29.03.2012]
[251] http://archiv.otevrena-veda.cz/users/Image/default/C2Seminare/MultiObSem/003.pdf [29.03.2012]
[252] http://en.wikipedia.org/wiki/Silicon_nitride [29.03.2012]
[253] http://vakspol.cz/lsvt06/zindulka_lsvt06_1.pdf [29.03.2012]
[254] http://www.shm-cz.cz/cs/produkty/pvd-povlaky [29.03.2012]
[255] http://www.informaworld.com/smpp/180445949-89168432/content~db=all~content=a930400175~frm=titlelink [31.03.2012]
[256] http://chemlabs.nju.edu.cn/Literature/materials/PMNT/13.pdf [31.03.2012]
[257] http://www.mmspektrum.com/clanek/materialy-a-technologie-z-jineho-sveta.html [30.03.2012]
[258] http://www.mmspektrum.com/clanek/za-keramikou-a-plasty.html [30.03.2012]
[259] Procházka J.: *Simulační modelování piezo-generátoru.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011, dostupné na http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=42721 [30.03.2012]
[260] http://www.t-ceram.com/CSVTS-2006.pdf [01.04.2012]
[261] http://tzs.kmm.zcu.cz/keramika2.pdf [01.04.2012]
[262] http://www.vscht.cz/sil/keramika/Ceramic_Technology/SM-Lect-10-C.pdf [01.04.2012]
[263] http://www.matnet.sav.sk/index.php?ID=1122 [01.04.2012]
[264] http://www.kmt.tul.cz/edu/podklady_kmt_bakalari/ZMI/06kompozityzmi.pdf [01.04.2012]
[265] http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1516-14392001000100004 [02.04.2012]
[266] Slabáková L.: *Šíření trhlin skloněných k rozhraní keramických laminátu*, Vysoke učeni technicke v Brně, Brno 2009, DP dostupné na http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=31152 [02.04.2012]
[267] Drdlik D. *Vrstevnate keramicke kompozitni materialy – připrava, struktura a*

Vlastnosti, Vysoke učeni technicke v Brně, Brno 2009, DP dostupné na http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=16791 [02.04.2012]
[268] http://cs.wikipedia.org/wiki/Sendvi%C4%8D_(lamin%C3%A1t) [02.04.2012]
[269] Hanousek P.: *Cermety a jejich efektivní využití*, Vysoké učení technické v Brně, Brno 2011 DP dostupné na http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=37881 [02.04.2012]
[270] http://www.kmm.zcu.cz/CD/content/4.html [02.04.2012]
[271] http://cs.wikipedia.org/wiki/Cermet [02.04.2012]
[272] Kavalír V.: *Řezná keramika a její efektivní využití,* Vysoké učení technické v Brně, Brno 2009 DP dostupné na http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=15854 [03.04.2012]
[273] http://www.ipm.cz/pokrocile-kovove-materialy-a-kompozity-na-bazi-kovu-ceitec-ufm-projekty-rolicer-zvyseni-spolehlivosti-a-zivotnosti-keramickych-soucasti-pomoci-viceurovnoveho-modelovani-degradace-a-poskozeni.html [03.04.2012]
[274] http://www.aldebaran.cz/bulletin/2010_38_nob.php [03.04.2012]
[275] http://www.vscht.cz/ipl/predmety/Prezentace%20nanomaterialy%202/NANO_1.pdf [03.04.2012]
[276] Mynarčík M.: *Bimodularita termoplastů a krátkovláknových kompozitů,* Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2011 Diplomová práce dostupné na http://dspace.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/18110/mynar%C4%8D%C3%ADk_2011_dp.pdf?sequence=1 [05.04.2012]
[277] http://www.ft.vslib.cz/depart/ktm/?q=cs/uhlik [05.04.2012]
[278] http://cs.wikipedia.org/wiki/Matrice_vl%C3%A1knov%C3%BDch_kompozit%C5%AF [07.04.2012]
[279] Hofírková L.: *Lomová houževnatost kompozitu s polymerní matricí*, Vysoké učení technické v Brně, Brno 2009, DP dostupné na http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=16854 [09.04.2012]
[280] http://en.wikipedia.org/wiki/Copolymer [11.04.2012]
[281] http://www.library.sk/arl-cav/epca/new-diamond-and-nano-carbons-2-ndnc-2008 [11.04.2012]
[282] http://repository.lib.polyu.edu.hk/jspui/bitstream/10397/381/1/single-crystal_03.pdf [11.04.2012]
[283] http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/18238611 [11.04.2012]
[284] http://cs.wikipedia.org/wiki/Keramick%C3%A1_textiln%C3%AD_vl%C3%A1kna#Neoxidov.C3.A1_vl.C3.A1kna [11.04.2012]
[285] http://www.isoma.cz/vlastnosti-materialu/pro-elektrickou-izolaci [20.04.2012]
[286] http://www.happymaterials.com/clanek/Smart-materialy [20.04.2012]
[287] http://www.khsova.cz/01_aktuality/nanotechnologie.php?datum=2009-03-18 [20.04.2012]

Přílohy

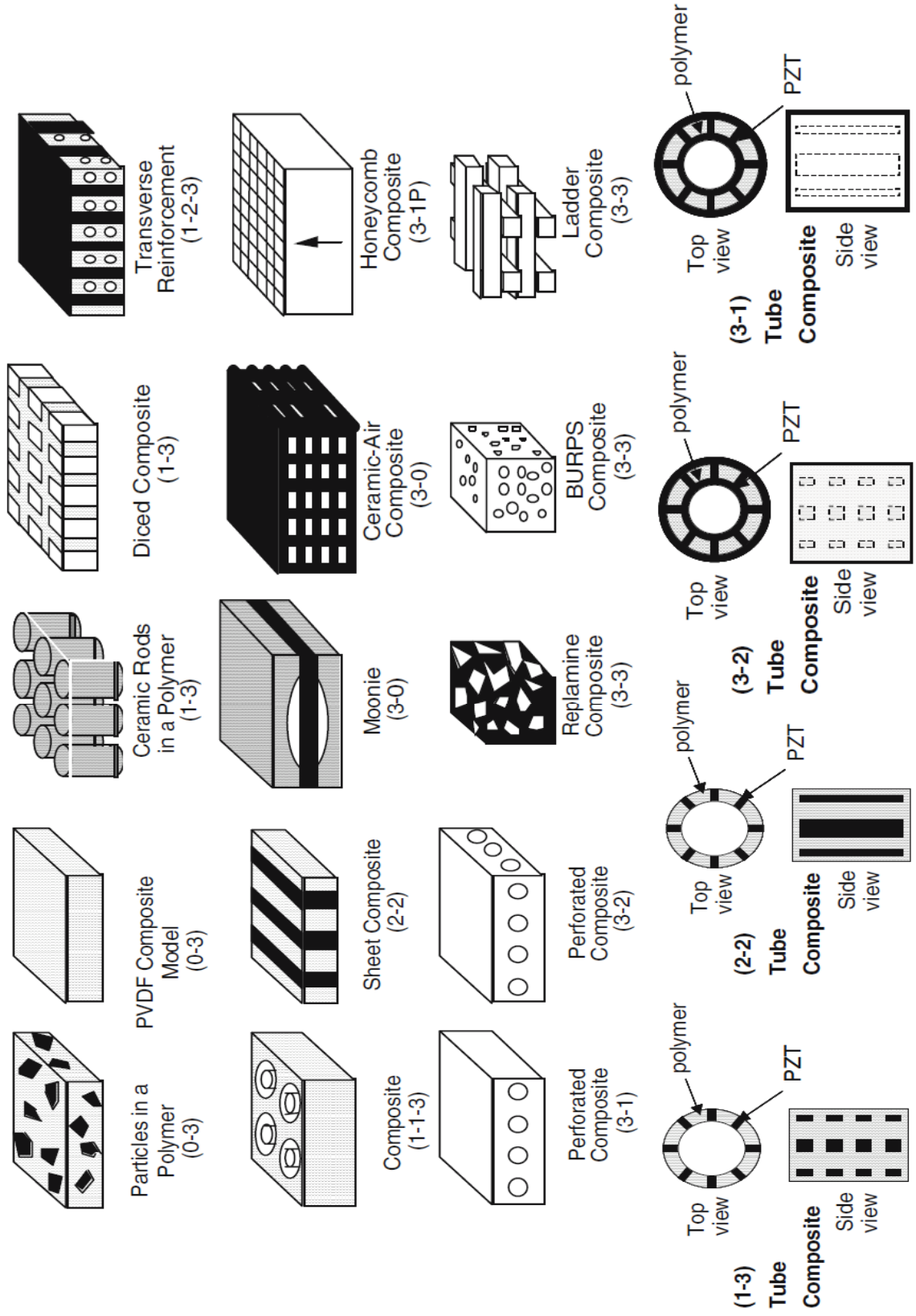
Příloha 1. Diagram vlivu druhu vazeb mezi atomy na vznik modifikací uhlíku.
Příloha 2. Piezoelektrické kompozity.
Příloha 3. Základní vlastnosti některých skel.
Příloha 4. Přehled vlastností materiálů pro elektrickou izolaci.
Příloha 5. Přehled vlastností materiálů pro elektrickou izolaci.
Příloha 6. Vlastnosti některých materiálů, které mohou být použité jako matrice nebo výztuž

Příloha 1 Diagram vlivu druhu vazeb mezi atomy na vznik modifikací uhlíku.



Obr. 31: Diagram vlivu druhu vazeb mezi atomy na vznik modifikací uhlíku [178]

Příloha 2. Piezoelektrické kompozity.



Obr. 32: Piezoelektrické kompozity [259]

Příloha 3.
Tabulka 6: Základní vlastnosti některých skel, které mohou být použita v kompozitech

Druh skla	**Vnitřní rezistivita (280 °C) ρi [Ωm]**	**Pomerná permitivita (1 MHz) εr [-]**	**Ztrátový činitel (20 °C, 1 MHz)**
Křemenné	10^{10}	3,78	2
Borito - křemičité	$10^{5} – 10^{7}$	4,6 – 6,9	15 - 70
Olovnaté	$10^{5} – 10^{8}$	8,9	8 - 15
Alkalické	10^{5}	6,5	81 - 100

Pozn.: Tabulka 6 je převzata [3] a upravena.

Příloha 4
Tabulka 7: Přehled vlastností materiálů pro elektrickou izolaci

Složení pryskyřice + nosná část		**Polyester skelná matrice**	**Polyester skelná matrice**	**Polyester skelná matrice**	**Epoxid skelná matrice**	**Epoxid skelná matrice**
Tloušťka desky	mm	0,8 – 60	0,8 – 60	0,8 – 60	3 – 102	0,2 – 150
Barva		červená, bílá	béžová	červená	žlutá	zelená
Mechanické vlastnosti						
Pevnost v tahu	MPa	70	85	100	250	300
Pevnost v ohybu	MPa	130	200	210	400	450
Pevnost v tlaku	MPa	230	250	350	450	420
Vrubová houževnatost	J / cm2	4,7	6,3	5,0	9,0	5,0
Modul pružnosti v ohybu	MPa	8 000		10 000	18 000	24 000
Elektrické vlastnosti						
Izolační odpor	Ω	1 x 107	1,45 x 1014	1 x 107	1 x 1012	1 x 1012
Elektrická pevnost	kV / mm	12	19,7	11	15	18
Průrazné napětí	kV	60	50	60	55	80
Odolnost proti plazivým proudům	V	600	500	500	600	350
Odolnost proti el. oblouku	sec	180	120	175	180	

Pozn.: Tabulka 7 je převzata [285] a upravena.

Příloha 5.

Tabulka 8: Přehled vlastností materiálů pro elektrickou izolaci

Složení pryskyřice + nosná část		**Epoxid papír**	**Epoxid papír + skelná tkanina**	**Fenol bavlněná tkanina**	**Fenol bavlněná tkanina**	**Silikon slídový papír**	**Silikon slídový papír**
Tloušťka desky	mm	0,8 – 150	0,8 – 150	0,5 – 100	0,2 – 300	0,2 – 2	3 – 80
Barva		žlutá	bílá	hnědá	žluto hnědá	stříbrná	stříbrná
Mechanické vlastnosti							
Pevnost v tahu	MPa	100	130	90	88		
Pevnost v ohybu	MPa	150	300	140	135	220	580
Pevnost v tlaku	MPa	235		300	300		450
Vrubová houževnatost	J / cm2			14,0	12,0		
Modul pružnosti v ohybu	MPa	7 500	12 000	8 800	8 800		
Elektrické vlastnosti							
Izolační odpor	Ω	1 x 1011	1 x 1012	2 x 107	1 x 108		
Elektrická pevnost	kV / mm	8	9	1,5	3	20	23
Průrazné napětí	kV	50	60	10	24		
Odolnost proti plazivým proudům	V	400	250	150	200	600	
Odolnost proti el. oblouku	sec						220

Pozn.: Tabulka 8 je převzata [285] a upravena.

Příloha 6.

Tabulka 9: Vlastnosti některých materiálů, které mohou být použité jako matrice nebo výztuž

Vlastnosti		**Matrice**				**Výztuž**		
Veličína	**Rozměr**	**Al**	**Ti**	**Co**	**Cu**	**Mo**	**W**	**Ta**
Hustota	**kgm**	2700	4500	8800	8890	10200	19100	16700
Teplota tání	**° C**	658	1725	1495	1083	2622	3400	2996
Měrný elektrický odpor	**Ωmm²m⁻¹**	0,027	0,435	0,056	0,018	0,051	0,053	0,195
Teplotní vodivost	**Wm⁻¹ °C⁻¹**	209		69	393	146	163	56
Mez pevnosti v tahu	**MPa**	70 - 180	560-880	260 - 700	300 - 400	700 - 800	1400 - 2500	900 - 1200

Pozn.: Tabulka 9 je převzata [3] a upravena.