

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Perspektivy použití nanodielektrik v elektrotechnice

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

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Radovan WOLF**
Osobní číslo: **E10N0049K**
Studijní program: **N2644 Aplikovaná elektrotechnika**
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**
Název tématu: **Perspektivy použití nanodielektrik v elektrotechnice**
Zadávající katedra: **Katedra elektroenergetiky a ekologie**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Shrňte současný stav v oblasti technologií a materiálů používaných pro izolační podsystem elektrických strojů točivých a netočivých.
2. Definujte termín "nanotechnologie" a proveďte rozbor využití těchto technologií v různých oblastech lidského života.
3. S pomocí aktuální zahraniční literatury proveďte analýzu možností aplikace nanodielektrik v elektroizolační technice.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah pracovní zprávy: 30 - 40 stran

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická


Seznam odborné literatury:

1. Prnka, T., Šperlink, K. : Nanotechnologie, Česká společnost pro nové materiály a technologie, 2004, ISBN 80-7329-070-7
2. Elektronické informační zdroje, databáze SCIENCE DIRECT, Interscience-Wiley apod.


Vedoucí diplomové práce: Doc. Ing. Radek Polanský, Ph.D.
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




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

V Plzni dne 17. října 2011

Anotace

Předkládaná diplomová práce se zabývá nanodielektriky a jejich uplatněním v izolační technice. Rekapituluje současný stav v izolačních materiálech a technologiích. Definuje pojem nanotechnologie a zabývá se uplatněním nanotechnologií v různých oblastech lidské činnosti, mj. v oblasti elektroizolačních technologií a materiálů.

Klíčová slova

Izolant, dielektrikum, izolační materiály, nanotechnologie, nanomateriály, nanokompozit, nanodielektrika

Abstract

The master thesis work deals with the nanodielectrics and their application in the isolation technique. Sums up the current state of the insulating materials and technologies. Defines the concept of nanotechnology and discusses the application of nanotechnology in various fields of human activity in areas such as technology and electrical insulation materials.

Key words

Insulator, dielectric, isolation materials, nanotechnology, nanomaterials, nanocomposites, nanodielectrics

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 vypracoval 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, je legální.

V Plzni dne 7.5.2012

Jméno příjmení

.....

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval celému pedagogickému sboru Fakulty elektrotechnické ZČU v Plzni za získání všech odborných znalostí během mého studia.

Obsah

OBSAH	7
ÚVOD	8
1 TECHNOLOGIE A MATERIÁLY POUŽÍVANÉ V SOUČASNOSTI PRO IZOLAČNÍ PODSYSTÉMY TOČIVÝCH A NETOČIVÝCH ELEKTRICKÝCH STROJŮ	9
1.1 IZOLANTY, DIELEKTRIKA A JEJICH VLASTNOSTI	9
1.2 PŘEHLED MATERIÁLŮ POUŽÍVANÝCH PRO IZOLAČNÍ PODSYSTÉMY EL. STROJŮ	13
1.2.1 Slída a materiály z ní vyráběné	13
1.2.2 Kompozitní materiály	14
1.2.3 Nomex	16
1.2.4 Sklo	16
1.2.5 Plasty – syntetické makromolekulární látky	16
1.2.6 Kapalné izolanty	21
1.2.7 Elektrotechnické laky	22
1.2.8 Plyné izolanty	22
1.3 IZOLAČNÍ SYSTÉMY TOČIVÝCH A NETOČIVÝCH ELEKTRICKÝCH STROJŮ	23
1.3.1 Izolační systémy točivých elektrických strojů	23
1.3.2 Izolační systémy netočivých elektrických strojů	25
1.4 SHRNUTÍ SOUČASNÉHO STAVU	26
2 NANOTECHNOLOGIE	27
2.1 ÚVOD DO NANOTECHNOLOGIE	27
2.2 NANOTECHNOLOGIE V PŘÍRODĚ	27
2.3 POČÁTKY HLEDEJME V HISTORII	29
2.4 NANOOBJEKTY A MATERIÁLY	31
2.5 JEDNOTLIVÉ NANOMATERIÁLY A JEJICH VYUŽITÍ V PRAXI	33
2.5.1 Nanočástice zlata a stříbra	33
2.5.2 Nanočástice oxidu křemičitého, oxidu titaničitého, oxidu železitého a hydroxyapatitu	33
2.5.3 Magnetické nanočástice	34
2.5.4 Polymerní nanovlákná	34
2.5.5 Nanoporézní materiály	35
2.5.6 Uhlíkové nanomateriály	35
2.6 APLIKACE NANOTECHNOLOGIE	39
3 APLIKACE NANODIELEKTRIK V IZOLAČNÍ TECHNICE	41
3.1 CO JSOU NANODIELEKTRIKA?	41
3.2 NANODIELEKTRIKA A JEJICH APLIKACE V IZOLAČNÍ TECHNICE	43
ZÁVĚR	45
POUŽITÁ LITERATURA	46

Úvod

V současné době, kdy dochází k čím dál rychlejšímu rozvoji v oblasti elektrotechniky, vyvstává potřeba nalézat nová řešení a uplatňovat je v praxi. Cílem těchto řešení je mj. zvýšit efektivitu, spolehlivost a hospodárnost konstruovaných zařízení. Jednou z možností je např. miniaturizace, která umožní konstruovat elektrotechnická zařízení s větším počtem konstrukčních prvků než dosud, což klade zvýšené nároky na spolehlivost těchto zařízení. Z tohoto důvodu probíhá intenzivní výzkum elektroizolačních materiálů a dielektrik. Izolanty a dielektrika mají své specifické vlastnosti dané svým složením a stavbou a nenabízí již příliš možností pro další vylepšení požadovaných parametrů. Jako jedna z možností se nabízí využití nanomateriálů namísto v současnosti používaných izolantů.

Nanomateriály se dnes již uplatňují v mnoha oblastech lidské činnosti. Díky své struktuře, která se skládá z částic velikosti několika desítek nanometrů, mají tyto materiály unikátní vlastnosti a schopnosti. Na druhou stranu použití nanomateriálů v izolační technice je stále ještě problematické, protože doposud nejsou prozkoumány např. všechny jevy, ke kterým dochází na rozhraní dvou různých materiálů matrice a plniva.

Předkládaná práce se zabývá možnostmi uplatnění nanomateriálů v elektroizolační technice. Shrnuje současnou situaci v oblasti izolačních materiálů používaných v elektrických strojích. Dále definuje pojem nanotechnologie a zabývá se uplatněním nanotechnologií a nanomateriálů v různých oblastech lidské činnosti se zaměřením na současný výzkum vhodných nanomateriálů a možnosti jejich aplikací v elektroizolační technice.

1 Technologie a materiály používané v současnosti pro izolační podsystémy točivých a netočivých elektrických strojů

Elektrické stroje jsou zařízení, která provádí přeměnu elektrické energie na mechanickou, tepelnou, případně na elektrickou o jiných parametrech. Z hlediska způsobu přeměny energie rozeznáváme elektrické stroje **točivé**, což jsou různé elektromotory, generátory apod., a dále **netočivé**, což jsou transformátory. Každý elektrický stroj se skládá z elektricky vodivé a z magneticky vodivé části. Pro správnou funkci celého stroje je nutno vzájemně odizolovat jednotlivé elektricky vodivé části s různým elektrickým potenciálem. K tomuto účelu se používají elektricky nevodivé materiály- **izolanty** a **dielektrika**. [1]

1.1 Izolanty, dielektrika a jejich vlastnosti

Izolant je čistě pasivní prvek sloužící k zabránění průchodu proudu, naproti tomu **dielektrikum** po vložení do elektrického pole vykazuje schopnost tvorby vlastního elektrického pole, je schopno polarizace a má specifické vlastnosti. Nicméně z matematického hlediska je izolant pouze podmnožinou množiny dielektrik. Dielektrika se vyskytují ve všech skupenstvích, mají různou strukturu a vnitřní stavbu. Jejich vlastnosti jsou popisovány jednak z mikroskopického hlediska a jednak z hlediska makroskopického. Makroskopickým hlediskem je určena jako nejdůležitější vlastnost **relativní permitivita** - ϵ_r , která charakterizuje dielektrikum a stanovuje míru jeho polarizace. Vyjadřuje vliv elektrického pole na elektrický stav izolantu. Je závislá na druhu polarizace, dále na vnitřní stavbě a na polarizovatelnosti atomů a molekul. V závislosti na teplotě a kmitočtu, popř. i na intenzitě elektrického pole, se relativní permitivita může měnit. V případě makroskopického hlediska nezkoumáme vnitřní strukturu ani vnitřní děje, u této polarizace jsou sledovány vázané náboje na povrchu materiálu a jejich následné projevy jako dipólový moment dielektrika. Naproti tomu u mikroskopického hlediska je polarizace sledována uvnitř materiálu a tento jev je vysvětlován jako natočení dipólových momentů v materiálu do směru působícího elektrického pole. [2,3,4,5]

V ideálním případě by pro účely izolační techniky bylo vhodné použití materiálů s nulovou elektrickou vodivostí, v reálu však použitý materiál obsahuje různé nečistoty a příměsi. Jeho schopnost vzájemně oddělit vodivé části je dána mírou volnosti pohybu elektrických nábojů přítomných v materiálu a jejich množstvím. Z důvodu porovnatelnosti

jednotlivých vzorků materiálů a stanovení elektrické vodivosti se používají hodnoty **elektrického měrného odporu** (rezistivita – ρ [$\Omega \cdot m$]) a **měrné elektrické vodivosti** (konduktivita – γ [Sm^{-1}]), pro izolační materiály je její hodnota $< 10^{-9}$ [Sm^{-1}]. Izolační vlastnosti konkrétních materiálů jsou dále závislé na okolních podmínkách, jako např. teplotě, tlaku apod. Některé izolanty se mohou změnou těchto podmínek chovat jako vodiče. [2]

Dielektrické ztráty vznikají jednak polarizacemi a dále zahříváním dielektrika vlivem částečné vodivosti izolantu v elektrickém poli tzv. “prosakujícím proudem”. Míra těchto dielektrických ztrát je sledována zkouškou na ztrátový činitel. Sledované hodnoty jsou vztaženy jednak k počáteční hodnotě, dále k násobku jmenovitého napětí, k přírůstku pro teplotu okolí i pro teplotu třídy příslušné izolace. Normy předepisují způsoby zkoušení mezní hodnoty, jiné specifikují vlastní zkoušku (předmět zkoušky, podmínky, zařízení apod.), meze jsou dohodnuty na základě konkrétního požadavku. [5,6]

Jednou z nejdůležitějších vlastností izolačních materiálů je **elektrická pevnost**. Tato vlastnost není konstantní pro daný materiál, ale je ovlivněna množstvím faktorů, např. vlhkostí, zvýšenou teplotou nebo např. vzduchovými bublinami v materiálu. Ověření tohoto parametru se provádí tzv. mezioperačním zkušebním napětím (dle EN 60034-1) odvozeným z finálního jmenovitého napětí. Normou definované průrazné napětí je určeno tak, aby i při omezeném počtu zkoušek získaná hodnota byla jednoznačně definována. Z hlediska jevů probíhajících v izolačním materiálu dochází k průrazům tepelným a elektrickým. Tepelné jsou způsobeny zahříváním izolačního materiálu ztrátovým teplem. V okamžiku, kdy je ztrátové teplo vyšší než teplo odvedené do okolí, dochází k poškození izolačního materiálu – tepelnému průrazu. Naproti tomu k elektrickému průrazu dochází uvolněním elektronů z vazeb silami elektrického pole. V izolačních materiálech se vlivem různých činitelů mechanismy průrazů navzájem ovlivňují, ale nikdy nedochází k čistě tepelnému, nebo elektrickému průrazu. [5,6]

Mechanické vlastnosti (pevnost v ohybu, modul pružnosti, tažnost při porušení, aj.) určují odolnost vinutí vůči mechanickému namáhání ve výrobě při navíjení a v provozu na zkratovou odolnost. Zkušenosti z provozu, zkoušky na strojích, např. náhlý zkrat na svorkách, statické i dynamické zkoušky na modelech tyčí určují meze. Po provedení analýzy výsledků lze stanovit meze mechanických vlastností, jejichž dodržením se ve výrobě i v provozu výrazně redukuje riziko porušení izolace. [6]

Tepelné vlastnosti jsou nejdůležitějším parametrem izolačních materiálů. Pro chod elektrických strojů jsou podstatné předpoklady, za nichž stroj pracuje. Konstrukce izolací jsou navrhovány tak, aby při provozních podmínkách splňovaly svůj účel po dostatečně dlouhou

dobu. Působením různých činitelů, ale především teploty, dochází ke stárnutí izolace – izolace ztrácí svoje původní vlastnosti. Z tohoto důvodu je primárním rysem třídění izolantů provozní teplota stroje, která je v tomto případě rozhodným činitelem. Trvalá tepelná odolnost je vyjádřena maximálně přípustnou teplotou, při které může izolace pracovat přiměřeně dlouhou dobu. Na základě této vlastnosti jsou izolační materiály klasifikovány podle teplotních tříd, třídění materiálu je upraveno normou ČSN EN 60085 „Elektrická izolace – teplotní klasifikace“. Základní terminologie – **Elektroizolační materiál (EIM)** – „látka se zanedbatelně nízkou elektrickou vodivostí nebo kombinace takových látek, používaná v elektrických zařízeních k oddělení vodivých částí s různým elektrickým potenciálem“. **Elektroizolační systém (EIS)** – „izolační struktura obsahující jeden nebo více elektroizolačních materiálů s přidruženými vodivými částmi, použitá v elektrickém zařízení“. **Teplotní třídou (EIM/EIS)** „je číselné označení, které je rovno maximální teplotě použití ve stupních Celsia, pro kterou je EIM/EIS vhodný“. Dále je pak zaveden **relativní index teplotní odolnosti (RTE)** – „číselná hodnota teploty ve stupních Celsia, při níž má materiál po předpokládanou dobu svého života uspokojivé vlastnosti v porovnání se standardním známým materiálem.“ Teplotní třída celého izolačního systému je pak dána výslednou kombinací jednotlivých izolačních materiálů. (Rozdělení teplotních tříd viz Tab. 1) [2,5]

Relativní index [°C] (teplotní odolnost) RTE	Teplotní třída	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	

Tab. 1 Teplotní klasifikace izolantů [2]

Pro začlenění materiálů do individuálních skupin v praxi používáme tzv. urychlenou

zkoušku, což znamená, že při několika různých teplotách kontrolujeme konkrétní zvolené vlastnosti až k rozhodující změně pozorované vlastnosti. Na základě předchozích měření a provozních zkušeností jsou stanoveny meze. [2,6]

Materiály třídy 70 – organické materiály- dřevo, papír, bavlna bez další úpravy, používají se velmi zřídka. [2]

Materiály třídy 90 – organické materiály ošetřené běžnými impregnanty, plasty a PVC jako izolace vodičů a izolační trubičky. [2]

Materiály třídy 105 - organické materiály přírodní i syntetické, lakované nebo s vhodným impregnantem, syntetické látky na bázi celulózy, lesklá, drážková, transformátorová lepenka, lepicí pásky na bázi papíru, lakovaná polyesterová tkanina, apod. [2]

Materiály třídy 120 – organické materiály impregnované fenolickou nebo fenolformaldehydovou pryskyřicí, pro drážkovou izolaci nízkonapěťových strojů kombinace PET (polyetylen) folie a elektrotechnické lepenky. [2]

Materiály třídy 130 – většinou anorganické materiály, jako skleněná vlákna, asbest, sulfátový papír v kombinaci s epoxidy a fenolickými pryskyřicemi, skleněné rohože, materiály z polyesterové pryskyřice. [2]

Materiály třídy 155 – na základě zkoušek a dlouhodobých zkušeností byly upřesněny materiály pro tuto teplotní třídu – využívají se např. skleněná vlákna, slídový papír, PET (polyetylen), PEN (polypropylen) folie, aramidový papír, epoxidové a novolakové pryskyřice. [2]

Materiály třídy 180 – aramidy, polyimidy, polyestery, slída, slídový papír, jako pojiv se používá silikonová pryskyřice a modifikované polyesterové pryskyřice. [2]

Materiály třídy 200 – sklo, asbest, aramidové papíry spolu se silikonovými pojivy, impregnační laky na bázi polyesteralkydů.[2]

Materiály třídy 220 – sklo ve formě vláken, asbest, aramidové papíry, silikonová pojiva. [2]

Materiály třídy 250 – polyimidy, aramidy, PTFE (polytetrafluorethylen), materiály třídy 220 s novými pojivy. [2]

Silikátové, bezsilikátové, oxidové a bezoxidové keramické materiály (rovněž např. polyimidy se specifickými vlastnostmi) – v těchto případech hovoříme o materiálech s vyšší teplotní odolností, než určují dané skupiny. [2]

Následující kapitola se zabývá vlastnostmi a použitím výše zmíněných materiálů.

1.2 Přehled materiálů používaných pro izolační podsystemy el. strojů

Jak již bylo výše zmíněno jsou izolační materiály nepostradatelnou součástí elektrických obvodů. Tyto materiály lze rozdělit do několika skupin na základě chemického složení, skupenství, fyzikálních vlastností, příp. typem provedení. Jejich aplikace je odvislá od požadovaného určení.

1.2.1 Slída a materiály z ní vyráběné

Slída patří do skupiny krystalických minerálů a nalezneme ji v přírodě v mnoha podobách. Odolává vysokým teplotám a četným chemikáliím. Je snadno štípatelná na tenké lístky o síle řádově několik mikrometrů. Má malé dielektrické ztráty. Silné kovalentní vazby mezi atomy kyslíku a křemíku ve vrstvách oxidu křemičitého zajišťují slídě vynikající elektroizolační vlastnosti. Do dosažení kalcinační teploty má neměnné vlastnosti, ale po jejím překročení své vlastnosti mění, neboť u ní v důsledku toho dochází k odvodnění. Jako izolační materiál je slída využívána v okruhu nižších teplot než je teplota kalcinační. Slída je využívána jako izolant zejména v oblasti vysokonapěťové izolační techniky. Pro účely elektrotechniky používáme pouze dva druhy s odlišnými vlastnostmi - muskovit a flogopit. Draselná slída (muskovit) $\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{F},\text{OH})_2$ je světle hnědé až světle zelené barvy, má kalcinační teplotu 700 – 800°C. Měrný vnitřní odpor závisí na směru vrstev, na teplotě a na vlhkosti. Má mimořádně dobré elektroizolační vlastnosti a používá se na dielektrika kondenzátorů, dále na izolace náročných tepelně i elektricky namáhaných elektrických strojů. Naproti tomu hořečnatá slída (flogopit) $\text{KMg}_3\text{AlSi}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ je jantarové, zlatavé až šedé barvy s kalcinační teplotou 900 – 1000°C. Oproti muskovitu je měkčí a ohebnější. Má horší elektroizolační vlastnosti, a proto se používá na méně náročné účely, zejména na izolace elektrických strojů, nebo tepelných spotřebičů. [2,4,5]

Pro účely elektroizolačních materiálů mají největší význam dvě skupiny materiálů, jejichž základem je slída: **mikanity** a **materiály z rekonstruované slídy**. [2]

Mikanity jsou deskové slídové izolanty vyráběné vrstvením a lepením štípané slídy vhodným pojivem za vyšší teploty a při zvýšeném tlaku. [2,5]

Mikanit komutátorový je hmota vzniklá slisováním slídových lístků a šelakového pojiva. Tímto postupem vzniknou tvrdé kompaktní desky. Svě využití naleznou v oblasti mezilamelové izolace méně namáhaných komutátorů. [2,5]

Formikanit – hmota vyrobená z týchž složek jako mikanit komutátorový. Formikanit

své využití nalézá při zhotovování komutátorových manžet či dalších tvarovaných produktů. Jedná se o flektivní, při intenzivnějších teplotách poddajnou a lepkavou hmotu. Za zvýšeného tlaku ve formách při teplotě 130 °C se provádí tvrzení výrobků. [2,5]

Ohebný mikanit – jedná se o materiál, který je za běžné teploty pružný a poddajný. Vyroběn je ze slídových lístků, skleněné tkaniny a kalcinovaného slídového papíru. Všechny jeho součásti jsou spojeny pojivem. Vrstva slídových lístků, která z obou stran obklopuje slídový papír, a na které je z každé strany výrobků skleněná tkanina, tvoří vnitřní vrstvu tohoto materiálu. Je prosycen modifikovanou polyvinylbutyralovou pryskyřicí. Prokládají se jím vodiče a izolují oblé části strojů pro třídu 130 (B). Vytvrzuje se po impregnaci celého vinutí. [2,5]

Mikafolium – hmota vzniklá spojením slídových lístků a podkladového speciálního celulóзовého papíru prostřednictvím přírodní pryskyřice (šelaku). Tento materiál využíváme na izolování statorového i rotorového vinutí elektrických strojů do provozního napětí 6 kV, ve třídě 130 (B). Zpracovává se nažehlováním na cívky a následným vytvrzením za zvýšené teploty a tlaku v lisu nebo po založení při vytvrzování impregnace vinutí. V současné době se tyto materiály již ve velké míře nepoužívají. Pokud ano, pouze výjimečně pro speciální aplikace. [2,5]

Materiály z rekonstruované slídy jsou hmoty, které se sestávají z podkladového materiálu, slídového papíru a pojiva. K jejich výrobě se používá odpad vzniklý při zpracování slídy. Lístky slídy se působením tepelných, chemických a mechanických vlivů rozpadnou na drobné šupinky, které jsou po smísení s vodou zpracovány na speciálním papírenském stroji. Vzniklá folie – Remika – je ohebná, ale má malou pevnost v tahu, z tohoto důvodu se přidává malé množství pojiva, případně se lepí na vhodný podklad. Dle konkrétní specifikace si individuální výrobci vytvářejí názvosloví, technické detaily a chemické složení pojiv. [2,5]

1.2.2 Kompozitní materiály

V elektrotechnice jsou kompozitní materiály velmi často využívány, neboť umožňují použití technologie s konkrétními mechanickými a elektrickými vlastnostmi. Kompozitní materiály se skládají z nosných složek, pojiv a plniv. Mezi nosné složky patří papír, skleněná, bavlněná tkanina, polyesterová, polyimidová folie. Mezi pojiva řadíme epoxidovou, polyesterovou a silikonovou pryskyřici, plnivo představuje převážně slídový papír. [2]

Přestože výrobci vycházejí z několika základních způsobů provedení, konkrétní materiály

jsou nabízeny pod různými názvy. Z tohoto důvodu se při výběru materiálu řídíme katalogem konkrétního výrobce. Principiálně tyto materiály vychází z následujících popsaných variant. [2]

1) **Tvrzené papíry** se uplatňují převážně na konstrukční prvky. Mezi sebou se odlišují mechanickými a elektrickými vlastnostmi na bázi užití pryskyřice, nejrozšířeněji je využívána fenolformaldehydová. Kartit (Pertinax) desky jsou vyrobeny z celulóзовého papíru, jako výztuže a formaldehydové živice jako pojiva. Kartit (Pertinax) desky se používají např. při výrobě transformátorů ve formě izolačních mezistěn. [2,5,7]

2) **Tvrzené tkaniny** – oceňujeme jejich mechanické vlastnosti, svými tepelnými a elektrickými vlastnostmi jsou podobné tvrzeným papírům. Tvrzené tkaniny se mezi sebou odlišují konkrétními vlastnostmi, neboť k jejich výrobě používáme rozličné tkaniny a pojiva. I v těchto případech se nejběžněji používá fenolformaldehydová pryskyřice. Textit je vyroben z bavlněné tkaniny jako výztuže a krezolformaldehydové pryskyřice jako pojiva. Má velmi dobré mechanické a kluzné vlastnosti, dobrou odolnost proti slabým kyselinám i při vyšší teplotě a velmi dobré elektroizolační vlastnosti. [2,5,8]

3) **Tvrzené skleněné tkaniny** využitě jako nosný materiál mají velmi dobré mechanické a elektrické vlastnosti. Jejich uplatnění vyplývá zejména z velké tepelné odolnosti, malé navlhavosti, nehořlavosti a časové stálosti vlastností. Odlišují se vzájemně typem užitého pojiva (epoxidová pryskyřice, polyestery, silikonová pryskyřice). Sklotextit je vrstvený materiál ve tvaru desek, vyrobený z upravené skelné tkaniny jako výztuže a epoxirezolové živice. Kromě dobrých mechanických a elektroizolačních vlastností má i vysokou klimatickou odolnost. [2,5,9]

4) **Tvrzené vrstvené dřevo** - k jeho výrobě využíváme přírodní bukové dřevo. Skládané vrstvy jsou seskládány v rozličných směrech dle let, vyplněné pryskyřicí a následně vytvrzeny. Tyto materiály jsou využívány ke konstrukčním prvkům ve výrobě transformátorů, neboť velmi dobře absorbují olej. Mají vlastnosti podobné tvrzeným papírům a tkaninám. Tvrzené dřevo se vyrábí podle normy DIN 7707. Tvrzené vrstvené dřevo Lignostone (jiné používané názvy umělé dřevo, Panzerholz) je vrstvený, pod tlakem vytvrzený materiál z přírodního bukového dřeva, spojující přednosti přírodního materiálu a syntetických pryskyřic. Vyrábí se v mnoha provedeních s rozdílnými vlastnostmi tak, aby mechanické ostatní a fyzikální i elektroizolační vlastnosti vyhověly požadavkům konstruktérů pro dané aplikace. [2,5,10]

1.2.3 Nomex

Jedná se o syntetický materiál (aromatický nylon), metavarianta paraamidu kevlaru (aromatického polyamidu), vyrobený papírenským postupem a zpevněný kalandrováním. Má vynikající mechanické (z důvodu para orientace při molekulárním narovnání poskytuje zároveň vysokou mechanickou pevnost) a elektrické vlastnosti, dále ohnivzdornost a tepelnou odolnost. Navíc se nadmíru dobře snáší s veškerými hmotami na bázi pryskyřic a laků upotřebených v elektrotechnice, velmi vhodné využití nalézá u elektrických strojů točivých i netočivých. Vzhledem ke svým vlastnostem se velmi dobře se laminuje do několika vrstev a slučuje s dalšími materiály. Dodávané provedení se odlišuje typem zpracování, pro vysokonapěťové stroje se používá provedení s 50% slídy. [2]

1.2.4 Sklo

Řadíme mezi amorfnní anorganické látky. Ionty přídavných látek (Na^+ , K^+ , aj.) modifikují různé vlastnosti jako teplotu tání, pevnost, křehkost, barevnost a také elektrické vlastnosti. Mezi přednosti technického skla patří snadná tvarovatelnost za tepla, dobré elektrické, tepelné, chemické vlastnosti, nepropustnost plynu a možnost vytvoření vakuově těsného zátavu ve spojení s kovem. Elektrická vodivost skel je iontová, způsobená především ionty alkalických kovů Na^+ , K^+ , Li^+ . Při nižších teplotách jsou skla velmi dobrými izolanty. Dielektrické ztráty vznikají elektrickou vodivostí, proto se skla nehodí pro vysokofrekvenční účely. Elektrická pevnost skel je ve srovnání s ostatními izolanty velká. V elektrotechnice se sklo používá zejména v oblasti izolační a konstrukční. Pro účely izolační techniky se používají alkalická skla (MgO) jako součást tkanin a laminátů. Jsou vyráběna mechanickým tažením roztavené skloviny. Vlákna a z nich vyrobené izolanty snášejí trvale teploty do $200\text{ }^\circ\text{C}$ a mají velkou tepelnou vodivost. Používají se zejména pro ovíjené a impregnované izolace vodičů. Ze skleněné tkaniny jsou vyráběny zejména izolace vodičů elektrických strojů, jako podkladový materiál pro mikafolium, remikafolium a slídovou pásku, jako výztuž laminátů apod. [3,4,5]

1.2.5 Plasty – syntetické makromolekulární látky

Velmi významnou skupinou polymerních materiálů (syntetické makromolekulární látky) jsou plasty. V zásadě lze makromolekulární látky používané v elektrotechnice shrnout

pod název syntetické organické izolanty. Základní surovinou pro jejich výrobu jsou uhlovodíky a jejich ropné deriváty. Za běžných podmínek jsou pevného skupenství, velmi dobře obrobitelné a mají velmi dobré tepelné a elektrické izolační vlastnosti. Díky těmto přednostem postupně nahrazují v elektrotechnice přírodní organické izolanty. Makromolekulární látky vznikají z nízkomolekulárních sloučenin (monomery) chemickou reakcí – syntézou. Tato reakce může být trojího druhu – polymerace, polykondenzace, nebo polyadice. Lze ji do značné míry ovlivňovat jednak monomery vstupujícími do reakce, dále např. katalyzátory, teplotou, tlakem apod. V podstatě tímto způsobem přímo ovlivníme strukturu a základní vlastnosti vzniklé látky. Výsledný produkt je přímo závislý na zvoleném typu syntézy a lze rozdělit do třech skupin – termoplasty, elastomery a reaktoplasty. [5,12]

1.2.5.1 Termoplasty

Termoplast je polymer - plastický, deformovatelný materiál, který si tyto vlastnosti uchovává i po zahřátí a opětovném ochlazení. Jsou to vysokomolekulární polymery, jejichž řetězce mezi sebou interagují slabými van der Waalsovými silami (polyethylen), silnějšími dipól-dipólovými interakcemi a vodíkovými vazbami (nylon) nebo π - π interakcemi mezi aromatickými kruhy (polystyren). Vyrábějí se převážně polyreakcemi z parafinických a aromatických uhlovodíků. [5,13]

Polyetylén je v současnosti nepoužívanějším polymerem. Vzniká radikálovou, nebo iontovou polymerací C_2H_4 . Podle způsobu výroby rozeznáváme vysokotlaký, středotlaký a nízkotlaký polyetylén. Fyziologicky je nezávadný, téměř bez chuti, bez zápachu. Je odolný vůči vodě a většině chemikálií. Má velmi dobré mechanické vlastnosti. V širokém teplotním rozsahu je pevný, při zvýšení teploty ohebný, tvarově stálý do teploty 100 °C. Jeho nevýhodou je hořlavost, stárne působením světla, tepelnou oxidací a mechanickým namáháním. Má výborné elektrické vlastnosti a díky tomu se používá na elektroizolační součásti, součásti a izolace kabelů a dále ve vf technice. Prodává se pod různými komerčními názvy, např. vysokotlaký polyetylén - Bralen, Alkathen, Lupolen, Polyten, středotlaký – Marlex a nízkotlaký - Liten, Hostalen, Marlen. [3,13]

Polypropylén se vyrábí iontovou polymerací propylénu. Jsou známy tři formy – izotaktický, syndiotaktický a ataktický. Při výrobě může vzniknout kterákoliv konfigurace, nejčastěji vzniká izo- forma a a- forma. S ohledem na mechanické vlastnosti, které jsou závislé na krystalickém podílu je snahou získat izo formu. Oproti polyetylénu vykazuje vyšší

pevnost v tahu, větší tvrdost a vyšší tepelnou odolnost. Zároveň má větší odolnost proti chemikáliím. V elektrotechnice je využíván na pláště kabelů a vodičů, vlákna, fólie. Na trhu je nabízen pod komerčním názvem Hostalen. [3]

Do skupiny Fluoroplastů řadíme Polytetrafluorethylen (PTFE) známější pod obchodním názvem Teflon. Jedná se o nepolární izolant s mimořádnými mechanickými vlastnostmi a neobyčejnou chemickou odolností – odolává kyselinám a louchům, z tohoto důvodu je vhodný pro agresivní prostředí. Jeho teplotní rozmezí je velmi široké od -200 až do +250 °C. Je nehořlavý, odolává působení ultrafialového záření. V elektrotechnice se používá např. jako kabelová izolace. [3,5]

Dalším z Fluoroplastů je Polytrifluorchlorethylen (PTFCE). Svými vlastnostmi se podobá PTFE, ale na rozdíl od něj je slabě polární a jeho optimální hodnoty jsou trochu nižší. Chemicky je podobně odolný jako PTFE, ale působí na něj některá organická rozpouštědla a aromatické uhlovodíky. Jeho výhodou je snazší opracovatelnost. Využívá se jako izolace vodičů a dále jako součást laminátů. Nabízen je pod komerčními názvy Teflex, Ftoroplast 3 a Hostafluon. [3,5]

Polystyrén (PS) je čirý tvrdý termoplast připravovaný blokovou emulzní, suspenzní nebo roztokovou polymerací za pomoci peroxidů jako iniciátorů. Je elektricky nepolární, jeho molekuly mají malý dipólový moment. Je stálý vůči vodě, alkoholům, alkáliím, kyselinám a minerálním olejům. Rozpouští se v aromatických uhlovodících (benzen, toluen, xylen). Jeho nevýhodou je malá tepelná odolnost -30 až +70°C a zápalnost. Jedná se o izolant pro vysokofrekvenční účely. Polystyrén se často používá pro výrobu kopolymerů. Upravují se tím jeho vlastnosti, zejména mechanické. Používá se k izolaci kabelů, k výrobě tyčí a trubek pro elektrotechniku. [3,5]

Polyvinylchlorid (PVC) se vyrábí polymerací vinylchloridu. Má amorfnní strukturu, je nerozpustný ve vodě a odolává účinkům kyselin, alkálií i minerálních olejů. Rozpustný je ve směsích polárních a nepolárních rozpouštědel. Nemá pevný bod tání, do teploty 40°C je tepelně stálý, při 85°C měkne a při 150°C je dobře tvarovatelný. Tepelnou stabilitu lze zvýšit přidáním stabilizátorů. Hořlavý je pouze v přímém plameni, Působením slunečního záření dochází ke zhoršení mechanických vlastností. Z elektrotechnického hlediska se jedná o výborný izolant. Používá se k izolaci vodičů a kabelů, kde postupně nahradil kaučukové materiály. Při teplotách okolo 0°C křehne, proto se změkčuje přidáním změkčovadel, následkem čehož dochází ke zhoršení izolačních parametrů. Nabízen je pod komerčními názvy Novodur, Novoplast, Igelit, Hostalit, Vinidur. [3,5]

Polymethylmetakrylát (PMMA) je amorfní polymer využívaný jako konstrukční a elektroizolační materiál a dále používaný k přípravě elektroizolačních laků a zalévacích materiálů. [5]

Polyamidy (PA) nejsou typickými elektroizolačními materiály. Rezistivita, ztrátový činitel i permitivita jsou závislé na vlhkosti, proto jsou jako izolace kabelů a vodičů využívány pouze pro suché prostředí a pro nízká napětí. Jejich přednostmi jsou mechanické vlastnosti, využívají se jako ochranné pláště PVC kabelů, elektroizolační polyamidové laky, ochranné kryty, vlákna. [3,5]

Polyuretany (PU) mají podobné vlastnosti jako polyamidy, jsou však méně navlhavé. Používají se k výrobě vláken, fólií a izolačních, klimaticky velmi odolných laků, teplovzdorných laků a kaučukových směsí pro kabely. [5]

Polykarbonáty (PC) mají vynikající mechanické vlastnosti, především rázovou houževnatost. Jsou odolné proti kyselinám, louhy je zmýdelňují. Rozpouštějí se dobře v organických rozpouštědlech. Jsou fyziologicky nezávadné, bez chuti a zápachu. Jsou průzračné, lze je snadno barvit. Při zapálení po oddálení plamene samy zhášejí. Charakter molekuly je jen velmi málo polární; proto je typická malá navlhavost. Význačné elektrické vlastnosti si zachovávají i při zvýšené teplotě a vlhkosti. Používají se jako izolace vodičů a dále jako drážkové izolace v točivých elektrických strojích. Jsou prodávány pod obchodními názvy Makrolon a Lexan. [3,5]

Kapton (chem. polyimid, PI). Polyimidy mají skvělý soubor vlastností. Jejich fyzikální, elektrické a mechanické vlastnosti se drží ve velikém objemu teplot (od -269°C do $+400^{\circ}\text{C}$). Na poli dielektrických vlastností nezaprou svou podobu se silikony. Běžně jsou vyráběny polykondenzací z aromatického dianhydridu (dianhydrid kyseliny pyromellitové) a aromatického diaminu (4,4'-diaminodifenyléter). Vytvořený předpolymer je možno vytvrdit při vyšší teplotě, tehdy je výsledným produktem folie, nebo se rozpustí v náležitém rozpouštědle a výsledným produktem je lak či lepidlo, u něhož dosáhneme definitivních vlastností vytvrzením při zvýšené teplotě. Polyimidy se vyznačují ideální chemickou trvanlivostí, jsou odolné vůči velké skupině rozpouštědel, paliv a olejů. Rovněž jsou známy vysokou odolností vůči kyselinám a alkáliím. Netaví se, splňují nejvyšší třídu samozhášitelnosti UL94-V0. Díky své neměnnosti při nízkých i vysokých teplotách je využíváme v aplikacích, kde není možno užít jiné organické polymery z důvodu jejich nevhodných vlastností. Velmi dobře odolávají ultrafialovému záření a záření alfa, beta a gamma, a proto se používají jako ochrana polovodičových systémů před zářením alfa. Vyrábí se jako fólie s ideálními elektrickými vlastnostmi, ale je citlivá na mechanická poškození,

z tohoto důvodu je používána ve spojení s dalšími materiály jako elektrická zábrana. Využíváme je v extrémně důležitých případech jako izolace vinutí. [2,11]

1.2.5.2 Elastomery

Elastomery jsou makromolekulární látky, dle mezinárodní definice schopné se deformovat již malou silou o 100% své původní délky, a které se po uvolnění síly vrací téměř do původní polohy. V širokém teplotním intervalu mají kaučukovitou elasticitu a velké reverzibilní prodloužení, jejich vlastnosti lze vylepšit vulkanizací. Mezi elastomery patří zejména přírodní a syntetický kaučuk a pryž. Jejich velký význam spočívá v tom, že tvoří podstatnou část izolace všech vodičů. [4,14]

Přírodní kaučuk se vyrábí z kaučukového mléka (latexu) z tropických stromů. Surový kaučuk je plastický a má velmi malou pevnost v tahu. Dalším nedostatkem kaučuku je snadná oxidace vlivem ozónu a následně jeho stárnutí. Přidáním síry, nebo některé její sloučeniny dochází k vulkanizaci a kaučuk se stává elastickým. Míšením a vulkanizací se z kaučuku stává pryž. Pryž se používá k izolaci kabelů, její nevýhodou je malá teplotní odolnost. [4]

Syntetické kaučuky vznikly jako náhrada přírodního kaučuku. Vyrábí se z produktů vzniklých z ropy, zemního plynu nebo uhlí - např. acetylénu, benzénu apod. Pro elektrotechniku mají význam butadienové, chloroprenové, butadienstyrenové a silikonové kaučuky, které slouží pro výrobu izolací kabelů. [4]

1.2.5.3 Reaktoplasty

Jsou tvrditelné makromolekulární látky schopné vytvářet prostorové struktury. Tento děj je nevratný a vytvrzené plasty nelze roztavit ani rozpustit, dalším zahříváním dojde k rozkladu hmoty (degradaci). Vzniklou strukturu je možno považovat za jednu velkou makromolekulu. Základní makromolekuly jsou silně polární, a z tohoto důvodu nejsou dobrými izolanty. Mezi jejich přednosti patří tvarová stálost. Mezi reaktoplasty řadíme fenolformaldehydové hmoty, epoxidové pryskyřice, polyesterové hmoty, apod. [3,4,15]

Epoxidové pryskyřice vynikají řadou schopností, mj. velmi dobrou adhezí ke kovům, keramice i skleněným vláknům. Mají vynikající mechanickou pevnost a jsou hydrofobním materiálem. Snášejí dlouhodobé tepelné zatížení a jsou odolné proti řadě chemických činidel. Mají pozoruhodné elektrické vlastnosti ovlivněné použitým tvrdidlem, vysokou elektrickou pevnost a odolnost proti plazivým proudům. V elektrotechnice se používají k přípravě laků,

licích pryskyřicích, lepidel, lisovacích hmot, vrstvených izolací a k zalévání součástek a modulů. [3]

1.2.6 Kapalné izolanty

Kapalné izolanty mají z důvodu velké elektrické pevnosti a dále tekutosti, umožňující dobře vyplnit prostor, a tím zajistit chlazení v transformátorech, mnohostranné využití v elektrotechnice. Jejich další výhodou je dobrý odvod přebytečného tepla, dobré zhášení případného výboje a odlehčení pevných izolantů tím, že je chrání před vlhkostí a vzduchem. Hlavní typy kapalných izolantů jsou syntetické kapaliny, rostlinné a minerální oleje. [3,4]

Minerální oleje jsou ropné oleje speciálně rafinované, s nízkým bodem tuhnutí a vhodnými elektroizolačními vlastnostmi. Jejich vlastnosti určuje chemické složení, na základě kterého rozeznáváme čtyři typy olejů - oleje parafinické (alkanické, metanové), oleje naftenické (cyklanické), oleje složené ze směsi obou a oleje olefinické (obecný typ s několika dvojnými vazbami). Největší nevýhodou minerálních olejů je stárnutí, které je způsobeno mnoha fyzikálně – chemickými procesy, a dále pohlcování vlhkosti a plynů, což způsobuje zejména snížení elektrické pevnosti. Nejvíce používanými typy olejů jsou oleje transformátorové a kabelové. K výrobě kabelů jsou vhodné oleje naftenové, bez parafinů, s malým obsahem síry a asfaltenu. Pro transformátory jsou z hlediska stability vhodnější oleje s větším obsahem parafinových složek, jejich nejdůležitější vlastností je viskozita. [3,4,5]

Syntetické kapalné izolanty se vzhledem k lepším vlastnostem používají k náhradě mineralních olejů. Mají výborné izolační a dielektrické vlastnosti. Jsou nehořlavé, nevýbušné, mají vysokou stabilitu a prakticky nestárnou. Jejich nevýhodou je vysoká cena. Podle složení lze rozdělit tyto kapaliny na několik typů: kapaliny vzniklé polymerací nenasycených uhlovodíků (nejvíce používané), chlorované uhlovodíky, fluorované kapaliny, silikonové kapaliny a organické estery. Kapaliny na bázi chlorovaných uhlovodíků, dříve hojně používaných, jsou postupně nahrazovány a jejich výroba byla ukončena z důvodu velké ekologické zátěže. Fluorované sloučeniny mají velmi dobré zhášecí účinky a používají se pro náplně transformátorů. V suchém stavu nemají korozivní účinky, ale při elektrickém průrazu vznikají kyseliny napadající izolační hmoty a kovy. [4,17]

1.2.7 Elektrotechnické laky

Elektrotechnické laky jsou roztoky filmotvorných látek v organických rozpouštědlech. Mají velký význam pro konstrukci elektrických strojů v částech obsahujících vinutí. Používají se jednak ke zvýšení pevnosti izolace, zlepšení dalších mechanických a tepelných vlastností, dále ke zpevnění a vyplnění mezer ve vinutí. Laky můžeme rozdělit na základě složení na laky z přírodních pryskyřic, laky z vysýchavých olejů a laky ze syntetických polymerů a pryskyřic. [4,5]

1.2.8 Plynné izolanty

Obecně jsou látky v plynném stavu velmi dobrými izolanty s velmi dobrou relativní permitivitou a s nízkým činitelem dielektrických ztrát. Malá hustota plynů je ale příčinou malé elektrické pevnosti v porovnání s tuhými a kapalnými izolanty, na druhou stranu u plynů dochází k rychlému zotavení po průrazu. Elektrická pevnost plynů závisí především na vzdálenosti elektrod, teplotě a na tlaku. Stoupá při vysokých a nízkých tlacích, což se v praxi využívá při izolaci některých elektrických zařízení. [4,5]

Vzduch je nejběžnějším plynným izolantem, je tvořen směsí plynů - 78 % N_2 , 21 % O_2 , 0,9 % Ar, CO_2 , H_2 , Kr, H_2O , Xe, Rn. Má poměrně malou elektrickou pevnost v porovnání s ostatními izolanty, závislou na tloušťce vrstvy. Silným zředěním vzduchu lze elektrickou pevnost výrazně zvýšit, na druhou stranu jeho znečištěním jsou dielektrické vlastnosti výrazně sníženy. [4,5]

Vodík má ze všech plynů největší tepelnou vodivost, jeho elektrická pevnost je však velmi malá. Je 14x lehčí než vzduch. Dobře chrání kovové části před korozi a izolanty pracující v jeho prostředí pomaleji stárnou. Jeho nevýhodou je hořlavost a ve směsi se vzduchem třaskavost. Používá se jako zhášecí prostředek v elektrických vypínačích a dále jako chladicí a izolační médium ve velkých elektrických strojích. [4,5]

Dusík je ve srovnání se vzduchem o něco lehčí, má však menší elektrickou pevnost a nemá oxidační vlastnosti. Ve stlačeném stavu se dusík používá k plnění vysokonapěťových kabelů. Další důležitou aplikací je inertní atmosféra bránící oxidaci izolačních olejů v transformátorech. [4]

SF_6 (fluorid sírový) je elektronegativní plyn s vynikajícími dielektrickými vlastnostmi pro vysokonapěťové aplikace. Je chemicky inertní a s teplotou varu $-63,8^\circ C$, při běžné teplotě, chemicky stálý. Další výhodou je nehořlavost, netoxičita a nemá korozivní účinky.

Oproti vzduchu má téměř pětkrát vyšší hustotu, přibližně trojnásobnou elektrickou pevnost a skoro desetinásobnou vypínací schopnost. Při zhášení elektrického oblouku se rozkládá a vzápětí regeneruje, jeho permitivita se blíží jedné, dielektrické ztráty jsou skoro neměřitelné. [2]

1.3 Izolační systémy točivých a netočivých elektrických strojů

Pro provoz elektrických strojů je důležitým aspektem jeho bezporuchovost, jedním z faktorů, kteréji ovlivňují je i kvalita jejich izolačního systému. V průběhu provozu každého stroje dochází postupně ke stárnutí jednotlivých komponent, které je dané mechanickým, chemickým a elektrickým namáháním. Tyto vlivy lze vnímat jako vlivy prostředí a vlivy provozního namáhání. Mezi vlivy prostředí patří zejména teplota okolí, vlhkost, záření a chemická činidla. Vlivy provozního namáhání způsobuje elektrické, mechanické a tepelné namáhání. Výše uvedené vlivy vyvolávají v materiálech pomalé reakce, které vyvolávají degradační jevy uvnitř struktury materiálu. Výrobci a uživatelé mají snahu předcházet poruchám a odstávkám z důvodu neplánovaných oprav využitím diagnostiky. Diagnostické metody se odvozují z vlastností materiálů, jejich znalost je důležitá zejména pro konstrukci izolačních systémů a následně celých elektrických celků. [18, 19]

1.3.1 Izolační systémy točivých elektrických strojů

Izolační systémy točivých elektrických strojů můžeme z hlediska pracovního napětí třídit na nízkonapěťové a vysokonapěťové. Z hlediska spolehlivosti je nejproblematictější místem izolační systém statoru – vysokonapěťová izolace statorových tyčí. [2,19]

1.3.1.1 Nízkonapěťové izolační systémy točivých elektrických strojů

Tyto systémy tvoří jednak izolace vodičů, dále vyložení drážek a impregnace. Izolace vodičů je odvislá od výšky pracovního napětí a jejich úkolu v konkrétním stroji. Izolaci tvoří lak (smalt), opředení a ovinutí bavlnou, skleněná vlákna, ostatní materiály a seskupení pevné i nanášené izolace. Vyložení drážky slouží jako ochrana vlastního vodiče před poškozením o stěnu drážky, vyrábí se z drážkové lepenky, kombinované drážkové izolace nebo Nomexu. [2]

Impregnace se u nízkonapěťových systémů provádí převážně máčením, zaplavováním,

zakapáváním. V současné době jsou v naprosté většině případů využívány pro máčení jednosložkové polyesterové pryskyřice, které neobsahují styren a které můžeme nanášet ve vakuu i za atmosférického nebo zvýšeného tlaku. Laky, jejichž základem je nenasyčená polyesterimidová pryskyřice vytvrzovaná elektrickým proudem a UV zářením, nanášíme máčením nebo zaplavováním za rotace. Při využití zakapávací technologie využíváme lak, jehož základem je nenasyčená polyesterimidová pryskyřice ve styrenu. Pro zalévání technologicky volných prostor při stavbě elektrických zařízení je možno využít dvousložkových polyuretanových látek, jejichž finální podoba po vytvrzení je ve formě tvrdé gumy. [2]

1.3.1.2 Vysokonapět'ové izolační systémy točivých elektrických strojů

Vysokonapět'ové izolační systémy točivých elektrických můžeme řešit dvěma rozdílnými technologiemi - **resin-rich** (tedy pryskyřici již obsahující) a **VPI** (vakuově tlaková impregnace). [2]

Resin – rich se skládá z tříložkového kompozitu s výchozím izolačním materiálem ve formě polotovaru s 30 – 40% pojiva, na vodivých částech se vytvoří celistvá izolační vrstva. Skleněná tkanina tvoří nosnou část takového izolačního systému. Obvyklá skleněná tkanina se tvoří stáčenými vlákny a její síla je 0,14 mm. Nejnovějším výrobním postupem se vlákna nestáčejí, ale skládají se do roviny a síla tkaniny je 0,12 mm. U materiálů s touto tkaninou nalezneme mechanické vlastnosti materiálů se stáčenými vlákny. Izolační překážku tvoří díky svým vlastnostem – hutnosti, pevnosti a menší savosti - kalcinovaný slídový papír. Pojivo zde tvoří reaktoplastická bezropouštědlová novolaková nebo cykloalifatická epoxidová pryskyřice, která je dodávána v částečně předtvrzeném stavu (B stav) při tloušťce materiálu 0,15 – 0,2 mm. Nezbytnou vrstvu lze vytvořit dle rozsahu napětí buď navinutím pásky „kontinuálně“ po celé délce i v čelech nebo se využije foliový materiál, na který na čelech stroje navazuje ovin páskou - „diskontinuální“. V obou případech se přidává několik procent materiálu navíc na stlačení. Postup vytvrzení probíhá ve formách stahujících izolace na předepsaný rozměr. Pro proces vytvrzení se využívají „latentní tvrdidla“, jejichž základem jsou komplexy fluoridu boritého. Nespornou vlastností těchto tvrdidel je schopnost zahájit proces polymerace po získání potřebné dané teploty. Po skončení procesu polymerace jsou tyče (cívky) vinutí připraveny k montáži do stroje. [2]

Systém **VPI** je pojmenován podle nejpodstatnějšího procesu výroby izolace - výroby vakuově tlakové impregnace. Základ tohoto systému je tvořen savým izolantem (slídová

páska) a sestává se ze tří systémů. Jeho nejvýznamnější vlastností je ideální savost, neboť všechny vrstvy musí být co nejlépe proimpregnovány. Proto je využívána nekalcinovaná slída, jejíž přednost spočívá v hrubozrnosti a rovněž plní požadavky na mechanické vlastnosti. Nejdůležitější složkou je skleněná tkanina, polyesterové folie nebo polyimidová folie. Pojivo v množství cca 7% se používá pouze k mechanickému zajištění nosného komponentu při následné impregnaci. Musí být slučitelné s bezprostředně použitým impregnantem, neboť je nutno vyloučit nechtěné procesy při dalším zpracování. Jako impregnant se používají bezropouštědlové epoxidové, polyesterové a silikonové pryskyřice se stoprocentním obsahem sušiny (např. epoxidová pryskyřice s kapalným anhydridem), což umožňuje vyplňovat objekty při jednoduché impregnaci. Mají dobré elektrické i mechanické vlastnosti a poměrně krátký čas vytvrzování. [2]

Z výše uvedeného vyplývá, že velkou výhodou systému **resin – rich** je jednoduchá a bezproblémová obměna dílčích nefunkčních součástek, na druhou stranu je problémem potřeba přesných přípravků pro vytvrzování, dalším nedostatkem je vznik nehomogenit v izolačním systému. Technologie **VPI** se využívá především u trakčních motorů, velkou výhodou je bezchybný impregnační systém, který zpevňuje vinutí při výborných izolačních a tepelných vlastnostech. Z výrobního hlediska je tato technologie obtížná, co se týče otázky technického zařízení, dále z hlediska finančních nákladů je nevhodná pro výrobu velkých strojů (hydroalternátory). Další spornou otázkou jsou opravy. Jestliže je zařízení proimpregnováno do jednoho celku, je vyloučena možnost opravy, v případě proimpregnace do několika bloků je nutno vyměnit celý poškozený blok. Výhodou je, že při využití průběžného systému izolace můžeme zkrátit cívky, aniž bychom porušili výkonové parametry stroje, a tím ušetříme cca 6% materiálu. [2]

1.3.2 Izolační systémy netočivých elektrických strojů

Izolační systémy transformátorů třídíme podle provedení do tří kategorií. [2]

Suché transformátory jsou menších výkonů, není zde použit kapalným impregnant. Pro konstrukci se využívají materiály vyšší tepelné odolnosti. Vzduch nebo fluorid sírový SF₆ je v těchto případech využíván jako pracovní prostředí a chladivo. Papír, NOMEX, lepenky a kombinované materiály (kapton se skleněnou tkaninou, apod.) se používají jako izolační prvky. [1,2]

Zalévané transformátory mají cívky zalité do pryskyřice. K zalévání se využívá

pryskyřice na bázi alifatických glycidyleterů s tvrdidlem. Tato izolace je v provedení obdobném jako u točivých strojů, tj. resin-rich nebo VPI. Tyto transformátory jsou omezeny napěťově i výkonově. Jsou kompaktní, odolné proti mechanickému poškození a nehořlavé. [1,2]

Poslední kategorií jsou transformátory, které využívají **kapalné izolanty ve spojení s tuhými izolanty**. Tyto transformátory jsou bez výkonové a napěťové hranice. Nejrozšířenějšími jsou olejové, kdy je železné jádro s vinutím ponořeno do nádoby s olejem. Olej plní funkci izolační a chladicí. Z důvodu vysoké izolační pevnosti mají tyto transformátory menší rozměry. Jako izolační materiály se používají papír, kompozity, Nomex, aj. [1,2]

1.4 Shrnutí současného stavu

Výše zmíněné materiály a technologie v současnosti plně vyhovují a jsou mnohaletou praxí prověřeny. Na druhou stranu tyto používané tradiční materiály a postupy již nenabízí nové možnosti a perspektiva jejich výrazného vylepšení se jeví jako málo pravděpodobná. S ohledem na další předpokládaný technologický rozvoj přestanou tyto materiály a postupy v blízké budoucnosti vyhovovat novým požadavkům. Z tohoto důvodu lze předpokládat další posun v této oblasti díky novým nastupujícím technologiím. Jednou z těchto nových technologií je i nanotechnologie, která se již v současné době začíná prosazovat v různých oblastech lidské činnosti.

2 Nanotechnologie

2.1 Úvod do nanotechnologie

„Nano“ (řec. nanos – trpaslík, zn. „n“). Odborně oblast „nano“ definujeme rozsahem 10^{-9} , vyjadřujeme tím jednu miliardtinu základní jednotky. Nanostruktury a nanočástice definujeme velikostí 1 – 100 nm. Spodní hranice 1 nm je určena velikostí samostatných atomů a molekul. Velikost atomů je řádově cca 0,1 - 0,4 nm, nanostrukturami potom nazýváme molekuly skládající se z atomů. Mezi přirozené nanostruktury řadíme např. bílkoviny, DNA, viry (též možno označit jako nanočástice). Nanočástice a nanostruktury považujeme za základní stavební jednotky nanomateriálů. Protože nanočástice a nanostruktury jsou základním prvkem nanomateriálů, jsou fyzikální a chemické vlastnosti nanomateriálů ovlivněny atomovými silami, molekulárními vazbami a kvantovými jevy. Na druhou stranu jsou tak velké, že při zkoumání jejich vlastností je využití kvantové mechaniky naprosto bezvýznamné. U velmi malých částic se též projevuje jejich vlnová povaha. Z těchto důvodů mají nanomateriály velmi unikátní fyzikální, chemické a biologické vlastnosti. Na vlastnosti materiálu má vliv jejich chemické i strukturální složení. Pokud je alespoň jedna z komponent materiálu nanostruktura, lze pozorovat velmi výrazné změny fyzikálních, chemických i biologických vlastností oproti „obyčejnému“ materiálu stejného chemického složení. Velmi výrazně stoupá např. mechanická pevnost, tvrdost, tažnost apod. Další důležitou změnou je teplota tání jednotlivých materiálu, která přímo souvisí s velikostí částic, a tudíž s výrazným nárůstem plochy částic materiálu. Tyto změny vlastností jsou důsledkem charakteristické malé velikosti nanostruktur, případně vyplývají z jejich vysoké uspořádanosti či prostorové orientace. [20,21]

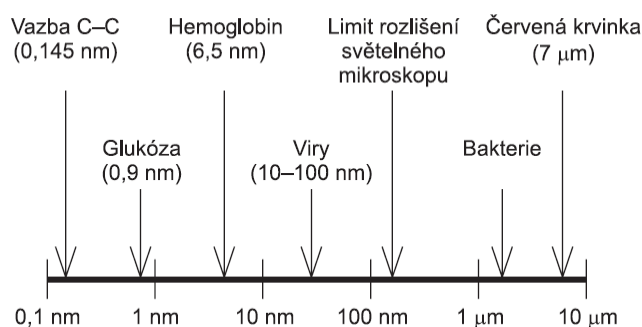
Jako nanotechnologie lze tedy označit materiály splňující tyto základní podmínky:

- Mají vnitřní strukturu, popřípadě některý z rozměrů v intervalu 1 – 100 nm.
- Jejich fyzikální a chemické vlastnosti jsou ovlivňovány na úrovni meziatomových a mezimolekulárních vazeb, a tím získávají unikátní vlastnosti.
- Jejich kombinace mohou vytvářet makrostruktury s vazbami do makrosvěta. [22]

2.2 Nanotechnologie v přírodě

Nanotechnologie má v přírodě velké pole zastoupení. Nalézáme ji v mnoha podobách. Základními stavebními prvky přírody jsou atomy. U živých organismů tvoří 99 % hmotnosti

nejmenší živé jednotky - buňky – kyslík, dusík, fosfor, vodík, uhlík a síra. Tyto atomy jsou vázány chemickými vazbami a vytvářejí molekuly. Společným základem všech buněk je voda a malé organické molekuly: nukleotidy, aminokyseliny, mastné kyseliny a sacharidy. Tyto základní stavební kameny můžeme označit jako podjednotky pro tvorbu makromolekul a větších souborů (polysacharidů, lipidů, proteinů, nukleových kyselin, ribosomů aj.), které můžeme souhrnně pojmenovat jako nanostruktury (viz obr. 1). Tyto nanostruktury se mohou samy uspořádat, organizovat a vytvářet vyšší celky, jako jsou membrány, organely, buňky, tkáně, orgány a celé organismy. [20,21]



Obr. 1 Relativní velikost atomů, biomolekul, bakterií a buněk [20,21]

Na základě výše uvedených příkladů můžeme říci, že příroda sama bez jakéhokoli zásahu člověka umí stvořit struktury a systémy mimořádných vlastností obyčejným sestavováním atomů a molekul hierarchicky stylem shora dolů od větších struktur k menším („bottom-up“). Při tomto se uplatňují především procesy tzv. samosestavování (self-assembly) a samoorganizace (self-organization). Molekulární samosestavování znamená samovolné uspořádávání molekul při podmínkách termodynamické rovnováhy do strukturovaných, stabilních, nekovalentně sloučených agregátů. Struktury takto vzniklé se vyznačují precizní strukturou, velikostí a tvarem. Na jejich vytváření nemají vliv vnější procesy. Jako příklad samosestavení můžeme uvést strukturu ribosomu z malé a velké podjednotky. [21]

Vzor nanotechnologie nalézáme i na hranici živé a neživé přírody. Formou přírodní nanotechnologie je totiž biomineralizace, proces, při kterém organismy vytvářejí anorganické látky, tzv. biogenní minerály. Ty se stávají složkou jejich organismu a pracují v naprosté většině případů jako opora těla nebo záštita před predátory. Příroda reguluje syntézu těchto minerálů – kontroluje rozměr, tvar, uspořádání krystalů a jejich vzájemné působení s organickými sloučeninami, což má vliv na konečné vlastnosti materiálů, jako např. vysokou

pevnost, odolnost proti lomu i estetický vzhled. Biomateriály, kompozity biogenních minerálů a organických molekul, jsou v dnešní době jednou z nejdůležitějších sfér bádání materiálové vědy. Inspirace přírodou vedla ke vzniku nové vědní oblasti, která se nazývá **biomimetika**, další vědní obor **bionanotechnologie** řeší využití a syntézu biomateriálů a vytváření nanozařízení na biologických principech. [20,21]

2.3 Počátky hledejme v historii

V souvislosti s tímto oborem musíme zmínit období starověkého Říma, konkrétně tedy 4. století n. l. S největší pravděpodobností právě z této doby pocházejí tzv. Lykurgovy poháry. Právě tyto poháry jsou nejranějším představitelem specifického, tzv. dichroického skla. Typickou vlastností tohoto skla je schopnost měnit svou barvu v závislosti na umístění světelného zdroje. Prohlížíme-li poháry v odraženém světle, mají barvu zelenou. Jestliže ovšem zdroj světla situujeme dovnitř pohárů, jejich barva je potom červená. Chemickým rozbořením vědci zjistili, že složením se jedná o sodnovápenaté sklo velmi podobné sklu užívanému v současné době. Ke světelným změnám, které pozorujeme při změně umístění zdroje světla, dochází v důsledku přítomnosti nanokrystalů ze slitiny stříbra a zlata o velikosti asi 70 nm v molárním poměru 14:1. Lykurgovy poháry byly dle všech ukazatelů zhotoveny ve starověkém Římě, do současné doby však nikdo nezjistil, jaké postupy starověcí skláři použili. [20,21,22]

Rovněž z doby starověkého Říma máme důkazy o znalostech a následném využívání baktericidních vlastností stříbra (stříbrné poháry, stříbrné mince). V současné době je známo, že nanočástice stříbra (tedy shluky atomů stříbra a stříbrných kationtů o rozměru 5 – 15 nm) jsou vysoce toxické nikoli jen pro bakterie, ale i pro kvasinky a houby. Nanočástice stříbra se používají ve formě dezinfekční tekutiny, ale jejich dlouhodobou aplikací mohou nastat některá rizika. Stříbro může způsobit patologické modravo-černé zbarvení pigmentu v tkáni v důsledku ukládání nerozpustných molekul a dále může být toxické pro savčí buňky. [23,24]

Rovněž ve 13. - 16. století staří mistři využívali vlastností kovových nanočástic, což dokazují nálezy glazované keramiky v Itálii. Bylo zjištěno, že lesk způsobuje dekorativní kovový film o síle 200 – 500 nm, který obsahuje měděné a stříbrné nanokrystaly, jež jsou rozptýleny v matrici štědré na sloučeniny křemíku. V zevní vrstvě filmu o síle 10 – 20 nm kovy nenalezneme. Stříbrné nanokrystaly jsou vyčleněny od měděných a vytvářejí agregáty s průměrem 5 – 100 nm. Optické vlastnosti popisované kompozitní struktury jsou odvislé od

rozměru částic a matrice. Třpytná glazovaná vrstva byla patrně prvním kovovým nanostrukturním filmem reprodukovatelně vyráběným lidmi. [20,21]

V důsledku průběhu vývoje v tomto oboru v 50. letech dvacátého století někteří jednotlivci viděli další pokračování v možnosti práce s atomy a konstrukci zařízení o molekulárních rozměrech. Mezi průkopníky této myšlenky patří Arthur von Hippel, elektroinženýr z Massachusettského technologického institutu (MIT), jenž jako první použil a zavedl pojem „molekulární inženýrství“. [20,21]

Dalším pionýrem nanotechnologie (ačkoli ještě nepoužil toto označení) byl nositel Nobelovy ceny za fyziku z roku 1965 Richard Feynman. Podstatné ideje představil ve své přednášce „There’s Plenty of Room at the Bottom: An Invitation to Enter a New Field of Physics“, prezentované na výročním zasedání Americké fyzikální společnosti na Kalifornském technologickém institutu (Caltech) roku 1959. Zdůraznil fakt, že celá živá příroda funguje na úrovni atomů a molekul a předvídal, že v budoucnu lidé dokáží sestavovat miniaturní zařízení, která budou schopná manipulovat s jednotlivými atomy. R. Feynman svými vizemi, mj. o integrovaných obvodech, o jejich dopadech na výpočetní techniku, o mechanických přístrojích pro tvorbu dalších přístrojů s větší přesností naplnil aspekty toho, co dnes nazýváme nanotechnologií, a předběhl svou dobu o několik desítek let. Na jeho počest je každý rok udělována Feynmanova cena za přínos v oboru nanotechnologie. [20,21]

Na Feynmanovy, na svou dobu extrémní, myšlenky navázal v 70. letech 20. století americký fyzik Eric Drexler. Ve svém odborném pojednání o molekulárním inženýrství přednesl svou vizi výroby molekulárních zařízení, jejichž podstatou jsou proteiny. Drexler novou technologii označoval jako „technologii molekulární“ a uváděl, že tato nová technologie bude řízeně a přesně manipulovat s jednotlivými atomy a molekulami a změni náš svět mnohem víc, než si dovedeme představit. V roce 1986 předložil její pozitivní i negativní stránky ve své knize „Engines of Creation: The Coming Era of Nanotechnology“, v níž rozvinul ideje nanotechnologické revoluce. Zobrazil svět umělých systémů na molekulární úrovni (nanoroboty, assembly), které se podobají živým organismům se schopností reprodukce, vzájemné komunikace a sebezdokonalování. Podle Drexlera bude v budoucnu možné sestrojít nanoroboty, které budou mít schopnost sestrojít s atomovou přesností téměř cokoliv. [20,21]

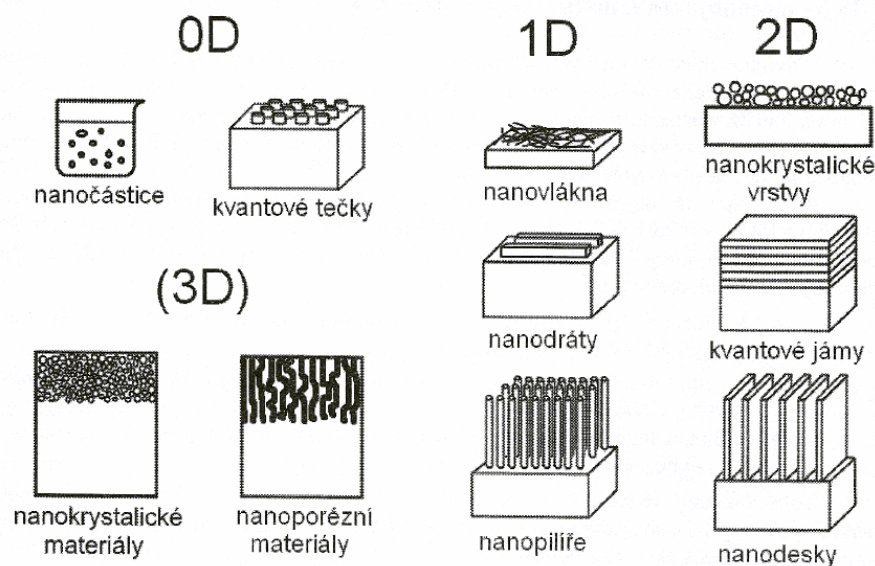
Japonský fyzik Norio Taniguchi poprvé použil termín nanotechnologie v roce 1974 v souvislosti s výrobními způsoby a měřicí technikou, které umožňovaly výrobu součástek s přesností na nanometry. [20,21]

2.4 Nanoobjekty a materiály

Nanotechnologie je mezioborová a průřezová technologie, která se zabývá věcným využitím nových a ne zcela běžných vlastností nanočástic a nanostruktur. V dnešní době můžeme zodpovědně říci, že nanotechnologie nalézá své uplatnění téměř ve všech oblastech lidského působení. [20]

Nanoobjekty rozřídí norma ISO/TS 27687 dle zásadního parametru, což představuje počet souřadnic, v nichž daná struktura vyhovuje rozměru velikosti v intervalu 1 až 100 nm. Rozlišujeme tedy (viz obr. 2)

- 0 dimenzionální nanoobjekty – nanočástice ve všech třech parametrech dosahují nanorozměrů - nanokrystaly, porézní materiály, nanopěny, kvantové tečky, objemové nanomateriály a nanostroje složené z makro molekul.
- 1 dimenzionální nanoobjekty – ve dvou souřadných rozměrech dosahují nanorozměrů – nanovlákná, nanopásky, nanotyče, nanotrubičky, nanodráty, kvantové dráty, pilíře.
- 2 dimenzionální nanoobjekty – nanodesky dosahují nanorozměrů pouze v jedné souřadné ose – tenké vrstvy, deskovité nanokrystaly, kvantové jámy, nanostěny, rovinné makromolekuly. [22]

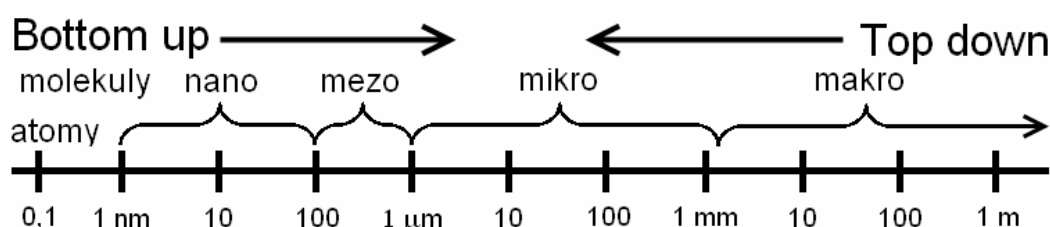


Obr. 2 Schematické příklady některých typů nanomateriálů [22]

Jiné rozdělení lze udělat na základě morfologických znaků konkrétních nanoobjektů. Mimo těchto uvedených typů rovněž máme makroskopické druhy vícefázových materiálů. Nanostrukturní materiál ve spojení s pevným materiálem označujeme jako nanokompozit, o

nanotekutině (mj. i kolidní roztoky, nebo gely) hovoříme tehdy, je-li nanostrukturní materiál rozptýlen v kapalině nebo v plynu. Nanomateriály můžeme charakterizovat podle chemického složení, tvaru, rozměrů, funkčních vlastností apod. Nanočástice v nanomateriálech mohou být oddělené nebo vytvářet shluky (klastry), nanodrátky, nanotrubicce, nanovlákna, nanokompozity, tenké filmy nebo vrstvy. [22]

Nanostruktury můžeme tvořit dvěma postupy - **Top down** je fyzikálně-inženýrský postup pro vytvoření nanostruktur „shora dolů“, tedy od větších struktur ke strukturám menším, naproti tomu **Bottom – Up**, nazývaný někdy chemický, představuje vytváření větších a složitějších celků ze základních prvků – atomů, molekul. (tedy postup opačný od Top down). Oba tyto přístupy jsou na obrázku 3. [22]



Obr. 3 Rozdělení rozměrové škály a směry základních přístupů tvorby nanostruktur [22]

V současnosti se všeobecně upřednostňují výrobní postupy top-down, kdy se do nanosvětla dostáváme z makrosvětla. Začínáme se strukturami, s nimiž se dobře manipuluje, vytvořenými člověkem a naše úsilí směřuje ke zmenšování jejich velikosti. Po celou dobu miniaturizace krok po kroku vždy vytvoříme produkt o něco menší než byl předešlý, a toto opakujeme tak dlouho, až získáme strukturu, jež je již dostatečně miniaturní na to, aby byla nositelkou nové jedinečné vlastnosti nebo funkce. Používané top-down technologie pracují na dolní hranici v rozměrech 10 – 100 nm. Využívají litografii, leptání a jiné procesy, které jsou postupným vývojem zlepšovány, a posunují se detaily do stále menších rozměrů. [21]

Výrobní postupy bottom-up se nejdříve zabývají stavbou funkčního nanostrukturního celku u nejmenších částic hmoty, u individuálních atomů a molekul. Z těchto sestávají součástky, které vytvářejí ostatní součásti složitějších systémů. Metoda bottom-up se přirozeně uplatňuje v přírodě při vzniku biologických struktur. Právě zde našlo lidstvo svou inspiraci na své cestě k vytvoření umělé nanostruktury, jejichž velikost se v současnosti pohybuje v rozmezí pouze cca 2 – 10 nm. [21]

Velkou výhodou bottom-up metody je to, že jsou levnější než metody litografické, neboť využívají kontrolované chemické reakce. Rovněž se často využívá přirozené schopnosti

jednotlivých složek, která spočívá ve vzájemném rozpoznávání, samosestavování, strukturování a samoorganizování. Přestože jsou bottom-up metody dosud ve stádiu vývoje, již nyní předpokládáme, že pro ně v budoucnu nalezneme ve výrobě velké uplatnění. Již v současnosti je využíváme např. k výrobě uhlíkových nanotrubic a kvantových teček. Výroba nanočástic chemickými metodami vychází z oxidačních nebo redukčních reakcí, označených jako „Syntéza v plynné fázi“ (Gas Phase Synthesis) a „Tvorba koloidních roztoků“ (Sol-Gel Processing). [21]

2.5 Jednotlivé nanomateriály a jejich využití v praxi

2.5.1 Nanočástice zlata a stříbra

Nejstarší aplikace nanočástic zlata a stříbra k barvení skla byly již zmíněny v kap. 2.3. V současnosti se využívají např. v biomolekulárních detekčních metodách, kde nanočástice slouží jako symboly k značení nukleových kyselin či proteinů. Jednou z vlastností kationtů stříbra je jejich vysoká afinita k negativně nabitým bočním skupinám biologických molekul (jako jsou fosfáty, karboxyl, sulfanyl apod.), jež se nalézají v bakteriálních buňkách. Navázáním iontů stříbra se deaktivují kritické fyziologické funkce bakterií – syntéza stěny buněk, transport přes membrány, syntéza a translace nukleových kyselin, skládání proteinů, transport elektronů v buňce apod. V důsledku tohoto procesu bakterie umírá. Je nespornými výhodami, že bakterie nenabývají vůči částicím stříbra odolnosti, na rozdíl od jejich reakce na aplikaci antibiotik, a že nanočástice stříbra vhodně účinkují proti rozsáhlému spektru mikroorganismů. Z důvodu antibakteriálních schopností jsou nanočástice stříbra ve stavebnictví používány jako součást omítkových vnějších i vnitřních směsí, v medicíně jako desinfekční masti, zdravotní roušky nebo obvazy. [21, 23, 24]

2.5.2 Nanočástice oxidu křemičitého, oxidu titaničitého, oxidu železitého a hydroxyapatitu

Oxid křemičitý (SiO_2) ve formě nanočástic nalézá své uplatnění v rozličných zubních pastách a kosmetických přípravcích. Nanočástice oxidu titaničitého (TiO_2) mají čisticí schopnosti, v jejich případě můžeme hovořit o schopnostech antibakteriálních a antipachových. Tenkou vrstvou oxidu titaničitého využíváme jako tzv. fotokatalyzátor. Pod

paprsky ultrafialového záření (které je nedílnou součástí slunečního světla), dochází k chemické reakci a organické látky (včetně buněčných stěn bakterií) se v důsledku toho rozloží na vodu a oxid uhličitý. Jako příklad využití nanočástic oxidu titaničitého v dnešní době můžeme uvést kosmetický průmysl – krémy na obličej, opalovací krémy, pleťové vody. Mimo kosmetický průmysl se využívají jako součástí laků s reflexními vlastnosti. Základní složkou při výrobě rtěnek a líčidel (UV filtr) jsou nanočástice oxidu železitého (Fe_2O_3). Rovněž je můžeme využít při detoxikaci a sanaci kontaminovaného území. Nanočástice hydroxyapatitu ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH}$, resp. $3\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot \text{Ca}(\text{OH})_2$) se přirozeně vyskytují v kostech a zubech. Jsou slibnou perspektivou pro tvorbu implantátů kostí a zubů, tvoří totiž biokompatibilní složku kompozitu implantátů a stimulují růst, další využití je v systémech pro dopravu léků. [21, 25]

2.5.3 Magnetické nanočástice

Magnetické nanočástice mají široké využití v diagnostické medicíně, paměťových médiích a spintronice. Jejich vlastností využíváme při analýze krve, moči apod., v případech urychlení separace a zlepšení rozlišitelnosti. Nejčastěji se používají nanočástice oxidů železa povlečené dextransy, siloxany a jinými látkami. [21, 25]

2.5.4 Polymerní nanovlákna

Pojem polymerní nanovlákna užíváme pro označení vláken s průměrem menším než 1 μm . Původně se k přípravě nanovláken používala metoda tažení proudem horkého vzduchu (meltblown), touto metodou je možno docílit vlákna o velikosti 1000 až 2000 nm. Další používanou metodou - rozpouštění polymerního pojiva z mořských řas bylo dosaženo lepších výsledků, ale tato metoda je nespolehlivá a velmi drahá. Třetí metoda využívající silné elektrické pole pro zvlákňování vodných roztoků polymerů vlákna se nazývá elektrospinning. Oproti metodě meltblown se vytváří vlákna o řád menší. Vytvořená vlákna slouží k výrobě textilií, které jsou porézní, ale neprostupné pro viry a bakterie. Tato vlastnost je velmi důležitá zejména v medicíně - využití jako krycí a obvazový materiál, neboť látka propouští kyslík, brání vstupu bakterií a zajišťuje odtok zánětlivého výtoku z krevních a mízních cest. Mimoto můžeme opět v oblasti medicíny tyto textilie využít v případech potřeby rekonstrukce kůže, kostí, cév, svalů i nervové tkáně, dále pak k doručování a řízenému uvolňování léčiv či buněk. Další důležitou vlastností je vynikající schopnost absorpce zvuku, což se v průmyslové praxi

využívá pro odhlučňování interiérů automobilů, letadel nebo ve stavebnictví. [21, 26]

V oblasti polymerních nanovláken získala ČR velmi významné úspěchy. Tým odborníků pod vedením profesora Oldřicha Jirsáka na Technické univerzitě v Liberci v roce 2003 jako první na světě vyvinul a patentoval technologii, jež umožňuje výrobu netkaných nanovlákných textilií (tvořených vlákny o průměru 50 – 500 nm) v průmyslovém měřítku. Tato jedinečná výrobní technologie byla nazvána nanospider, jedná se o modifikovanou metodu elektrospinningu. V současné době firma Elmarco, spolupracující s TUL na vývoji, vyrábí jako první na světě stroje pro průmyslovou výrobu nanovláken. V Litvínově chystá firma Nanotex výrobu barierových textilií a filtračních materiálů. [21, 27]

2.5.5 Nanoporézní materiály

Nanoporézní materiály jsou disperzní látky s póry menšími než 100 nm. Charakteristickým rysem je dokonalá architektura porézního systému s pravidelně uspořádanými póry téhož tvaru a téže velikosti. Mohou být vytvořeny např. z uhlíku, křemíku, (hlinito)křemičitanů nebo polymerů. Jejich jedinečnou vlastností je zvětšená povrchová plocha, což zlepšuje jejich katalytické, absorpční a adsorpční vlastnosti. Z tohoto důvodu je nejvíce přímých či potenciálních aplikací v adsorpčních a separačních procesech, katalýze a fotokatalýze, sensorice, mikroelektronice a v některých biotechnologiích. U těchto aplikací je podstatné, aby povrch pórů byl dobře dostupný pro molekuly z vnější kapalné či plynné fáze. Naproti tomu v izolační technice a některých jiných aplikacích je důležité, aby póry byly uzavřeny uvnitř tuhé fáze. Nejužívanějším nanoporézním materiálem jsou krystalické hlinitokřemičitany zeolity. [21, 28]

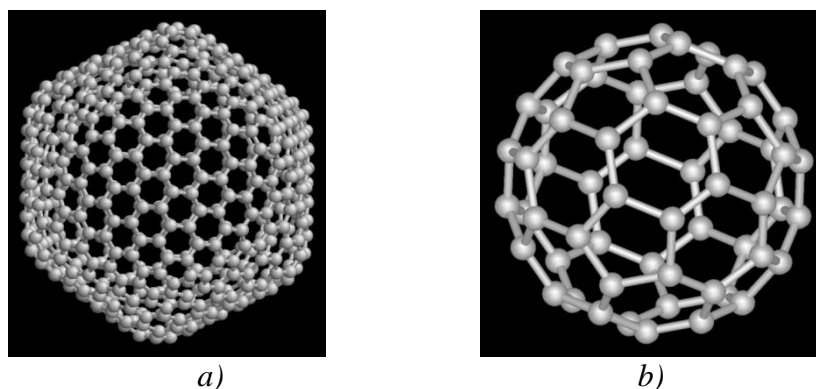
2.5.6 Uhlíkové nanomateriály

2.5.6.1 Saze

Jsou částice amorfního uhlíku o velikosti 10 – 500 nm, jež vznikají nedokonalým spalováním organických látek bohatých na uhlík. Jsou známy již od pravěku a i v současnosti jsou nejpoužívanějším uhlíkovým nanomateriálem s ročním objemem výroby cca 8,1 mil tun. Asi 90 % objemu výroby využívá gumárenský průmysl jako plnidlo pneumatik, další využití nalézají v chemickém průmyslu při výrobě plastů nebo se používají jako barvivo - tiskařská čern. [21]

2.5.6.2 Fullereny

Fullereny jsou jednou z alotropických modifikací uhlíku, kondenzované, polycyklické, klecovité struktury. Jejich molekuly jsou tvořené sudým počtem atomů uhlíku, umístěných ve vrcholech různých mnohostěnnů kulovitého tvaru, přednostně tvořených pěti- a šestiúhelníky. Pojmenovány jsou podle amerického architekta Richarda Buckminstera Fullera, proslaveného tzv. geodetickými kopulemi, jimž jsou tyto molekuly podobné. První fullereny byly uměle připraveny v roce 1985 laserovým odpařováním grafitu v atmosféře helia, v současnosti jsou připravovány za využití metody řízeného spalování organických látek v obloukovém výboji. Přestože jsou fullereny řazeny mezi anorganické látky, jejich reakce jsou typické pro organické sloučeniny. V průběhu minulého desetiletí byla vytvořena a popsána celá řada derivátů fullerenu, které našly své uplatnění v různých sférách. Jedny z derivátů jsou např. C_{540} , nebo C_{60} (viz Obr. 4). Fullereny jsou vhodné pro výrobu superpevných materiálů o nízké hmotnosti, k výrobě ochranných skel filtrujících škodlivé záření a také jako součást tuhého paliva pro rakety. Fluorované fullereny jsou jedinečnými mazivy. Některé organické deriváty fullerenu mají magnetické vlastnosti, z tohoto důvodu je označujeme za tzv. nekovové magnety. V lékařství našly uplatnění jako speciální nosiče, které v prostoru uvnitř molekuly dopravují léky na předem určené místo v organismu. Do dutiny fullerenu lze případně ukládat i kovy, jsou využitelné jako katalyzátory chráněné uhlíkovou klecí, nebo radioaktivní atomy. Slibnou perspektivou by mohlo být využití hydridů fullerenu coby základu pro lehké, netoxické baterie s vysokou účinností. [21]



Obr 4 Schematické modely fullerenu a) C_{540} , b) C_{60} [29]

Fulleren C_{60} (viz Obr. 4b) je nejznámější a má nejdokonalejší kulovitý tvar. Čistý krystalický C_{60} se nazývá fullerit, jeví se vzhledem k objeveným vlastnostem jako velmi perspektivní do budoucna. Jedním z jeho vlastností je vysoká pevnost, jež nalezne své uplatnění v technických oblastech. Při zvláště vysokých tlacích se při pokojové teplotě fullerit

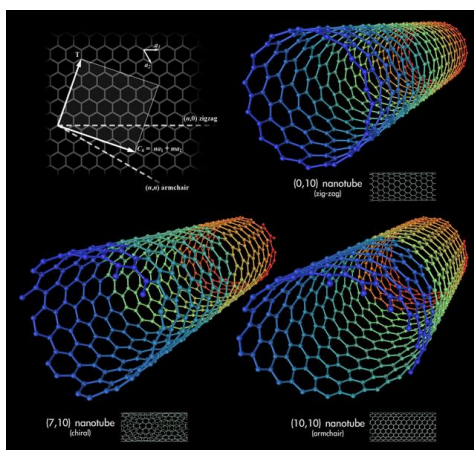
mění v diamant. Přestože je C_{60} polovodičem, za jistých okolností (např. ve spojení s cesiem do teploty ve výši asi 40 K) se u něho objevují supravodivé vlastnosti. [21]

2.5.6.3 Uhlíkové nanotrubičky

Uhlíkové nanotrubičky (anglicky: carbon nanotubes - CNTs) (viz Obr. 5,6) jsou jednou z alotropických modifikací uhlíku. Jsou to podlouhlé útvary cylindrické struktury vytvořené ze stočených grafitových rovin, jež mohou být na koncích uzavřeny fullerény. Jejich stěny jsou tvořeny atomy uhlíku o průměru 1 až 100 nanometrů a o délce do 100 μm . Mohou být jedno- či vícevrstvé. Uhlíkové nanotrubičky vznikají za srovnatelných podmínek jako fullerény, a můžeme je rozdělit na dvě skupiny:

- jednovrstvé uhlíkové nanotrubičky (single-walled carbon nanotubes, SWCNT)
- vícevrstvé uhlíkové nanotrubičky (multiple-walled carbon nanotubes, MWCNT)

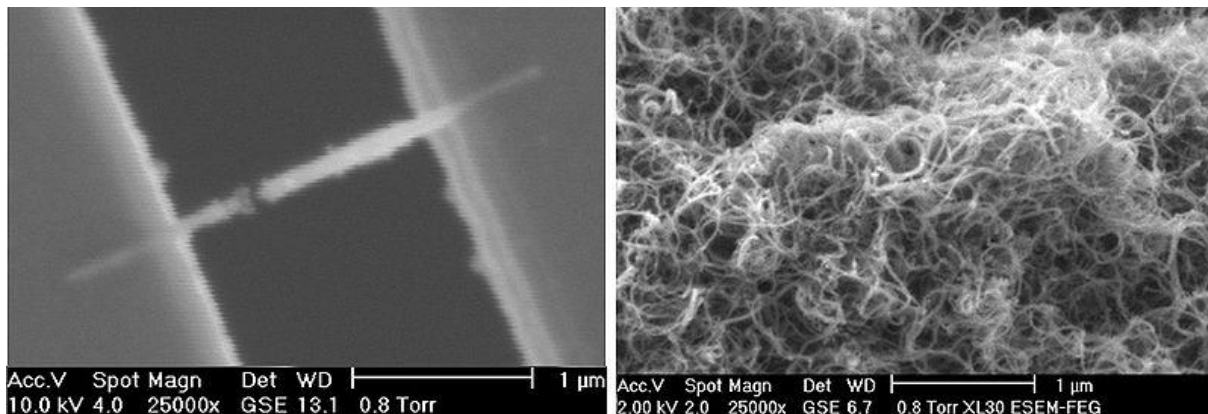
[21, 30]



Obr. 5 Typy uhlíkových nanotrubiček – schémata [30]

Pozoruhodnou vlastností nanotrubiček je výrazně velký poměr délky ku šířce. Jednovrstvé uhlíkové nanotrubičky mají vnitřní průměr typicky od 1,2 do 1,4 nm, přičemž jejich délka může dosahovat až několika set μm . U vícevrstvných nanotrubiček je jejich vnitřní průměr běžně od 1 do 3 nm, vnější kolem 10 nm. Jednotlivé nanotrubičky spolu interagují prostřednictvím van der Waalsových sil a vytvářejí provazce a svazky. Nanotrubičky jsou velmi pevné, pružné a teplotně stabilní, podle jejich stočení rozlišujeme polovodivé nebo vodivé. Do budoucna se jeví rozličná perspektivní uplatnění, např. jako brusné materiály, úložiště energie, nosiče katalyzátoru, vodiče, palivové články, apod... V kombinaci s jiným

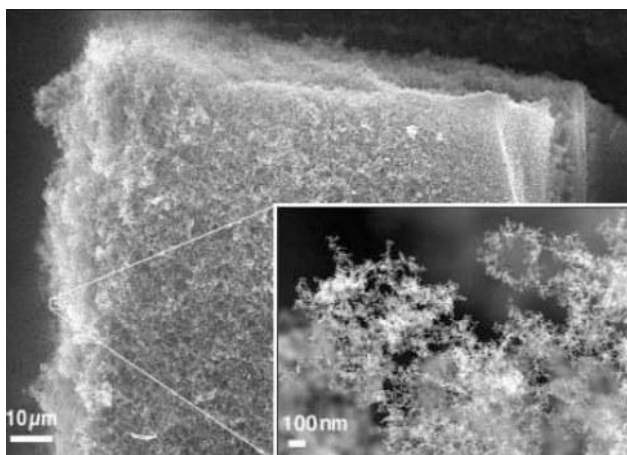
materiálem součást vysokopevnostních kompozit. Budoucnost nám dává velkou naději při využití nanotrubic v molekulární elektronice (paměti, tranzistory). [21]



Obr. 6 Nanotrubičky – mikrosnímek [30]

2.5.6.4 Uhlíková nanopěna

Uhlíková nanopěna (carbon nanofoam) je nejnověji známou alotropickou úpravou uhlíku. Vznikla působením výkonného laserového pulzního systému na uhlíkový terčik v argonové atmosféře. Nanopěna má fraktálovitou strukturu sestávající z uhlíkových klastrů (viz. Obr. 7), (shluků) o průměru kolem 6 – 9 nm nahodile sjednocených do „pavučiny“. Vyznačuje se mimořádnými fyzikálními vlastnostmi - je jednou z nejlehčích známých pevných látek a má velkou povrchovou plochu srovnatelnou se zeolity. Při nízkých teplotách (do 90K) projevuje oproti ostatním dosud známým formám uhlíku para- a ferromagnetické chování. [21]

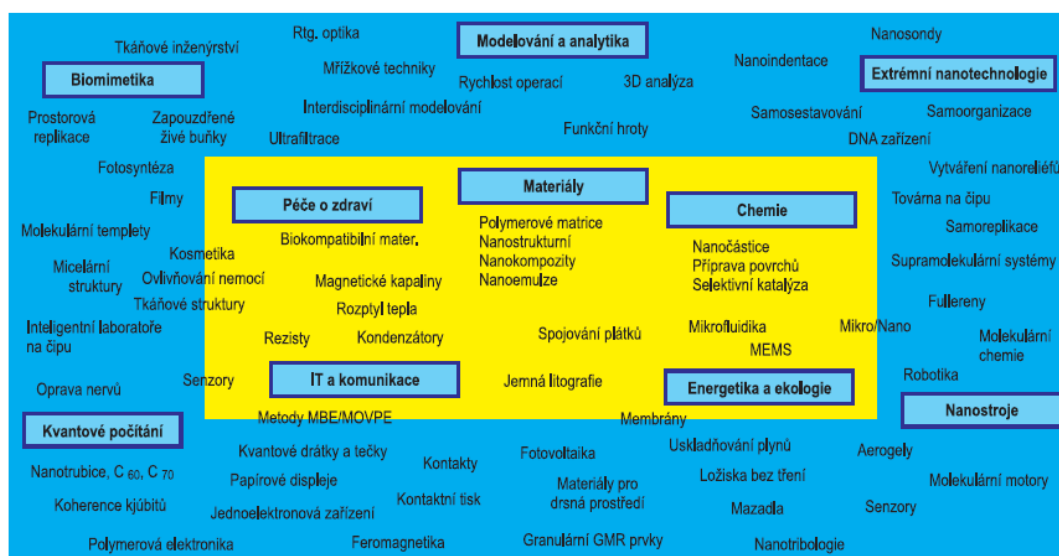


Obr. 7 Uhlíková nanopěna, snímek elektronovým rastrovacím mikroskopem. [31]

2.6 Aplikace nanotechnologie

Nanotechnologie je bezpochyby technologie budoucnosti. Díky nanotechnologii se objevily nové vědní obory jako spintronika, která se snaží využít spinu elektronu v elektronických součástkách, dále pak mohutně se rozvíjející bionanotechnologie a nanobiotechnologie. Bionanotechnologie využívá poznatky získané ze zkoumání přírody (např. vliv složení biomateriálů na jejich vlastnosti, strategie vytváření biologických struktur atd.) k vytváření nových přístrojů, systémů a materiálů v nanorozměrech, naproti tomu nanobiotechnologie používá přístroje a metody nanotechnologie a nové materiály zvláštních vlastností ke studiu a úpravě biosystémů na molekulární úrovni. [20, 21]

V současné době se již výrobky z nano světa stávají běžnou součástí našeho života v oborech, jako je např. zdravotnictví, farmacie, energetika, zemědělství, vojenství a průmysl. Na obr. 8 je vyznačena žlutou barvou oblast současného využívání, modrá barva značí předpokládaný vývoj v následujících cca 50 letech. Jedním z oborů, kde se v budoucnosti dá očekávat masivní nástup těchto technologií, je např. biomedicína. Zde se podařilo syntetizovat lipozomy k cílené distribuci léčiv, k analýze tělních tekutin je využito magnetických nanočástic, vývoj nových fluorescentních látek přinesl nové detekční metody. V průmyslových odvětvích probíhá další rozvoj nanotechnologií, ať již v oblasti povrchových úprav materiálů nebo ve stavbě samotných materiálů a jejich struktur, což vede k výraznému vylepšení jejich fyzikálních vlastností. Z hlediska dlouhodobého vývoje lze očekávat objev neznámých jevů působících v nanorozměrech, na základě čehož se objeví nové materiály, jejich výrobní postupy a aplikace. [20]



Obr. 8 Nanosvět [20]

V elektrotechnice se nanotechnologie v současnosti uplatňuje v oborech, jako je mikroelektronika, k výrobě křemíkových tranzistorů, což přináší zmenšení, zrychlení a snížení energetické náročnosti vyráběných tranzistorů, a to vede ke snížení ceny a zvýšení výkonnosti jednotlivých zařízení. Podobně využitím nanotechnologie dochází u záznamových médií ke zvýšení jejich kapacity. Na základě výše uvedených příkladů uplatnění se dá říci, že mikroelektronika směřuje k nanoelektronice. [20]

Jednou z oblastí budoucího využití nanotechnologií jsou jednoznačně izolační materiály a technologie. Jako perspektivní materiály se jeví jednak nanodielektrika a např. nedávno objevený materiál fluorografen. Svými vlastnostmi je podobný teflonu. Mechanicky je mimořádně tuhý a elastický stejně jako výchozí materiál grafen. Na rozdíl od grafenu je to vynikající izolátor s vysokou tepelnou a chemickou stabilitou. V podstatě se jedná o jednoatomární grafenovou vrstvu nadopovanou atomy fluoru. Fluorografen je nejtenčí možná, průhledná, elektricky nevodivá a v širokém rozsahu tepelných a chemických podmínek stabilní, mechanicky odolná vrstva, jejíž využití se bude odvíjet od ceny základní suroviny - grafenu. [32, 33]

3 Aplikace nanodielektrik v izolační technice

U elektrických součástí a zařízení, která jsou stále menší a kompaktnější než běžné zařízení stejných parametrů, jsou kladeny větší nároky na izolaci. Od nových izolačních materiálů se očekává, že budou odolnější a budou mít vyšší spolehlivost než jejich současné protějšky. Jednou z možností je nahrazení v současné době používaných materiálů nanomateriály, což umožní další miniaturizaci a vylepšení stávajících vlastností a mj. úsporu materiálu. V oblasti nanomateriálů, jak bylo zmíněno již v předchozí kapitole, v současnosti probíhá velmi intenzivní výzkum zahrnující samozřejmě i oblast izolačních materiálů.

3.1 Co jsou nanodielektrika?

Označení "NanoDielectric", navržené v roce 2001, shrnuje výzkumnou činnost o dielektrikách velikosti nanometrů a dielektrikách spojených s nanotechnologií a produkcí molekulárně přizpůsobených materiálů. Mezipovrchové síly nanometrických úkazů jsou zde popsány klasickými makroskopickými teoriemi, ale i kvantovými mechanickými teoriemi. Tyto jevy jsou mezoskopické, tzn. že jsou mezi makroskopickým a atomárním měřítkem. Toto zkoumání zahrnuje nejen elektrickou izolaci, ale také elektrotechnické systémy a je přizpůsobené nanokompozitům. [34]

Nanokompozity jsou materiály skládající se ze dvou částí, a to z matrice a rozptýlených částic ve velikosti od 1 do 100 nm. Perspektivními materiály budoucnosti se jeví „nanokompozita“ složená většinou z polymerů a maloprocentně zastoupenými nanoplňivy. Tyto systémy jsou na bázi buď epoxidové pryskyřice, polyamidu nebo silikonových pryží a nanoplňiv, jimiž jsou jíly, křemičitany a oxidy hliníku i dalších kovů. Častými materiály používanými na matrice jsou polyethyleny, polyamidy, polypropylény, EVA kopolymer a epoxidové nebo silikonové pryskyřice. Jako nanoplňiva se používají anorganické oxidy (SiO_2 , Al_2O_3 , ZnO , TiO_2) a jíly, které patří do obecné skupiny fylosilikátů. Největším problémem v současnosti je příprava dostatečně kvalitních vzorků pro prováděné výzkumy. V ideálním případě jsou v homogenní matrici rovnoměrně rozptýleny částice nanoplňiva. V reálném případě rozmíchání těchto nanočástic není dokonalé, a tyto vytváří drobné shluky. Dalším problémem jsou např. nečistoty u nanoplňiv z přírodního jílu, které nelze snadno odstranit, nebo neslučitelnost hydrofilních nanočástic s hydrofobním polymerem, což má za následek špatné mezifázové interakce. Nanoplňiva v polymerních materiálech jsou důležitá pro

zlepšení elektrických i dalších vlastností, mj. tepelné vodivosti, koeficientu tepelné roztažnosti a tepelné odolnosti. Příčinou těchto změn je velmi velká povrchová oblast přidružená k vnitřnímu rozhraní při dostatečně malém plnění. Podle prozatímních poznatků se zdá, že se tyto vlastnosti projevují za podmínky podobné velikosti plniva a polymerového řetězce. Mechanismy elektrické vodivosti nejsou dosud zcela objasněny a zabývá se jimi řada výzkumných prací. [34, 35, 36, 37]

U polymerní matrice rozeznáváme tři hlavní kategorie materiálů: termoplasty, reaktoplasty a elastomery. Nanoplňniva mohou být klasifikovaná podle jejich rozměrů: jedno-dimenzionální (obvykle označujeme jako destičky), dvou-dimenzionální (nanodráty a nanotrubičky) a tří-dimenzionální (anorganické oxidy). Pro účely izolační techniky, používáme nanoplňniva buď jedno-dimenzionální – jíly, nebo vrstvené silikáty, nebo tří-dimenzionální - oxid křemičitý (SiO_2), oxid hlinitý (Al_2O_3), nebo oxid titaničitý (TiO_2). [38]

Přidáním nanočástic do polymerních matric můžeme výrazně zlepšit tepelné mechanické a elektrické vlastnosti polymerních kompozitů. Vzhledem k vynikající elektrické pevnosti oproti běžným kompozitům mohou nanodielektrika velmi výrazně prodloužit životnost technologických celků a snížit potřebu údržby. To vše při vyšším pracovním napětí, což sníží náklady a energetickou náročnost. [37]

V současné době jsou z nanokompozitů ve vývoji nanokompozitní jíly, epoxidy, anorganické oxidy nanokompozitů, uhlíkové nanotrubičky, ethylen-vinyl kopolymery, grafitové a polyetylentereftalátové nanokompozity a keramické nanokompozity. Zkoumány byly rovněž pro možnou aplikaci jako vysokonapěťové izolace. Testovány jsou např. na průraznou pevnost, permitivitu, ztrátový činitel, vybíjecí odpor. Experimentální práce na těchto materiálech ukázaly slibné výsledky v připravovaných izolačních aplikacích. [38]

V současnosti probíhá výzkum i v možnosti vylepšit vlastnosti používaných dielektrik přidáním nanočástic jako např. polypropylen, který je ve velké míře používán jako dielektrikum v kondenzátorech a kabelových izolacích, stejně jako v točivých elektrických strojích a transformátorech. Má vynikající mechanické, tepelné a elektrické vlastnosti a poskytuje vynikající ochranu proti vlhkosti a olejům. Do polypropylenů můžeme přidat malé množství (až 4% hmotnosti) nanočástic čímž dosáhneme lepších chemických a tepelných vlastností, ale také zlepšíme dielektrické vlastnosti, např. odolnost proti částečným výbojům, zvýšíme odolnost proti elektrickým poruchám. [37]

Dalším zajímavým materiálem jsou epoxidové pryskyřice, používají se jako matrice (v kombinaci se skleněnou tkaninou, PET folií, papírem apod.) k impregnaci, nebo jako izolační materiál v transformátorech. Použití nanočástic SiO_2 jako plniva polymerové matrice

se jeví velmi perspektivně. Náhradou původního mikrometrického plniva až do objemu 0,4% hmotnosti vykazuje toto nanodielektrikum vynikající vlastnosti. Navýšením objemového množství přes tuto mez, ale již např. dochází ke zhoršení dielektrické pevnosti z důvodu navýšení počtu rozhraní matrice - plnivo. [39]

3.2 Nanodielektrika a jejich aplikace v izolační technice

Z výše uvedeného se jeví, že nanodielektrika jsou velmi zajímavým materiálem pro izolační techniku, zejména v oboru silnoproudé elektrotechniky, připravované aplikace jsou na obr. 9., který představuje přínos nanodielektrik pro jednotlivé typy konkrétních aplikací. Podle tohoto obrázku předpokládáme např. u kabelů snížení izolační vrstvy, prodloužení životnosti, vyšší pracovní teplotu. Pro transformátory představuje přínos větší kompaktnost, prodloužení životnosti, a potlačení elektrického a mechanického stárnutí. U izolátorů se předpokládá zvýšení přenosového výkonu. U motorů a generátorů prodloužení životnosti, potlačení stárnutí, zvýšení pracovní teploty stroje. [40]

Nanocomposite electrical insulation materials are not HTS Program specific!

Cables:	Transformer:	Outdoor insulation:	Generators/Motors
<ul style="list-style-type: none"> • Less insulation thickness • Long lifetime • High service temperatures • Better cable accessories 	<ul style="list-style-type: none"> • Compact (less insulation thickness) • Long lifetime • Less electrical and mechanical degradation • PD resistant 	<ul style="list-style-type: none"> • Improved surface performance • Less creepage distance • No tracking and degradation under stress 	<ul style="list-style-type: none"> • PD resistant materials for wires/coils • Long lifetime • Less degradation • High temperature operation

Nanodielectrics will impact conventional power system components, e.g., long service lifetime and size reduction

Obr. 9 Připravované aplikace nanokompozit ve vn technice [40]

O tom, že o možnosti jejich aplikace se již zajímají komerční subjekty, vypovídá vědeckovýzkumný projekt ANASTASIA (Advanced NANO-Structured TapeS for electrotechnical high power Insulation Applications) financovaný Evropskou unií. Cílem tohoto projektu je vývoj radikálně inovovaných elektroizolačních pásek a jejich výrobního procesu za účelem zvýšení energetické účinnosti elektrotechnických systémů. V konsorciu

mají zastoupení průmysloví výrobci, výzkumné laboratoře, akademické instituce a koncoví uživatelé generátorů. Předpokladem tohoto projektu je, že současné slídkové pásy používané v izolačních systémech velkých generátorů, neodpovídají současnému stavu poznání a jsou limitujícím faktorem pro další zvýšení účinnosti přeměny energie. [36]

U elektrických strojů ať už točivých, nebo netočivých použití nanodielektrik prodlouží životnost zařízení, přinese větší odolnost proti elektrickému i mechanickému stárnutí materiálu a zvýší elektrickou i mechanickou pevnost jednotlivých komponent a tím i celého zařízení. Zlepšení dielektrické pevnosti umožní snížit množství izolace na stejné napětové hladině, což povede k významným úsporám pro výrobce i uživatele. Menší potřeba izolace přinese ekonomické úspory a poskytne kompaktnější zařízení, ale nemělo by jí být dosaženo bez zajištění dostatečné spolehlivosti. [41]

Příkladem aplikace u točivých strojů mohou být např. silikátové nanokompozity na bázi slídy - nanokompozity s anizotropními elektrickými vlastnostmi, které jsou žádoucí pro zlepšení odolnosti izolace rotačních strojů proti částečným výbojům. [42].

V přeplněných oblastech, jako jsou velká města, bude mít úspora izolace silových kabelů za následek zvýšení průřezu vodičů, případně zvýšení jejich počtu a tím zvýšení přenosového výkonu. Pro krátké vzdálenosti (méně než 2 km) již existuje konkurenční technologie - kryogenní vysokoteplotní supravodivý napájecí kabel, který může nést až přibližně desetinásobek výkonu ve stejném průřezu. U této problematiky je ale nutno nejprve vyřešit např. technologie kryo chlazení dlouhých kabelů. Nicméně i pro potřeby této kryo technologie se již chystají nanomateriály. [41]

Vývoj spěje k myšlence, aby nanokompozity mohly být vyrobeny na míru dielektrických vlastností, tedy kontrolovatelné permitivity a vodivosti jako funkce teploty, elektrického pole a frekvence. Přestože úloha rozhraní mezi maticí a plnivem není dosud zcela objasněna její velikost se stává stále důležitější a nakonec se stane zcela dominantní pro určení vhodných vlastností materiálu. [42]

Závěr

V současné době probíhá intenzivní výzkum možností nanodielektrik. Pro snížení ceny a následně pro masové využití výše popsaných materiálů je nutno nejprve zajistit potřebné technologie a zajistit sériovou výrobu nanodielektrik. Je to spirála, ve které poptávka umožňuje i rozvoj výrobních technologií, jeho cenovou dostupnost a další výzkum. To povede k novým aplikacím a tedy i k dalšímu zvýšení poptávky.

Lze předpokládat, že zvládnutí těchto výrobních procesů bude mít za následek „malou revoluci“ například v konstrukci elektrotechnických celků, jako motorů, transformátorů apod. Vlivem použití nanodielektrik namísto v současnosti používaných materiálů, dojde například ke snížení fyzického objemu, následkem čehož bude snížena hmotnost konstruovaného celku, dále ke zmenšení vnějších rozměrů oproti svému předchůdci při zachování stávajících technických parametrů.

Domnívám se, že přechod od v současnosti používaných materiálů k nanomateriálům v izolační technice je dalším krokem na cestě k vývoji „inteligentních materiálů“, u nichž bude možno pomocí různých nanopřísad např. cíleně „programovat dielektrika“, a tím předem nastavit činnost konkrétního technologického celku.

Použitá literatura

- [1] Červený, J.: *Projektování elektrických zařízení*, Plzeň, studijní materiály ZČU 2008
- [2] Mentlík, V.: *Dielektrické prvky a systémy*, Praha, BEN 2006
- [3] Kazelle, J., Liedermann, K., Jiráček, J., Havlíček, S., Vaněk, J., Rozsivalová, Z., Sedlaříková, M.: *Elektrotechnické materiály a výrobní procesy*, Brno, skriptu, VUT
- [4] Drápala, J., Kursa, M.: *Elektrotechnické materiály*, Ostrava, skriptu VŠB 2010
- [5] Ižo, M., Tököly, F.: *Elektrotechnické materiály pro SOU*, Praha, SNTL 1986
- [6] Stauber, J.: *Funkční hodnocení izolačních systémů a cesty vedoucí k vyššímu využití*, Plzeň 2007 [online]. [cit. 2011-05-05]. Dostupné z:
http://147.228.94.30/images/PDF/Rocnik2007/spec_cislo_diagnostika07/r0c2c10.pdf
- [7] Kartit (Pertinax) – tvrzený papír. [online]. [cit. 2012-02-01]. Dostupné z:
[http://www.rempo.cz/oddeleni/106/Kartit-\(Pertinax\)---tvrzeny-papir.aspx](http://www.rempo.cz/oddeleni/106/Kartit-(Pertinax)---tvrzeny-papir.aspx)
- [8] Textit. [online]. [cit. 2012-02-05]. Dostupné z: <http://www.eppplasty.cz/textit.htm>
- [9] Plasty Morava. [online]. [cit. 2012-02-05]. Dostupné z:
<http://www.plastymorava.estranky.cz/clanky/sklotextit.html>
- [10] Tvrzené vrstvené dřevo Lignostone [online]. [cit. 2012-02-05]. Dostupné z:
<http://www.poziadavka.sk/ponuky/ponuka-87013/Tvrzene-vrstvene-drevo-Lignostone>
- [11] Polyimidy PI. *Elchemco* [online]. [cit. 2012-02-05]. Dostupné z:
<http://web.elchemco.cz/KAPTON.php>
- [12] Syntetické makromolekulární látky [online]. [cit. 2012-02-05]. Dostupné z:
http://www.chem-web.info/Study/3/Synteticke_makromolekularni_latky.pdf
- [13] Termoplasty.divoce.cz. [online]. [cit. 2012-02-05]. Dostupné z:
<http://termoplasty.divoce.cz/>
- [14] [online]. [cit. 2012-02-05]. Dostupné z:
http://www.vslib.ft.vslib.cz/depart/knt/web/index2.php?option=com_docman&task=doc_view&gid=50&Itemid=53
- [15] Technologie II. Plasty a jejich zpracovatelské vlastnosti. [online]. [cit. 2012-02-05]. Dostupné z:
http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/01.htm#012
- [16] Kubalík, J., Stejskal, M.: *Perspektivy v oblasti kapalných izolantů* [online]. [cit. 2012-02-05]. Dostupné z:
<http://ketsrv.fel.zcu.cz/diagnostika/konference/Sbornik/Sekce2/105.pdf>
- [17] Makówka, T.: *Diagnostika vlastností elektroizolačních kapalin*, Brno, Diplomová práce VUT 2010, [online]. [cit. 2012-02-19]. Dostupné z:
http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=28700
- [18] Mentlík, V., Pihera, J., Polanský, R., Prosr, P., Trnka, P.: *Diagnostika elektrických zařízení*, Praha, BEN 2008
- [19] Záliš, K.: *Částečné výboje v izolačních systémech elektrických strojů*, Praha, Academia 2005
- [20] Prnka, T., Šperlink, K.: *Nanotechnologie, Šestý rámcový program evropského výzkumu a technického rozvoje*, Ostrava, Repronis 2004 [online]. [cit. 2012-03-08]. Dostupné z: <http://www.nanotechnologie.cz/storage/nanotechnologie6.pdf>

- [21] Hájková, Z., Šmejkal, P.: *Nanotechnologie pro život*, (projekt 5P – program pro pedagogy přírodovědných předmětů), Praha 2010, [online]. [cit. 2012-03-08]. Dostupné z:
https://docs.google.com/viewer?a=v&q=cache:WqvflXxOjEIJ:files.projekt5p.cz/200000286-22ce123c87/DP%2520nanotechnologie_pro_5P_2010_brozura.pdf+H%C3%A1jko%C3%A1,+Z.,+%C5%A0mejkal,+P.:+Nanotechnologie+pro+%C5%BEivot&hl=cs&gl=cz&pid=bl&srcid=ADGEESjTeZXO5u8cJVermLRR--Fcf9Toc-yMK_hxjhWOhxR438a0He1OBoy8m8BPBSZ1soCUrAyH3OuthIAqIk7rKWb9jJ0izsEIEGhJfhVuyzrxrXL_0Tz51j3RGN4JRjWp3V11bxaj&sig=AHIEtbTI_Xu-yxaT24fxqoSEBZ4TdXvJHQ
- [22] Hošek, J.: *Úvod do nanotechnologie*, Praha, ČVUT 2010
- [23] Jachanová, K.: *Studium přípravy nanočástic stříbra ve smíšeném prostředí voda – organické rozpouštědlo*, Olomouc, Bakalářská práce UP 2010, [online]. [cit. 2012-03-09]. Dostupné z: <http://theses.cz/id/7dqbm/115567-406642100.pdf>
- [24] Krejčí, K.: *Účinek některých vybraných činidel (nanomateriálů) na patogenní mikroorganismy*, Brno, Bakalářská práce MU 2010, [online]. [cit. 2012-03-09]. Dostupné z:
http://is.muni.cz/th/269815/prif_b/2010_Bakalarska_Prace_Kamila_Krejci.pdf
- [25] Prnka, T., Šperlink, K.: *Bionanotechnologie, Nanobiotechnologie, Nanomedicína*, Ostrava 2006, [online]. [cit. 2012-03-28]. Dostupné z:
<http://www.nanotechnologie.cz/storage/nanotechnologie200610.pdf>
- [26] *Nanospider zahájil nanorevoluci*, Svět vědy.cz, [online]. [cit. 2012-03-30]. Dostupné z: <http://svetvedy.cz/nanospider-zahajil-nanorevoluci/>
- [27] *Jejich textilie nepustí k tělu viry, vyrábějí je jako jedini v Evropě*, Dnes, vydání 19.9.2011, Severní Čechy
- [28] Zukal, A.: *Moderní trendy syntézy nanoporézních materiálů*, Praha 2006, Chemické listy 101, 208–216 (2007), [online]. [cit. 2012-03-30]. Dostupné z
http://www.chemicke-listy.cz/docs/full/2007_03_208-216.pdf
- [29] Fullereny. [online]. [cit. 2012-03-30]. Dostupné z:
<http://cs.wikipedia.org/wiki/Fullereny>
- [30] Uhlíkové nanotrubičky. [online]. [cit. 2012-03-30]. Dostupné z:
http://cs.wikipedia.org/wiki/Uhl%C3%ADkov%C3%A9_nanotrubi%C4%8Dky
- [31] Švorčík, V.: *Polymery a nanomateriály*, Praha, skripta 12.týden VŠCHT, [online]. [cit. 2012-03-30]. Dostupné z http://www.vscht.cz/ipl/osobni/svorcik/skripta/tyden_12.pdf
- [32] Nair R. R., Ren W., Jalil R., Riaz I., Kravets V. G., Britnell L., Blake P., Schedin F., Mayorov A. S., Yuan S., Katsnelson M. I., Cheng H. M., Strupinski W., Bulusheva L. G., Okotrub A. V., Grigorieva I. V., Grigorenko A. N., Novoselov K. S., Geim A. K.: *Fluorographene: A Two-Dimensional Counterpart of Teflon*, Weinheim, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KgaA 2010, [online]. [cit. 2012-04-08]. Dostupné z:
- [33] Gregorová D.: *Fluorografen – nadějný nástupce teflonu*, OSEL, [online]. [cit. 2012-04-08]. Dostupné z: <http://www.osel.cz/index.php?clanek=5382>
- [34] Sedláček M.: *Vliv nanočástic na vlastnosti elektroizolačních materiálů*, Brno, Diplomová práce VUT 2009, [online]. [cit. 2012-04-09]. Dostupné z:
http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=17707
- [35] Polsterová H.: *Teplotní změny elektrických vlastností nanokompozitu na bázi epoxidové pryskyřice*, Electroscope 2011/1 [online]. [cit. 2012-04-09]. Dostupné z:
http://147.228.94.30/index.php?option=com_content&view=article&id=243:teplotni-zmny-elektricky-vlastnosti-nanokompozitu-na-bazi-epoxidove-pryskyrice&catid=32:cislo-12011&Itemid=48

- [36] Boček J., Mentlík V.: *Aspekty užití nanokompozitních dielektrik*, Plzeň, ZČU [online]. [cit.2012-04-10]. Dostupné z: <http://ketsrv.fel.zcu.cz/diagnostika/konference/Sbornik/Sekce4/95.pdf>
- [37] Bamji S.S., Bulinski A., Dakka M. A.: *Nanodielectric Materials for High Voltage Devices*, Institute for National Measurement Standards, National Research Council, Ottawa, Ontario K1A 0R6, Canada [online]. [cit. 2012-04-25]. Dostupné z: [http://wjoe.hebeu.edu.cn/ICCE-17%20proceedings%20Hawaii%20USA/Bamji,%20S.S.%20\(Nat.Res.Council,%20Ottawa,%20Canada\)%20%2057.pdf](http://wjoe.hebeu.edu.cn/ICCE-17%20proceedings%20Hawaii%20USA/Bamji,%20S.S.%20(Nat.Res.Council,%20Ottawa,%20Canada)%20%2057.pdf)
- [38] Lau K. Y., Piah M. A. M.: *Polymer Nanocomposites in High Voltage Electrical Insulation Perspective*, Faculty of Electrical Engineering, Universiti Teknologi Malaysia, Malaysian Polymer Journal, Vol. 6, No. 1, p 58-69, 2011. [online]. [cit. 2012-04-25]. Dostupné z: <http://www.cheme.utm.my/mpj/images/MPJVol612011/mpj-lau-09-10.pdf>
- [39] Shin J. Y., Park H. D., Choi K. Ch., Lee K. W., Lee J. Y., Hong J. W.: *Electrical Properties of the Epoxy Nano-composites according to Additive*, Transactions on Electrical and Electronic Materials vol. 10, no. 3, June 25, 2009. [online]. [cit. 2012-04-25]. Dostupné z: http://kieeme.or.kr/storage/journal/T/10_3/13569/articlefile/article.pdf
- [40] Tuncer E., Sauers I.: *Strategic Dielectrics R&D for HTS and other OE Applications*, Westin Alexandria, VA 2010, DOE Peer Review [online]. [cit. 2012-04-25]. Dostupné z: http://www.htspeerreview.com/pdfs/presentations/day%202/applications/3_AP_StrategicDielectricRD_HTSandOtherOEApplications.pdf
- [41] Tuncer E., Sauers I.: *Industrial Applications Perspective of Nanodielectrics*, Oak Ridge National Laboratory [online]. [cit. 2012-04-25]. Dostupné z: <http://info.ornl.gov/sites/publications/files/Pub15336.pdf>
- [42] Cao Y., Irwin P. C., Younsi K.: *The Future of Nanodielectrics in the Electrical Power Industry*, GE Global Research Center Niskayuna, NY, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 11, No. 5; October 2004 [online]. [cit. 2012-04-25]. Dostupné z: http://www.lehigh.edu/imi/winterschool_lectures/Y.Cao_Nanocomposites.pdf