

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Elektroizolační systém s nanopřísadou

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2016/2017

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Ondřej MICHAL**
Osobní číslo: **E15N0027P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**
Název tématu: **Elektroizolační systém s nanopřísadou**
Zadávací katedra: **Katedra technologií a měření**

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


1. Prostudujte a uveďte vlastnosti izolačních systémů točivých elektrických strojů.
2. Na základě získaných poznatků tyto používané izolační systémy rozřídte a zhodnoťte.
3. U vybraného izolačního systému proměřte jeho vlastnosti.
4. Pro vybraný izolační systém ověřte možnost modifikace jeho vlastností nanopřísadou.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**
Rozsah kvalifikační práce: **40 - 60 stran**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**
Seznam odborné literatury:


1. Mentlík, V: Dielektrické prvky a systémy, BEN Praha 2006

Vedoucí diplomové práce: **Prof. Ing. Václav Mentlík, CSc.**
Katedra technologií a měření

Datum zadání diplomové práce: **14. října 2016**
Termín odevzdání diplomové práce: **19. května 2017**


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




Doc. Ing. Aleš Hamáček, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 14. října 2016

Abstrakt

Předkládaná diplomová práce se zabývá elektroizolačními materiály a jejich modifikacemi pomocí nanoplňiv. Teoretická část shrnuje nejdůležitější aplikace elektroizolačních materiálů v točivých elektrických strojích. Rozděluje a shrnuje hlavní výhody jednotlivých elektroizolačních systémů. Dále rozebírá problematiku kompozitních materiálů, jejich složení a charakteristické vlastnosti jednotlivých složek. Závěrem teoretické části je popsána problematika modifikací polymerních materiálů nanoplňivy a jejich vliv na elektroizolační vlastnosti. Praktická část diplomové práce je zaměřena na modifikaci impregnačního laku TSA220 nanočásticemi SiO₂ společně s polyamidovými nanovlákninami a zkoumání jejich vlivu na změny elektroizolačních vlastností v průběhu aplikace zrychleného tepelného stárnutí.

Klíčová slova

Polymer, kompozit, nanokompozit, nanotechnologie, TSA220, izolace, izolační systém, SiO₂, ztrátový činitel tgδ, vnitřní rezistivita, tepelné stárnutí

Abstract

This diploma thesis deals with electroinsulating materials and their modifications using nanofillers. The theoretical part summarizes the most important applications of electrical insulating materials in electric rotary machines. It divides and summarizes the main advantages of individual electrical isolation systems. It further analyzes the problems of composite materials, their composition and the characteristics of individual components. At the end of the theoretical part is description of the possible modifications of polymer materials using nanofillers and how those modifications change the electrical properties of final material. The practical part of the diploma thesis is focused on modification of TSA220 impregnation lacquer with nanoparticles SiO_2 together with polyamide nanofibers and investigation of their influence on changes of electroinsulating properties during application of thermal aging.

Key words

Polymer, composite, nanocomposite, nanotechnology, TSA220, insulation, isolation system, SiO_2 , loss factor tg, internal resistivity, thermal aging

Prohlášení

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 bakalářské práce, je legální.

.....
Podpis

V Plzni dne 16.5.2017

Bc. Ondřej Michal

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu své diplomové práce panu prof. Ing. Václavu Mentlíkovi, CSc. za pomoc a trpělivost při kontrole diplomové práce, za odborné vedení a uvedení do problematiky.

Dále bych rád poděkoval Ing. Lukášovi Harvánkovi za cenné rady při experimentální části této diplomové práce.

Obsah

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	9
ÚVOD.....	10
1 IZOLAČNÍ SYSTÉMY PRO TOČIVÉ ELEKTRICKÉ STROJE.....	11
1.1 IZOLACE VINUTÍ V DRÁŽKÁCH.....	11
1.1.1 Izolace mezi vodiči	11
1.1.2 Izolace mezi závitů.....	12
1.1.3 Drážková izolace	12
1.2 IZOLAČNÍ SYSTÉMY PRO NÍZKONAPĚŤOVÉ TOČIVÉ STROJE	13
1.2.1 Izolace mezi vodiči	13
1.2.2 Drážková izolace	13
1.2.3 Impregnační laky.....	14
1.3 IZOLAČNÍ SYSTÉMY PRO VYSOKONAPĚŤOVÉ TOČIVÉ STROJE.....	14
1.3.1 Resin Rich.....	15
1.3.2 Vacuum pressure impregnation (VPI).....	16
1.3.3 Porovnání systémů Resin Rich a VPI.....	17
2 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY.....	19
2.1 KOMPOZITNÍ MATRICE	20
2.1.1 Termoplastické matrice	21
2.1.2 Termosetické matrice.....	21
2.1.3 Epoxidové pryskyřice.....	22
2.2 KOMPOZITNÍ PLNIVA.....	24
2.2.1 Částicová plniva.....	24
2.2.2 Vláknitá plniva	26
3 NANOKOMPOZITNÍ MATERIÁLY	28
3.1 NANOKOMPOZITNÍ PLNIVA	29
3.1.1 Oxid křemičitý – SiO_2	30
3.1.2 Oxid hlinitý – Al_2O_3	30
3.2 DISPERZE NANOČÁSTIC V MATRICI.....	31
3.3 VLIV NANOPLNIVA NA ELEKTRICKÉ VLASTNOSTI	32
3.3.1 Z hlediska komplexní permitivity.....	32
3.3.2 Z hlediska ztrátového činitele $tg \delta$	34
3.3.3 Z hlediska prostorového náboje	35
3.3.4 Z hlediska rezistivity.....	35
3.3.5 Z hlediska elektrické pevnosti.....	36
4 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST.....	38
4.1 SPECIFIKACE VZORKŮ.....	38
4.2 POSTUP VÝROBY	39
4.2.1 Příprava.....	39
4.2.2 Míchání.....	39
4.2.3 Vakuování.....	40
4.2.4 Zalévání do forem a vytvrzování	40
4.3 MĚŘÍCÍ METODY	41
4.3.1 Absorpční a resorpční charakteristiky	41
4.3.2 Ztrátový činitel a permitivita	42
4.3.3 Napěťové zkoušky	43

4.4	VÝSLEDKY EXPERIMENTU	43
4.4.1	<i>Polarizační indexy</i>	43
4.4.2	<i>Vnitřní rezistivita</i>	44
4.4.3	<i>Závislost ztrátového činitele a permitivity na teplotě</i>	45
4.4.4	<i>Elektrická pevnost</i>	47
5	ZÁVĚR	49
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	51

Seznam symbolů a zkratek

C	[F]	kapacita
d	[m]	průměr
Ep	[kV·mm ⁻¹]	elektrická pevnost
f	[Hz]	frekvence
h	[m]	tloušťka zkušebního vzorku
I	[A]	proud
I _s	[A]	Ustálený absorpční proud
i ₁₅	[A]	absorpční proud v 15. vteřině
i ₆₀	[A]	absorpční proud v 60. vteřině
i ₁₀	[A]	absorpční proud v 10. minutě
l	[m]	Délka
m	[kg]	Hmotnost
n		počet závitů
pi ₁	[-]	minutový polarizační index
pi ₁₀	[-]	desetiminutový polarizační index
R	[Ω]	Odpor
R _i	[Ω]	izolační odpor
SEM		skenovací elektronový mikroskop
T	[°C]	Teplota
t	[s]	Čas
tg δ	[-]	ztrátový činitel
U	[V]	stejnoseměrné napětí
U _p	[V]	průrazné napětí
VPI		vacuum pressure impregnation
ε ₀	[F·m ⁻¹]	permitivita vakua 8,854188.10 ⁻¹² f·m ⁻¹
ε _r	[-]	relativní permitivita
ρ _v	[Ω·m]	vnitřní rezistivita
υ _x	[%]	variační koeficient
	% hm.	procentní hmotnostní podíl

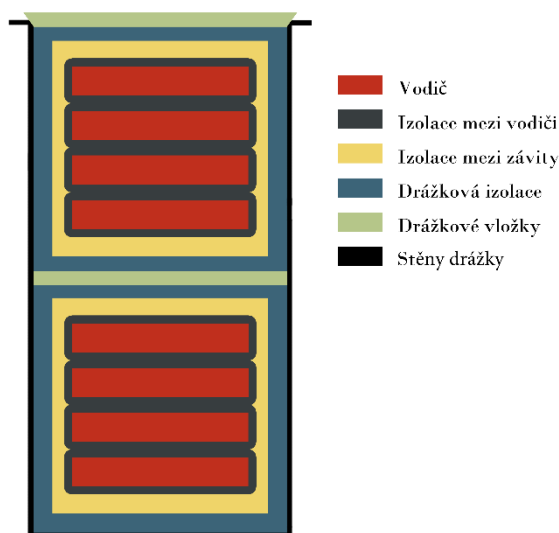
Úvod

Etapy lidské společnosti jsou již od pravěku nazývány podle využitých materiálů či hlavních technologických pokroků, které v těchto dobách nastaly. Od doby kamenné, přes průmyslovou revoluci, až po moderní dobu, která je v některých publikacích označována jako doba polymerní. V dnešní moderní době upoutala pozornost problematika nanotechnologií, která značí další pokrok lidské společnosti v oblasti materiálů. Je pravděpodobné, že za několik let bude další etapa lidské společnosti nazývána jako doba nano. Již dnes jsou využívány nanotechnologie v některých aplikacích. Od ochranných nátěrů, k aplikacím v lékařství či obalovém průmyslu. Termín nanotechnologie lze popsat jako technický obor, který se zabývá tvorbou a využívání technologií v měřítku nanometrů. Mezi perspektivní část tohoto odvětví lze řadit kompozitní materiály s nanostrukturami. Tyto nanokompozitní materiály se skládají z minimálně dvou složek, z níž jedna má alespoň jeden geometrický rozměr v řádech nanometrů. Z dosavadních výzkumných činností vyplývá, že tyto nanokompozitní materiály mají oproti konvenčním materiálům zlepšené tepelné, elektrické i mechanické vlastnosti a je pravděpodobné, že je v budoucnu nahradí.

Tato diplomová práce se zaměřuje na použití nanokompozitního materiálu složeného z impregnačního laku TSA220 modifikovaným nanočásticemi oxidu křemičitého (SiO_2) a polyamidovou vlákninou jakožto náhrady konvenčních elektroizolačních systémů pro točivé elektrické stroje. Tím by mohlo dojít k znatelné redukci objemu použitého izolantu, čímž se sníží náklady na výrobu stroje či zredukují rozměry při zachování stejných výkonů. Primárním předmětem výzkumu této diplomové práce je zjištění vlivu nanočástic a vlákniny ve výsledném kompozitu na elektroizolační vlastnosti a sledování jejich změn při aplikaci zrychleného tepelného stárnutí.

1 Izolační systémy pro točivé elektrické stroje

Pro správnou funkci točivého stroje, ať už motoru či generátoru, je nutné zajistit, aby i jednotlivé části točivého stroje plnily svou funkci správně. Izolační systém je jedním z těchto prvků, pod kterým chápeme komplexní izolační strukturu skládající se z jednoho či více izolačních materiálů. Tyto izolační systémy v zásadě dělíme, dle velikosti používaného pracovního napětí, na dvě hlavní skupiny a to na vysokonapěťové aplikace či nízkonapěťové aplikace. V zásadě potřebujeme v točivých elektrických strojích izolovat místa, kde prochází vinutí. Na toto vinutí je kladen velký důraz z hlediska izolace a to z důvodů působení elektrických, mechanických i tepelných namáhání. Vinutí je uloženo v drážkách a ukázkou vloženého vinutí ve stroji můžeme vidět na Obr. 1.1, kde lze vidět, že se v drážce zaměřujeme převážně na tři části, které jsou potřeba dostatečně izolovat. [1][2]



Obr. 1.1: Schéma vloženého vinutí v drážce stroje [1]

1.1 Izolace vinutí v drážkách

1.1.1 Izolace mezi vodiči

Můžeme vidět, že závity vinutí jsou rozděleny do více jednotlivých vodičů. To se provádí pro částečnou eliminaci tepelných ztrát, způsobených hromaděním proudu na krajích vodičů vlivem skinefektu a vířivých proudů. Díky takovému oddělení je proto zapotřebí izolovat jednotlivé vodiče. Na tuto izolaci je pro malé tloušťky kladen velký důraz na tepelnou odolnost. [1]

1.1.2 Izolace mezi závitů

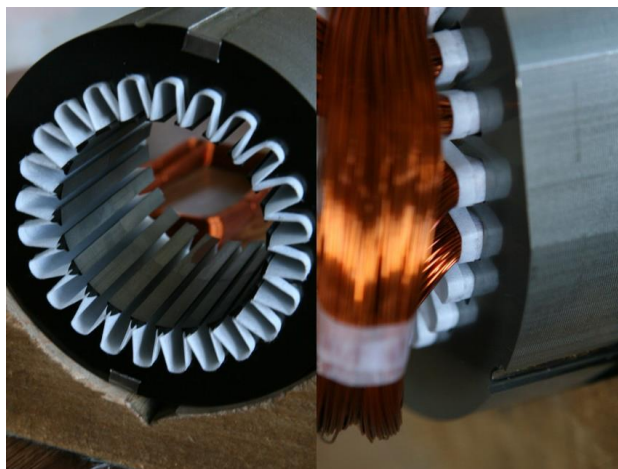
Důvod pro izolaci je zamezení dotyku a zkratu jednotlivých závitů cívky, který by ve výsledku vedl ke snížení počtu závitů cívky. V této situaci by vznikl mezi dvěma sousedními vinutími nechtěný transformující prvek, který by způsobil rapidní zvýšení proudu ve zkratovaném vinutí. Závislost velikosti tohoto proudu můžeme odvodit z níže uvedené základní rovnice. [1]

$$n_p I_p = n_s I_s \quad (1)$$

Tento fakt vede k nesprávné funkci točivého stroje a značnému oteplení izolace, které způsobí její degradaci. V dnešní době je mezizávitová izolace společná s izolantem mezi vodiči, a to hlavně z důvodu nových kvalitnějších materiálů, které nevyžadují velkou tloušťku vrstvy. [1]

1.1.3 Drážková izolace

Hlavní funkcí této izolace je oddělení vinutí od stěn drážky a zamezení jejímu poškození. Pro tento typ izolace je vybírán materiál, který musí splňovat několik požadavků. Například je kladen důraz na vysokou elektrickou pevnost z důvodů vysokých napětí působících na izolaci, pohybujících se v řádech kV. Dalším požadavkem jsou dobré mechanické vlastnosti, zejména ohebnost, a to z důvodu mechanického namáhání, ke kterému dochází při nasazování vinutí do drážek stroje. [1]



Obr. 1.2: Ukázka drážkové izolace (převzato z [3])

1.2 Izolační systémy pro nízkonapěťové točivé stroje

U malých nízkonapěťových strojů se izolační systém vinutí skládá z izolace mezi vodiči, drážkové izolace a impregnantu. [2]

1.2.1 Izolace mezi vodiči

Materiály využívané pro izolaci jednotlivých vodičů jsou závislé na velikosti použitého pracovního napětí. Je tedy spíše na výrobci, jaký typ izolantu bude použit. V praxi se tedy můžeme setkat například se slídovými páskami, polymerovými laky (polyimid, polyester, polyamid aj.) nebo neimpregnovanými papíry. [2]

1.2.2 Drážková izolace

Již bylo řečeno, že drážková izolace plní funkci jakési bariéry před mechanickým namáháním vinutí v drážce. V této aplikaci většinou najdeme drážkové lepenky, kombinované drážkové izolace či speciální materiály jako Nomex. [1][2]

Drážková lepenka, jinak označována také jako elektrotechnická lepenka, je speciální vrstvený lisovaný materiál, který je zhotovený z buničiny, hadroviny, sběrového papíru a dřevovin. Je hladká, ohebná, elastická a většinou hnědé barvy. Vyrábí se v tloušťkách od 0,1 do 3 mm. [2]

Kombinované drážkové izolace jsou izolace, složené z několika jednotlivých vrstev materiálů. Základem této izolace bývá nejčastěji polyetyléntereftalátová fólie, ke které jsou přidávány další materiály, jako skleněné tkaniny, slídové papíry, elektrotechnické lepenky aj. [2][4]

Nomex je syntetický materiál vyroben z krátkých vláken a částic aromatického polyamidu. Výhodou tohoto materiálu je jeho zpracování pomocí běžných papírenských technologií do podoby rolí. Následně je zpevňován pomocí dvou válců s lesklým povrchem (kalandrování) při vysokých teplotách. V kombinaci s dalšími materiály je využíván dle [4] v místech, kde je potřeba splnit požadavky teplotní třídy 180°C (H) a dle [2] dobře odolává teplotám i kolem 220°C. Dosahuje elektrické pevnosti až 40kV/mm. Je nehořlavý, samozhášivý a je poměrně dobře chemicky odolný.

1.2.3 Impregnační laky

Jako poslední část izolování vinutí stroje se provádí proces impregnace. Vytváří se izolační povlak, který zvyšuje elektrickou i mechanickou odolnost vinutí. Dále plní funkci ochrany použitého izolačního materiálu drážky před navlháváním, čímž přispívá k zvyšování životnosti izolace. Pro nízkonapěťové točivé stroje se impregnace provádí máčením, zaplavováním či zakapáváním. [2]

Impregnace máčením probíhá pomocí nádoby s impregantem, do které je stator či rotor ponořen. Kontroluje se únik bublinek, který naznačuje, jak moc je impregnant nanesen na vinutí. Pokud bublinky přestanou vycházet, stroj se vyjme, nechá odkapat a následně nechá vytvrdit při požadované teplotě. Impregnace zakapáváním probíhá tak, že se impregnant postupně nakape na vinutí, dokud není pokryto celé. Často zakapáváním probíhá pod vakuem pro eliminaci vzduchových bublin a nežádoucí vlhkosti. [2][5]

Používané impregnační laky lze rozdělit podle různých hledisek. Nejčastěji se rozdělují dle teplotní třídy či obsahu rozpouštědel. Rozpouštědlové laky jsou syntetické látky, které se vytvrzují za pokojové teploty či v peci po odpaření rozpouštědla. Nejsou ovšem moc vhodné pro použití na stroje s vyššími hodnotami pracovních napětí, z důvodu možné tvorby vzduchových bublinek, zanechaných po vypaření rozpouštědla. Bezrozpouštědlové laky potřebují pro vytvrzení katalyzátor. Jedná se nejčastěji o polyesterové či epoxidové pryskyřice. [2][5]

Při impregnaci máčením se využívají například jednosložkové polyesterové pryskyřice neobsahující styren, které se vytvrzují při nízkých teplotách. Dále se pro máčení, ale i zaplavování, využívají nenasycené polyesterimidové pryskyřice, které se vytvrzují za pomoci elektrického proudu a UV záření. Pro zalévání lze využít dvousložkové polyuretanové látky mající formu tvrdé gumy, které lze vytvrdit za normální teploty. [2]

1.3 Izolační systémy pro vysokonapěťové točivé stroje

Pokud vezmeme v potaz vyšší pracovní napětí stroje, je jasné, že na tuto izolaci bude kladen větší důraz z hlediska izolačních vlastností materiálu. V praxi se setkáme se dvěma výrobními postupy, a to s vakuově tlakovou impregnací (zkr. VPI) a s Resin-Rich. [2]

1.3.1 Resin Rich

Ve volném překladu lze tento izolační materiál nazvat jako materiál s již obsahující pryskyřici. Základem tohoto postupu je tříslučkový kompozit s předimpregnovaným izolačním materiálem, obsahující přibližně 30 až 40 % pojiva, který se dodává ve formě polotovaru. Nosnou částí je skleněná tkanina. Běžnou skleněnou tkaninu tvoří stáčená vlákna a celková tloušťka tkaniny je přibližně 0,14 mm. Novější technologií je použití skleněné tkaniny s rovinnými vlákny o celkové tloušťce 0,12 mm při zachování stejných mechanických vlastností. Tato změna plochy průřezu sebou přináší lepší kontakt s pojivou pryskyřicí. Navíc je elektrická pevnost pásky vyrobené touto technologií přibližně o 7% vyšší a vykazuje nižší dielektrické ztráty. [2][6]

Izolační bariéra je nejčastěji složena z kalcinovaného slídového papíru, který je hutnější, pevnější, ale méně nasáklavý oproti nekalcinovanému. Pojivem, spojujícím obě složky dohromady, může být například reaktoplastická, bezrozpuštědlová, novolaká nebo cykloalifatická epoxidová pryskyřice. Velmi důležité je, že se pojivo dodává v takzvaném B stavu, tedy částečně před vytvrzené. Pro zachování vlastností musí být materiál suchý, nelepivý a s co nejdělsí skladovatelností. Tloušťka výsledného materiálu se pohybuje v závislosti na velikosti pracovního napětí stroje od 0,15 do 0,2 mm. [2][6]

Díky tomu, že kompozit již obsahuje určitý podíl pojiva, je tento postup výhodný z hlediska nákladnosti zpracování, kdy není potřeba velkých nádob pro zalévání impregnantu či užívání velkého množství pojiva při zpracování izolace do stroje.

Navíjení resin rich izolace probíhá dvojím způsobem. Kontinuálně či diskontinuálně. Kontinuální navíjení spočívá v tom, že je páska navíjena s překrytím. Konkrétně s třetinovým, polovičním nebo dvoutřetinovým po celé délce tyče i čelech vinutí. Toto řešení je vhodné pro velké stroje. Ovinutí se provádí s určitým tahem, díky čemuž je zajištěna kvalita navinuté vrstvy. Jelikož nanášená páska je lepivá, není možné dodatečné dotažení pásky. V praxi ovinutí probíhá ručně nebo strojně, jedním typem izolační pásky a obvykle s polovičním překrytím. Pro lepší konečné vlastnosti izolace se doporučuje ovíjení v jednom směru. [2][6]

Při diskontinuálním ovinu, bývá drážková část ovinuta ručně fólií pro zabránění tvoření vrásek, které by mohli způsobit snížení hodnoty průrazného napětí a zvýšení ztrátového činitele $\tan \delta$. Krátké drážkové části cívek lze ovíjet fólií i strojně. Obvyklá hodnota stlačení izolační folie je 15–18%. [2][6]

Vytvrzování probíhá vložením vinutí do předeřátého lisu a aplikací malého tlaku. Po dosažení 100 °C dojde ke gelaci pryskyřice a tím spojení všech složek izolace. Následně se zvýší teplota na 165 °C, při které dochází k finálnímu vytvrzování izolace. V tomto stavu je nechána přibližně hodinu. Následně je potřeba lis pozvolně ochlazovat na 60 °C, kdy lze vinutí vyjmout. Pozvolně je nutné chladit, aby nedocházelo k tvorbě nehomogenit mezi izolací a vinutím. Samozřejmě celý tento postup je závislý na rozměrech vinutí, lisovacího zařízení a dalších minoritních faktorech. Po vyjmutí je aplikována na vrchní část izolace a oblast výstupů z drážek polovodivá páska s polovičním překrytím a jedním ovinem pro eliminaci výbojové činnosti v těchto oblastech. Po celém tomto procesu je vinutí připraveno pro zasazení do stroje. [2][6]

1.3.2 Vacuum pressure impregnation (VPI)

Z překladu je patrné, že při této metodě dochází k impregnaci izolantu pomocí vakua. Základem, který představuje nosnou složku izolantu pro tuto metodu, je savá slídová páska, skleněná tkanina, polyesterové rouno či syntetická fólie prosycená impregnantem. Pojiva se u této technologie využívá pouze minimálně a daný kompozit jej obsahuje přibližně jen 7%. To pouze k mechanickému zpracování pásky. Navíc musí být kompatibilní s následně použitým impregnantem, aby se předešlo vzájemnému napadení při finálním zpracování. Stěžejní záležitostí je, aby byl materiál dobře savý a došlo tak k rovnoměrnému rozložení impregnantu i při vyšším počtu vrstev pásky. Dále musí tato páska mít dostatečné mechanické a izolační vlastnosti, ohebnost a určitou minimální pevnost v tahu materiálu při navíjení, kde nesmí dojít k porušení slídové pásky. Proto by měla být minimální pevnost materiálu $80 \text{ N} \cdot \text{cm}^{-1}$. Důležitá je též soudržnost nosné části a slídového papíru. Na rozdíl od technologie Resin Rich, neobsahuje VPI žádná tvrdidla, díky čemuž je doba skladovatelnosti vyšší. Impregnanty, používající se pro tuto technologii, jsou nízkomolekulární bezrozpouštědlové epoxidové, polyesterové a silikonové pryskyřice. Tyto pryskyřice disponují dobrými elektrickými i mechanickými vlastnostmi s relativně krátkou vytvrzovací dobou a jsou vhodné pro použití v teplotních třídách 180(H) a 200(N). [2]



Obr. 1.3: Izolační materiál polyester-imid impregnovaný pomocí VPI (převzato z [10])

1.3.3 Porovnání systémů Resin Rich a VPI

Porovnání obou systémů můžeme rozdělit do několika charakteristických hledisek. Z hlediska výrobních technologií je VPI, z důvodu potřeby vakuotěsných impregnačních pecí velkých rozměrů, podstatně dražší. Na rozdíl od Resin Rich, pro kterou je zapotřebí pouze vytvrzovací forma a pec. Díky vakuové impregnaci celého stroje při VPI dochází k zakonzervování izolace do drážky a tím k nerozebíratelnému spojení izolace a drážky. Proto z hlediska opravitelnosti je výhodnější systém Resin Rich, který lze bez problému vyndat při odstávce provozu stroje. VPI systém se vyznačuje vyšší homogenitou výsledné izolace. Díky této vlastnosti se perfektně hodí pro aplikace v rozměrově menších strojích, kde lze díky dobrému odvodu tepla, minimalizaci částečných výbojů, využít tenčí vrstvy izolantu, než při použití technologie Resin Rich. [2][7]

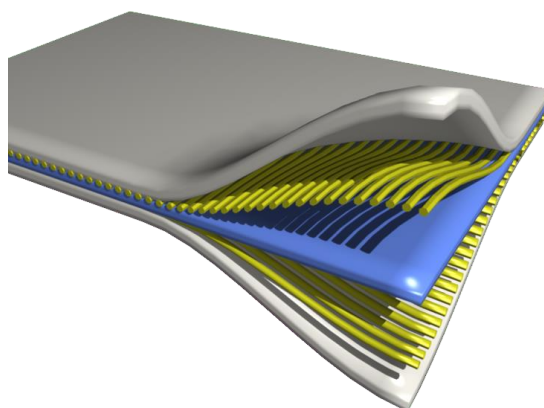
Z těchto rozdílů lze odvodit, pro jaké aplikace je jaký systém vhodný. VPI systém se vyplatí v provozech se zvýšenou prašností a možností výskytu nehomogenit, které by se mohli dostat do izolantu, a to z důvodu zapouzdření díky vakuovému systému při procesu impregnace. Naopak Resin Rich je vhodný pro aplikace, ve kterých nelze, z důvodu oprav, odmontovat celý stroj. Opravám Resin Rich systému tedy dochází převinutím, při odstávkách na místě provozu stroje. Příkladem mohou být hydrogenerátory. Oba systémy mají své výhody, nevýhody a ve výsledku záleží na samotném výrobcu, jaký systém využije ve svých strojích.[2][8]



Obr. 1.4: Přeprava statoru do nádoby pro VPI (převzato z [9])

2 Kompozitní materiály

Jsou to heterogenní materiály, které se skládají z minimálně dvou fyzikálně i chemicky rozdílných složek a samy o sobě přidávají výslednému materiálu své specifické vlastnosti. Základní kompozity mají dvě složky, které každé zajišťují svoji funkci ve výsledném materiálu. Jednou ze složek je výztuž nebo jiným názvem plnivo. Jedná se o nespojitou složku kompozitu, která zajišťuje mechanické vlastnosti, jako pevnost či tuhost. Druhá složka je spojitá, má za úkol držet tvar výsledného materiálu a říká se jí matrice (pojivo). [11]



Obr. 2.1: Ilustrační obrázek složení kompozitního materiálu (převzato z [16])

Důvodem rozmachu a stálého využívání kompozitních materiálů je jev, který při výrobě kompozitu nastane. Jedná se o synergismus kompozitu. Synergie je jev, při kterém dochází k rapidnímu zlepšení vlastností výsledného kompozitu, oproti prostému sjednocení vlastností jednotlivých složek. Všechny parametry, na nichž závisí výsledné vlastnosti kompozitních (synergických) materiálů souvisí, buď s jejich strukturou, nebo s mezifázovými vztahy (vnitřním povrchem). Tento zajímavý jev je perspektivou pro budoucí materiály, jelikož můžeme stále vyvíjet nové vylepšené materiály s požadovanými parametry pouhou kombinací jednotlivých složek. Samozřejmě jsme stále limitováni kvalitou rozhraní mezi matricí a plnivem, které má zásadní vliv na výsledné vlastnosti kompozitu. [11]

Hlavní dělení kompozitních materiálů je v závislosti na rozměrech částic použitého plniva. V zásadě se dle [11] dělí na makrokompozitní, mikrokompozitní a nanokompozitní.

Makrokompozitní materiály mají rozměry plniva v příčném směru 10^0 až 10^2 m. Jedná se o velké rozměry plniv. Nalezneme je převážně ve stavebnictví, kde je jejich hlavním zástupcem železobeton, který je typickým kompozitním materiálem skládající se z betonu a plniva v podobě železných tyčí.

Mikrokompozitní materiály jsou nejrozšířenějšími kompozitními materiály v různých odvětvích průmyslu. Rozměr jejich plniva v příčném směru činí 10^0 až 10^2 μm .

Nanokompozitní materiály jsou v posledních desetiletích předmětem mnoha výzkumných činností. Jeví se jako velmi perspektivní materiály pro budoucí aplikace. Rozměry plniv v příčném směru těchto kompozitů jsou mezi 10^0 až 10^2 nm.

2.1 Kompozitní matrice

Matricí rozumíme materiál, který slouží jako pojivý prvek pro plnivo. Zajišťuje, po zpracování, tvarově stálý materiál. Dále označovaný jako kompozit. Hlavní funkcí matrice v kompozitu je tedy přenos namáhání na plnivo, mezi jednotlivými prvky plniva a zaručit geometrickou stálost polohy plniva uvnitř kompozitu. Klíčovou vlastností matrice musí být dobrá soudržnost mezi matricí a plnivem. [11][12]

Na základě použitého materiálu matrice rozdělujeme kompozity na kovové, polymerní a keramické. Kompozity s kovovou matricí jsou houževnaté a pevné. Mezi typické zástupce patří slitiny hořčíku, hliníku či titanu. V elektrotechnice převážně stříbro či měď. Kompozity s keramickou matricí patří mezi tepelně odolné, ale relativně křehké materiály. Nejvíce využívanými jsou kompozity s polymerní matricí, které jsou, díky své malé hustotě, hojně využívaným materiálem v leteckém průmyslu. [11][12]

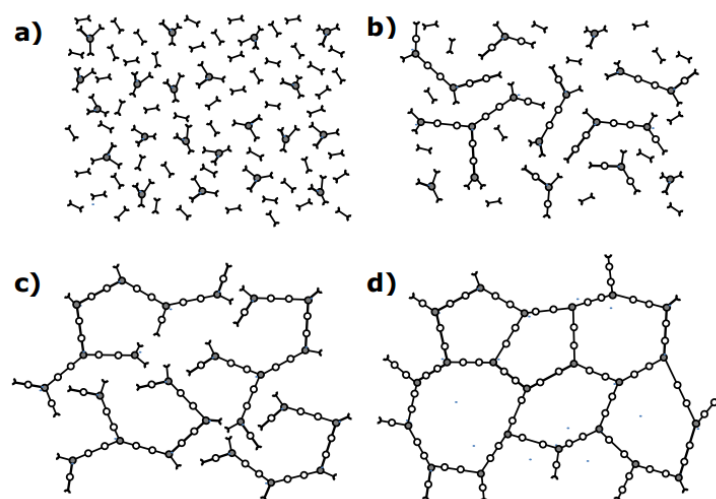
Z hlediska izolačních materiálů jsou využívány právě kompozitní materiály z polymerních matric, které jsou rozebrány v následujících kapitolách.

2.1.1 Termoplastické matrice

Termoplastické polymery zvýšenou teplotou měknou a jsou po dosažení určité teploty, která závisí na jednotlivých zástupcích této skupiny, tekuté. Při ochlazení se mění zpět na pevnou látku. Pokud bychom tento proces několikrát opakovali, nedochází ke změně vlastností polymeru. Mezi typické zástupce syntetických termoplastických polymerů využívaných v elektrotechnických aplikacích jsou polyetylen (PE), polyvinylchlorid (PVC), polypropylen (PP) a polyamid (PA). Všechny tyto polymery mají špatnou tepelnou odolnost a jejich vlastnosti se rapidně mění při vyšších teplotách. [12][13]

2.1.2 Termosetické matrice

Termosety, oproti termoplastům, jsou polymery, které v základu nejsou pevného skupenství. Svoji podobu získají při svém vytvrzení za určitých teplot, které jsou jiné pro každý termoset. Termosety procházejí při zpracovatelském procesu chemickou reakcí a účinkem tepla, záření nebo síťovacích činidel, vytvářejí husté a prostorově zesíťované struktury, v nichž jsou původní molekuly vzájemně pospojovány kovalentními vazbami. Tento proces se nazývá vytvrzování. Termoset je poté netavitelný a nerozpustný. Při případném dlouhodobějším překročení teploty dochází k degradaci a porušení zesíťované struktury polymeru, čímž dojde k destrukci. [12][13]



Obr. 2.2: Schématické znázornění procesu vytvrzování termosetu. a) monomer; b) tvoření lineárních řetězců těsně pod bodem gelace; c) tvoření formací; d) plně vytvrzený a zesíťovaný termoset. (převzato z [23])

Mezi hlavní zástupce termosetů, pro aplikace matric kompozitních materiálů, jsou dle [12] tyto:

- Nenasycené polyesterové pryskyřice (UP-R)
- Vinylesterové pryskyřice (VE-R)
- Fenolické pryskyřice (PF-R)
- Epoxidové pryskyřice (EP-R)

Nenasycené polyesterové pryskyřice jsou díky nízké viskozitě, dobrému smáčení vláken, regulovatelné rychlosti vytvrzování a relativně nízké ceně, hojně využívaným materiálem pro kompozitní materiály. Vytvrzení se provádí radikálovou kopolymerizací dvojných vazeb v pryskyřici s dvojnými vazbami molekuly styrenu. Jako tvrdidlo jsou použity organické peroxidy.

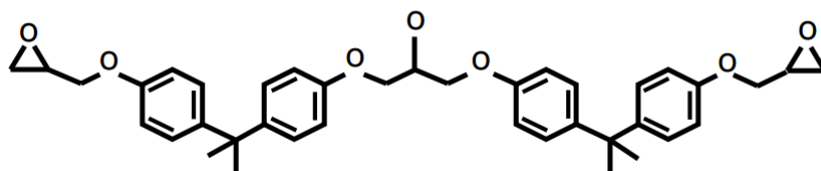
Vinylesterové pryskyřice jsou, na rozdíl od nenasycených polyesterových pryskyřic, zesíťeny pomocí koncových metakrylátových skupin. Jsou odolné proti vyšším teplotám, ale relativně křehké, a to díky nižší viskozitě a vyššímu stupni zesíťení, které je zapříčiněno krátkými molekulovými řetězci. Zpracování probíhá stejnými postupy jako nenasycené polyesterové pryskyřice.

Fenolické pryskyřice jsou vyráběny kondenzací fenolů s vodnými roztoky aldehydů v poměru 1/1. Různou kombinací fenolu a formaldehydu vznikají i různé varianty. Jednou z hlavních variant, která vznikne poměrem 1:1,2, jsou rezoly. Rezoly jsou kapalné až pevné látky s bodem měknutí kolem 70°C.

2.1.3 Epoxidové pryskyřice

Nejvíce využívané pryskyřice, které se v dnešním průmyslu vyskytují, jsou epoxidové pryskyřice. Patří mezi termosetické látky, které jsou při pokojové teplotě kapalné až pevné. V jejich molekule najdeme minimálně jednu, ale nejčastěji dvě epoxidové skupiny, které jsou nutné pro správnou funkční stavbu makromolekuly. Základní složkou tvrdidla pro epoxidové pryskyřice jsou vodíkové ionty, které reagují s epoxidovými skupinami. [12]

Nejčastějším způsobem výroby epoxidových pryskyřic je za pomoci reakce Epichlorhydrinu s Bisfenolem A. Jako tvrdidla se využívají například polyaminy. Samotné vytvrzování může probíhat i za normálních teplot. Polyaminy jsou organické sloučeniny, které obsahují více než jednu aminoskupinu. [12,14]



Obr. 2.3: Chemická struktura epoxidové pryskyřice typu Bisfenol A (převzato z [23])

Mezi charakteristické rysy nevytvrzené pryskyřice patří epoxidová skupina tj. trojčlenný kruh, který se skládá ze dvou uhlíkových a jednoho kyslíkového atomu. Napjatost tohoto uskupení a působením aktivních vodíkových atomů, má celý systém snahu se otevřít. Díky tomu, vícefunkční epoxidy a tvrdidla, vytvářejí trojrozměrnou síť. Reakčním mechanismem pak bývá polyadice. Dochází k navázání vodíkových atomů tvrdidla ke kyslíkovým atomům epoxidové skupiny. Díky této reakci dochází k vytváření polárních OH-skupin, které způsobují dobré přílnavé vlastnosti výsledné epoxidové pryskyřice. Zajímavostí je, že po vytvrzení epoxidové pryskyřice, již samotný produkt neobsahuje žádné epoxidové skupiny. Pojem epoxidová pryskyřice je tedy jen pouhým názvem bez žádné spojitosti s epoxidovou skupinou.[12]

Mezi charakteristické vlastnosti epoxidových pryskyřic patří dobré mechanické a elektroizolační vlastnosti. Právě díky těmto vlastnostem bývají často využívaným materiálem v elektrotechnickém průmyslu. Dále mají dobrou tepelnou i chemickou odolnost a dobrou výhodou je přílnavost ke kovům, dřevu, keramice i sklu. Jsou to taktéž hydrofobní látky s dlouhou životností. Nehoří a jsou dobře opracovatelné.[12]

Vytvrzení epoxidových pryskyřic může probíhat polyadící sloučenin s aktivním vodíkovým atomem vázaných na epoxidové skupiny, jak bylo popsáno výše. Dále lze vytvrzování uskutečnit za pomoci polykondenzace přítomných hydroxylových skupin a nakonec i polymerací epoxidových skupin. Ovšem nejvíce využívanou vytvrzovací technikou je právě využití polyadice sloučenin s aktivním vodíkovým atomem. Mezi

nejčastěji využívaná tvrdidla patří polyaminy, anhydridy polykarboxylových kyselin, pryskyřice s reaktivními methylolovými skupinami (fenol- močovino- a melaminoformaldehydové pryskyřice) a polythioly. [14]

V průmyslových aplikacích se epoxidové pryskyřice využívají jako pěny, konstrukční prvky, lepidla, zalévací hmoty, epoxidové prášky, lamináty, povlaky a jako matrice do kompozitních materiálů. [12] [14]

2.2 Kompozitní plniva

V předchozích kapitolách bylo definováno, že kompozitní plnivo je jeden z prvků kompozitu, který je nespojitý a zajišťuje mechanické vlastnosti, jako pevnost či tuhost. V zásadě se dělí na základě geometrického tvaru plniva. V praxi se tedy setkáme s plnivem částicovými a vláknovými. [14]



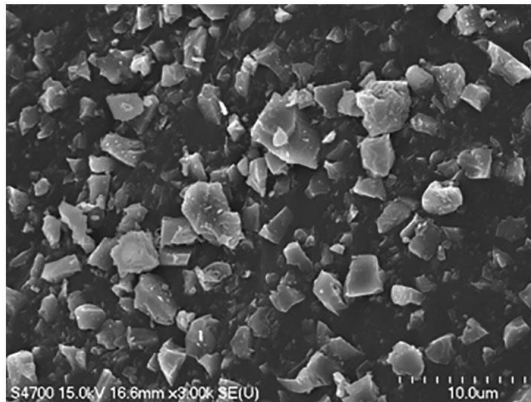
Obr. 2.4: Znárodnění uspořádnání nanoplniva v kompozitu (převzato z [15])

2.2.1 Částicová plniva

Mezi částicová plniva se řadí ty plniva, které mají každý svůj geometrický rozměr přibližně stejný. To neplatí u vrstveného plniva, které je stále klasifikováno jako částicové, ale může jeden z jeho rozměrů výrazněji převýšit jiný. V praxi tedy nalezneme plniva s částicemi kulovitého, vrstveného či tyčinkovitého tvaru. Různé druhy částicového plniva zlepšuje odlišné vlastnosti matrice. Je ovšem pozorováno patrné zlepšení většiny vlastností (mechanických, fyzikálních i chemických) v různé míře, v závislosti právě na použitém plnivem. Ovšem na rozdíl od vláknových výztuží nijak nevylepší lomovou odolnost výsledného kompozitu. [12] [15]

Většina těchto kompozitních materiálů má částicovou fázi pevnější a tvrdší než matici. Díky zpevnění pojivé fáze dojde k omezení pohybu částic a dochází k převedení části namáhání. Obě fáze jsou v této chvíli nositelem tuhosti a podíl matrice, jako nositele tuhosti, se zvyšuje na základě snižujícího se podílu plniva. To, jak se zlepší vlastnosti výsledného kompozitu, také závisí na kvalitě vazby a interakce mezi částicemi a maticí. Proces kombinování fází a kvalitní disperze je tedy kritický na výsledné vlastnosti. Je tedy důležité vybrat dobře interagující fáze a zamezit vzniku nežádoucích nehomogenit. Na vlastnosti působí také zvolený tvar částic, kdy u ne izometrických částic můžeme pozorovat vliv orientace na mechanické vlastnosti výsledného kompozitu. [12] [15]

Pokud bude přidáno anorganické plnivo, dochází k redukci polymeračního smrštění, zvýšení modulu pružnosti a sníží se koeficient teplotní roztažnosti. Částicová plniva se hojně využívají především k zlepšení tepelné a elektrické vodivosti, zlepšení tepelné odolnosti a vlastností při vyšších teplotách a ke zvýšení odolnosti vůči mechanickému poškození (otěr, opotřebení apod.). Nejlepší způsob kontroly nad výslednými vlastnostmi je řízení mezifázové adheze. [12] [15]

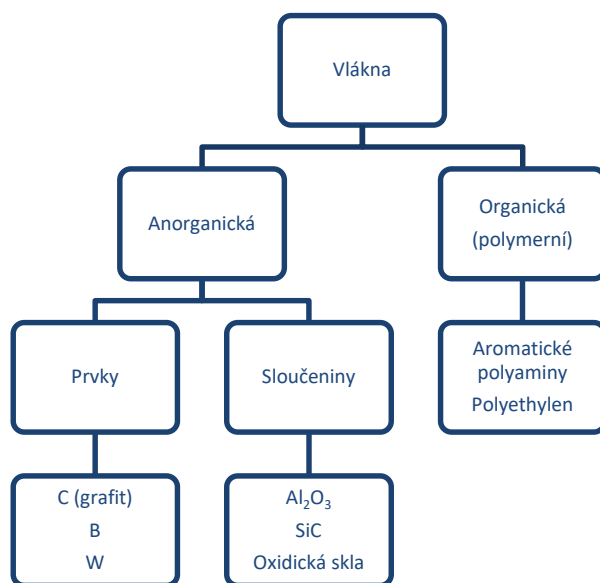


Obr. 2.5: Snímek částic nitridu hlinitého pomocí SEM (převzato z [17])

Mezi klasické zástupce částicových plniv patří uhličitan vápenatý, oxidy křemíku, skleněný prášek, skleněné kuličky o velikosti 5 až 500 μm , mleté minerály (slída, kaolin, břidlice, křída), dřevitá moučka, mletý talek a mikroskopické částice kovů. [18]

2.2.2 Vlákenná plniva

Využití vláknitých plniv se v kompozitních materiálech najde především, díky jejich charakteristickým mechanickým vlastnostem. Příkladem může být pevnost v tahu. Díky využití vláknitých plniv dochází, oproti konvenčním materiálům, ke zvýšení pevnosti v řádu i desítek procent. U polymeru navíc dochází k orientaci pevných vazeb ve směru osy vláken, čímž dochází k výraznému zvýšení pevnosti polymerních kompozitních materiálů. Základní rozdělení vláknitých plniv je dle povahy původu a to organická a anorganická. [12] [15]



Obr. 2.6: Hlavní rozdělení vláknitých plniv [15]

Vláknitá plniva se zřídka využívají jako samostatný materiál a nabývají na významu užití právě v aplikaci v kompozitních materiálech. Příkladem historické aplikace vláknitých kompozitů může být využití stavebních kompozitních bloků jílů a slámy. V dnešní době zastávají vláknité kompozity již i jiné aplikace než ve stavebnictví. [15]

Výhoda užití vláknitých plniv je v možnosti změny elastických vlastností a pevnosti, pouhou změnou prostorového uspořádání vláken plniva, jejího druhu a poměru obsahu plniva a matrice. Pokud bychom použili stejné komponenty s odlišným přístupem kombinování zmiňovaných prvků, vždy získáme kompozit s odlišnými vlastnostmi. Konvenční materiály tuto vlastnost nemají. [15]

Pokud se zaměříme na vlastnosti samotných vláken, nejčastěji diskutovaným tématem je jejich pevnost. Ta se zvětšuje v závislosti na zmenšujícím se průřezu vlákna. To díky tomu, že přirozené defekty struktury průměrově menších vláken jsou taktéž malé. To zapříčiní minimalizaci vad materiálu. Vady samozřejmě existují v podobě submikroskopických až mikroskopických trhlinek, u kterých můžeme pozorovat orientaci v podélném směru vlákna. Vlákná jako součást kompozitu plní funkci nositele zatížení, dodávají tuhost a pevnost výslednému kompozitu. Tato vlastnost závisí na délce použitých vláken. Většina užitých vláken pro kompozitní aplikace dosahuje průměru 5 až 20 μm . Menší průměry jsou technologicky náročné a k jejich výrobě se přistupuje posledních letech. Příkladem mohou být polyamidové vlákniny, vyšetřované v praktické části práce. Běžně užitými vlákny do kompozitů bývají skelná, uhlíková, polymerní, keramická, kovová a další přírodní vlákna. Typickým a hojně využívaným vláknitým kompozitním materiálem je laminát, který se skládá z pryskyřice a skelného plniva. [12][15]

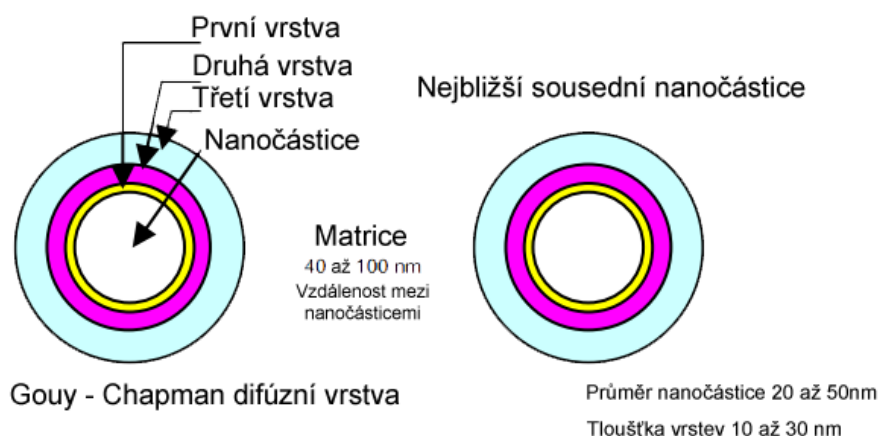
Určitě musíme dbát na to, jakou kombinaci matrice a plniva zvolíme. Některé kombinace se nezdají být vhodné pro následnou aplikaci. Především užití polymerních matric s kovovým plnivem či keramických a kovových matric společně s vlákny s malou tepelnou a chemickou odolností. Z tohoto důvodu rozlišujeme vlákna pro polymerní matrice, mezi které patří skelné, uhlíkové, polymerní či přírodní vlákna a vlákna pro vysokoteplotní aplikace, mezi které patří uhlíková, keramická a kovová vlákna. [15]

3 Nanokompozitní materiály

Již v předchozích kapitolách bylo řečeno, že aby byl kompozitní materiál považován za nanokompozitní, musí alespoň jeden geometrický rozměr plniva být v řádech nanometrů. Běžně se uvádí, že hranice mezi nanokompozitním a mikrokompozitním plnivem je 100 nm.

Pro popis chování fázového rozhraní nanoplniva anorganického kulovitého tvaru zasazeného do polymerní matrice byl, dle [19], zkonstruován tzv. multi-core model. Sestává se ze 4 hlavních vrstev:

1. Vázaná vrstva (první vrstva)
2. Hraniční vrstva (druhá vrstva)
3. Volná vrstva (třetí vrstva)
4. Elektrická dvojvrstva přesahující do třetí vrstvy (Gouy-Chapman)



Obr. 3.1: Multi-core popis mezifázové interakce (převzato [19])

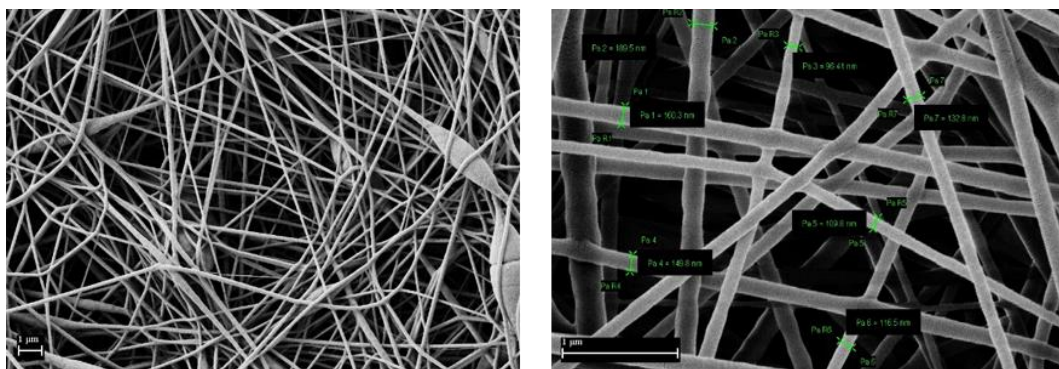
První vrstva je popsána jako přechodná vrstva pevně vázaná mezi anorganickou a organickou složkou většinou za pomoci silanu. Druhá vrstva je mezivrstvou oblastí skládající se z polymerních řetězců pevně vázaných, působících na první vrstvu a anorganickou částici. Třetí vrstva je oblast volných vazeb a vzájemných interakcí s druhou vrstvou. Dochází zde k tvorbě různých struktur řetězců, jejich různé pohyblivosti či volných objemů a krystaličnosti polymerní matrice. Dále se zde uplatňuje dvojná elektrická vrstva (Gouy-Chapman difúzní vrstva), která je znásobena dipólovým momentem. [19]

V posledních několika letech dochází k směřování výzkumných činností na interakce mezi polymerními látkami s nevodivými oxidy a jejich vliv na dielektrické vlastnosti, a to především na permitivitu, ztráty, střední dobu do průrazu či rezistivitu. Pro tyto účely se nejčastěji kombinují termosetické polymery jako matrice, společně s nevodivými oxidy (SiO_2 , TiO_2 , Al_2O_3 , MnO , ZnO). Výzkumy se zaměřují na vliv obsahu nanočástic na polarizační mechanismy a izolační vlastnosti výsledného kompozitu. Toto tvrzení lze potvrdit z vědeckých výzkumů dle [20] [22] či [23].

3.1 Nanokompozitní plniva

V předchozí kapitole byl definován nanokompozitní materiál a jeho některá nanoplňiva. Tyto nanoplňiva jsou dále rozdělena na základě geometrie, podobně jako u běžných kompozitních materiálů, na vláknitá a částicová nanoplňiva.

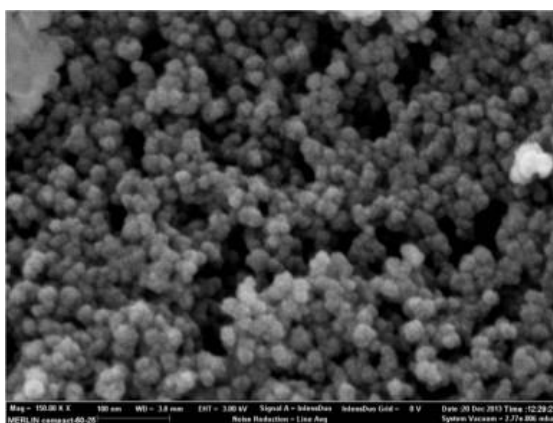
U vláknitých nanokompozitních plniv mluvíme převážně o uhlíkových nanovlákních, které obsahují fullereny ve tvaru trubic. Uhlíkové nanotrubičky jsou složeny pouze z uhlíkových atomů a jejím základem je plocha tvořená šestiúhelníky ve tvaru válce. Nanotrubičky se vyrábějí v poměru délky k průměru $132 \cdot 10^6 : 1$. Výsledný nanokompozitní materiál vykazuje výborné mechanické vlastnosti a to hlavně modul pružnosti dosahující hodnot 1 000 GPa a pevnost v tahu blízká se 200 GPa. Zajímavostí je, že tyto hodnoty mechanických vlastností překonávají samotnou ocel a zároveň svojí hmotností nanokompozitní materiál nepřevyšuje hmotnost hliníku. [20]



Obr. 3.2: SEM snímky polyurethanové nanovlákniny (převzato z [21])

3.1.1 Oxid křemičitý – SiO₂

Pevná látka, která je poměrně tvrdá, křehká a chemicky odolná (rozpuštná pouze v kyselině fluorovodíkové). V přírodě se běžně nejčastěji vyskytuje v podobě křemene a využívá se převážně ve stavebnictví a sklářství. Použití nanoplňiva v kompozitních materiálech je popsán dle studie [22]. V tomto experimentu byla použita matrice nízkohustotní polyethylen (LDPE) společně s 2 a 5 hmotnostními procenty SiO₂ jako nanoplňivo. Přibližný průměr nanočástice činil mezi 10 až 15 nm. Z tohoto experimentu vyplynulo, že absorpční proudy jsou závislé na tvaru částice použitého nanoplňiva. Velikost vnitřní rezistivity silně závisí na přiloženém testovacím napětí. Pro menší hodnoty vykazují vyšší hodnoty vnitřní rezistivity než čistý LDPE. Naopak pro použité napětí 500 V se naopak hodnota rezistivity snižuje. Tento jev je způsoben blokadou polarizace dielektrika, zapříčiněna nabitými nanočásticemi. Navíc dle [22] vykazují nanokompozit plněný SiO₂ při vyšších hodnotách frekvence, nižší hodnoty permitivity než neplněný polymer.



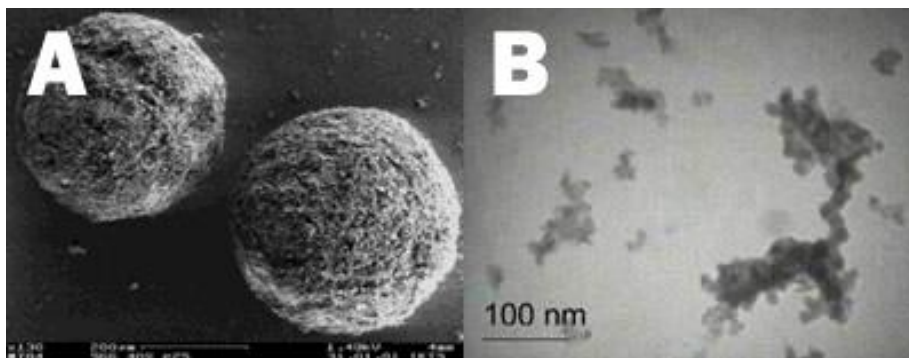
Obr. 3.3: SEM fotografie nanočástic SiO₂ (převzato z [24])

3.1.2 Oxid hlinitý – Al₂O₃

Krystalická látka, která vzniká například spalováním hliníku. V přírodě se vyskytuje, jako velmi tvrdý nerost korund. Je velmi tepelně odolný, netoxický a má vysokou teplotu tání, rovnající se 2 045 °C. Jako nanoplňivo byl použit ve stejném experimentu, dle [22], jako SiO₂. Na základě výsledků vykazoval při nízkých napětích nepatrné zlepšení vnitřní rezistivity, oproti vzorkům s křemičitanem. Aplikací vyššího napětí, vykazoval horší parametry rezistivity. Stejně, jako SiO₂, je závislý na tvaru nanočástic.

3.2 Disperze nanočástic v matrici

Často diskutovaným problémem při přípravě nanokompozitního materiálu, je zajištění rovnoměrné disperze nanoplňiva v matrici. Pokud dojde k přílišnému shlukování nanočástic, mohou tyto shluky způsobit zhoršení výsledných vlastností, oproti rovnoměrně dispergovanému nanoplňivu. Zamezení přílišného shlukování nanočástic, docílíme například pomocí dostatečného míchání či využití ultrazvuku k rozbití těchto shluků. [23]



Obr. 3.4: SiO₂ shluky před rozbitím A); po rozbití ultrazvukem B) (převzato z [25])

Geometrie plniva je klíčovým faktorem, který ovlivňuje disperzi nanočástic. Obecně jsou více plochá plniva těžko dispergovatelná než plniva s více trojrozměrnou geometrií. Rozdíl spočívá v tom, že více trojrozměrná plniva mají většinou sférickou geometrii a dochází mezi částicemi pouze k bodovému kontaktu. Naopak u plochých plniv, jako jsou například uhlíkové nanotrubičky či vrstvená nanoplňiva, může docházet ke kontaktu po celé délce plniva, které dále zapříčiňuje tvorbu shluků. [23]

To jakým způsobem rovnoměrně dispergovat nanoplňivo, lze zjistit například pomocí experimentálních vzorků a jejich následnému podrobení vizuální analýze elektronovým mikroskopem s dostatečně dobrou rozlišovací schopností.

3.3 Vliv nanoplniva na elektrické vlastnosti

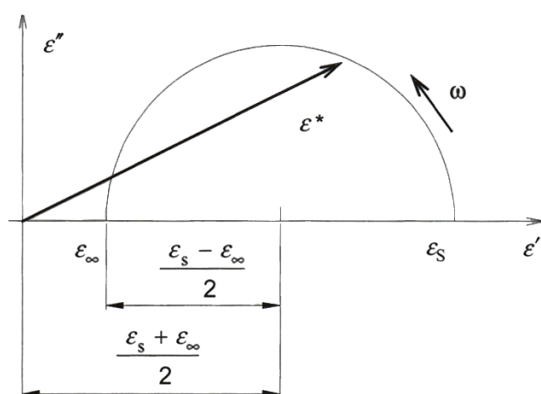
3.3.1 Z hlediska komplexní permitivity

Působením vnějšího elektrického pole dochází k polarizaci nanokompozitu. V elektrickém střídavém poli, dle [2], jsou elektrické vlastnosti závislé na úhlové frekvenci ω . Proto je potřeba brát zřetel na komplexní permitivitu, kterou popisuje následující rovnice:

$$\varepsilon^*(\omega) = \varepsilon'(\omega) - i\varepsilon''(\omega) \quad (2)$$

Kde ε' je relativní permitivita, ε'' je ztrátové číslo, ω je úhlový kmitočet. Ztrátový činitel $\text{tg } \delta$ je dán podílem permitivity a ztrátovým číslem:

$$\text{tg } \delta = \varepsilon''(\omega)/\varepsilon'(\omega) \quad (3)$$



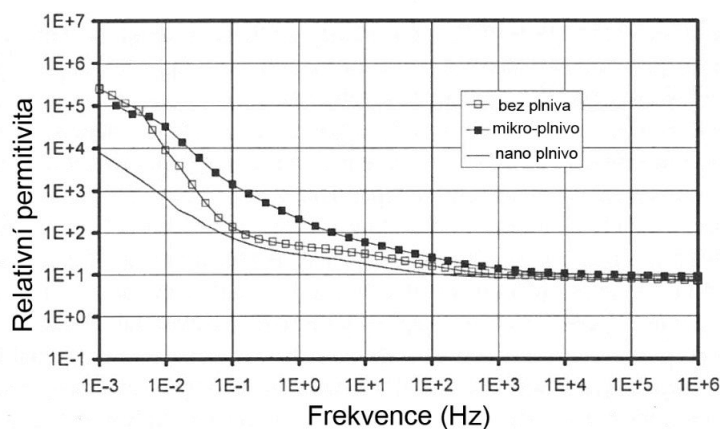
Obr. 3.5: Cole-Cole diagram znázorňující závislost složek komplexní permitivity na úhlové frekvenci (převzato z [2])

Obecně platí, že při přidávání anorganických mikroplniv do polymerů, dochází ke zvyšování permitivity i v desítkách procent. Tato vlastnost je vysvětlována na základě Lichtenecker-Rotherova zákona mísení popsané rovnicí (4), kde V_i značí objem plniva, ε_i je permitivita plniva, α elektronová polarizovatelnost. Hlavní důvodem pro zvýšení permitivity je využití plniva s vyšší relativní permitivitou než má samotný použitý polymer a zároveň tyto plniva způsobují mezifázovou polarizaci Maxwell-Wagnerova typu, která má za následek zvýšení ztrátového činitele $\text{tg } \delta$. [19]

Na zvyšování permitivity a ztrátového činitele má vliv i výskyt nežádoucích nehomogenit. Naopak při použití nanoplniv nižších jednotkách hmotnostních procent, lze pozorovat snížení permitivity. Permitivita má tendenci klesat, díky tomu, že struktury kvalitně dispergovaného nanoplniva zaujímají správné místo a zamezují pohyblivosti polymerního řetězce.

$$\varepsilon = \left[\sum V_i(\varepsilon_i)^\alpha \right]^{1/\alpha} \quad (4)$$

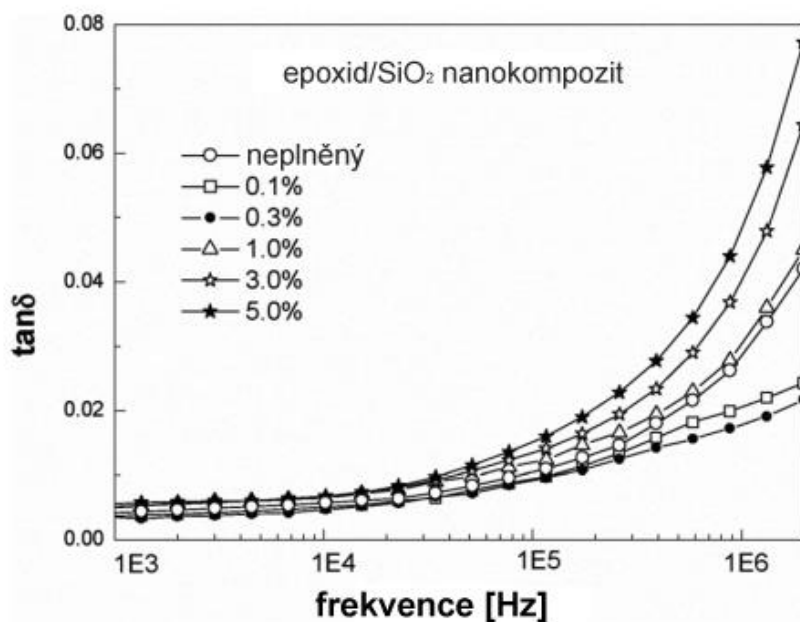
Většina výzkumných činností v oblasti modifikací epoxidových pryskyřic nanoplnivy z SiO₂ a Al₂O₃ byly provedeny v závislosti relativní permitivity na frekvenci. Relativní permitivita je závislá na polarizačních mechanismech pryskyřice, nanočástic a na mezifázové polarizaci, probíhající na hranicích obou složek. Je i obecně známo, že polarizační mechanismy jsou silně závislé na použité frekvenci přiloženého napětí. V tomto případě je tato závislost stejná i pro nanokompozitní materiál, kdy při zvyšující se frekvenci přiloženého signálu, dochází k snížení relativní permitivity. V typickém dielektrickém systému složeného z epoxidové pryskyřice je permitivita závislá na počtu orientovatelných dipólů v systému a jejich schopnosti se orientovat v závislosti na přiloženém vnějším elektrickém poli. V epoxidovém řetězci je více orientovatelných dipólových skupin, a proto dochází u kompozitních materiálů složených z epoxidu ke zvýšení permitivity při nižších frekvencích. Pokud dojde k aplikování vyšších frekvencí, větší dipólové skupiny mají problém se správně orientovat. Proto můžeme pozorovat snížení permitivity při vyšších frekvencích. [19][26][28]



Obr. 3.6: Graf znázorňující rozdíl permitivity dle druhu plnění (převzato z [28])

3.3.2 Z hlediska ztrátového činitele $\tan \delta$

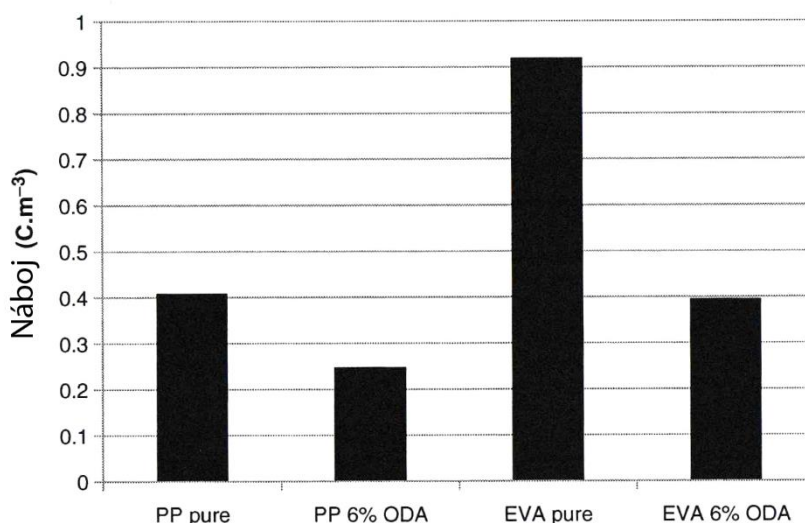
Problematika ztrátového činitele jde s komplexní permitivitou popsanou v kapitole 3.3.1 ve vzájemné korelaci. Stejně jako komplexní permitivita je i ztrátový činitel závislý na frekvenci přiloženého napětí. Oproti komplexní permitivitě, dochází u ztrátového činitele ke zvýšení hodnot při vyšších frekvencích. Při vyšších frekvencích tedy dochází k většímu uplatňování imaginární složky permitivity, mající za následek zvýšení dielektrických ztrát materiálu. Bylo vypočítáno, že ztrátový činitel se snižuje při plněních v řádech desetin až jednotek hmotnostních procent v celém rozsahu měřených frekvencí. Tato skutečnost byla zjištěna při výzkumu epoxidové pryskyřice společně s plněním SiO_2 a Al_2O_3 dle [29].



Obr. 3.7: Vliv frekvence na ztrátový činitel $\tan \delta$ nanokompozitu epoxid/ SiO_2 (převzato z [29])

3.3.3 Z hlediska prostorového náboje

Nanoplňiva mají tendenci prostorový náboj snižovat. Tuto skutečnost popisuje výzkum dle [25]. V tomto případě byl použit nanokompozit EVA s 6% plněním křemičitany, který vykazoval až poloviční hodnoty prostorového náboje, při vyšších hodnotách elektrického pole. Při nižších dochází k výraznému působení nehomogenit a iontových nečistot, které zapříčiňují zvýšení hodnot prostorového náboje.

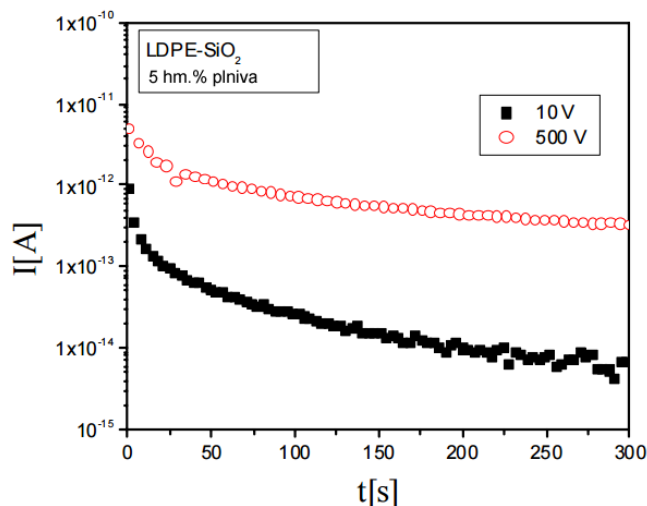


Obr. 3.8: Graf znázorňující rapidní snížení prostorového náboje po přidání nanoplňiva (převzato z [25])

3.3.4 Z hlediska rezistivity

U dielektrik je tento parametr jeden z nejdůležitějších z hlediska použití materiálu pro izolační účely. Primárně vyšetřovaná vnitřní rezistivita je v nanokompozitním materiálu ovlivňována převážně druhem a tvarem částic nanoplňiva. Dále je rozhodující jejich velikost a použité množství. Některé nanokompozitní materiály vykazují teplotní závislost rezistivity a to z důvodu úzce provázaných vazeb blízko ostrého přechodu mezi nanočásticemi a polymeru. Toto popisuje takzvaná perkolační teorie, která říká, že pravděpodobnost převedení náboje mezi dvěma vodivými částicemi plniva klesá exponenciálně s jejich rostoucí vzdáleností. Rezistivita je podle této teorie závislá na hmotnostním procentu plnění nanočásticemi a kvalitou jejich disperze. [22][28]

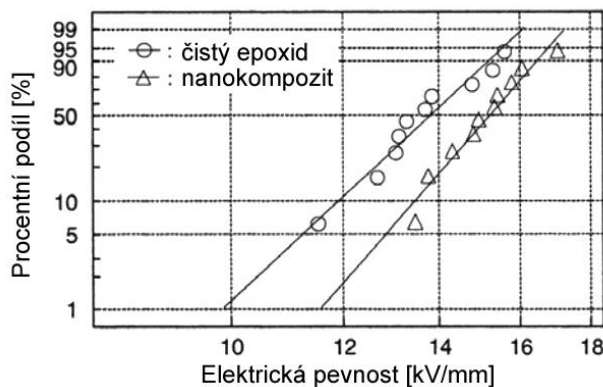
Z kapitoly 3.1.1. a dle [22], je hodnota vnitřní rezistivity a její změna po přidání nanoplňiv, taktéž závislá na přiloženém testovacím napětí. Po přiložení napětí 500 V nanokompozit vykazoval nižší hodnoty rezistivity než čistý polymer. Při nižších hodnotách napětí naopak došlo k jejímu zvýšení.



Obr. 3.9: Rozdíl hodnot absorpčních proudů nanokompozitu epoxid/ SiO_2 v čase při použití rozdílného napětí (převzato z [22])

3.3.5 Z hlediska elektrické pevnosti

Na základě výzkumů dle [19] mají mikroplniva z často zkoumaných materiálů (oxid titaničitý) spíše negativní vliv na elektrickou pevnost kompozitu. Naopak při použití těchto plniv v řádech nanometrů je pozorováno rapidní zvýšení elektrické pevnosti nanokompozitu. Pro nanokompozit s oxidem titaničitým, společně s epoxidovou maticí, dochází k tomuto zlepšení až při vyšších hodnotách plnění (10 hm. % a více).



Obr. 3.10: Rozdíl v elektrické pevnosti mezi čistým a nanokompozitním epoxidem (převzato z [19])

U nanokompozitu obsahující matrici XLPE či epoxid společně s vrstveným křemičitanem bylo zjištěno rapidní zvýšení doby do průrazu již při nižších hodnotách plnění. Tato vlastnost nanokompozitu je zapříčiněna právě díky obsahu nanočástic plniva, které zpomalují růst průrazného stromečku a tím rapidně zvyšují čas i potřebné napětí do průrazu. Z již provedených výzkumů je patrné, že na změnu elektrické pevnosti má největší vliv druh použitých nanočástic, hodnoty hmotnostního plnění a obsah nehomogenit ve výsledném nanokompozitu. [28][30]

4 Experimentální část

Experimentální část zahrnuje výrobu a měření elektrických vlastností nanokompozitních vzorků a sledování změn v závislosti na době trvání tepelného stárnutí.

4.1 Specifikace vzorků

Předmětem experimentu bylo porovnání elektrických vlastností v závislosti na době expozice tepelného stárnutí tří sad elektroizolačních materiálů. Všechny sady byly vyrobeny s matricí obsahující impregnační lak Epoxylite TSA220. Specifikace Epoxylite TSA220 lze nalézt v katalogovém listě v příloze G.

První sada obsahovala samostatný impregnační lak TSA 220. Druhou sadou byl nanokompozit složený z impregnačního laku TSA220 s přidavkem nanoplňiva oxidu křemičitého SiO_2 v plnění 1,25 hm. %. Třetí sada vzorků obsahovala nanokompozit složený z impregnačního laku TSA220 a kombinovaného nanoplňiva, skládající se z oxidu křemičitého SiO_2 v plnění 1,25 hm. % a polyamidové nanovlákniny.

Pro každý druh materiálů bylo vyrobeno 10 vzorků s celkovým počtem 30 vzorků. Z každé sady bylo 5 vzorků použito pro sledování změny elektroizolačních vlastností v závislosti na době trvání tepelného stárnutí. Sledován byl stav v 0, 60, 100, 200, 500 a 1000 hodinách expozice. Druhá polovina vzorků nebyla určena ke stárnutí, ovšem byla použita pro měření elektrické pevnosti v počátečním stavu a pro následné porovnání s měřením elektrické pevnosti vzorků v 1000 hodinách expozice.

Rozměry experimentálních vzorků byly 100 x 100 x 1 mm. Tloušťky byly změřeny s četností 5 pro každý vzorek, a to z důvodu eliminace odchylky v měřených veličinách, způsobené nerovností povrchu v různých částech vzorku. Zprůměrované tloušťky vzorků pro stárnutí lze vidět v Tab. 4.1

Tab. 4.1: Tloušťky vzorků v jednotlivých sadách určené pro stárnutí

Číslo vzorku	TSA220	TSA220 + 1,25%SiO ₂	TSA220 + 1,25%SiO ₂ + PA vláknina
	h (mm)	h (mm)	h (mm)
1	1,17	1,14	1,15
2	1,10	1,14	1,14
3	1,05	1,18	1,20
4	1,10	1,21	1,11
5	1,07	1,22	1,02

4.2 Postup výroby

Níže uvedený postup pro přípravu platí pro vzorky obsahující nanoplivo. Čisté vzorky byly připraveny stejným postupem, pouze nebyl potřebný proces míchání, a tak byl vynechán.

4.2.1 Příprava

Přípravná fáze zahrnuje navážení správného množství jednotlivých složek. Před samotným vážením je potřeba, pro snížení viskozity, nechat pryskyřici zahřát. To především z důvodu lepší manipulace při nalévání a vážení v nádobě. Zahřátí probíhalo v sušící peci při 80°C přibližně 5 minut. Jedna sada čítala 5 vzorků a každý vzorek obsahoval 15g pryskyřice. Naváženo bylo přibližně 90g pryskyřice. Přebytných 15g pryskyřice sloužilo pro kompenzování ztrát při manipulaci během dalších procesů výroby. Po navážení pryskyřice je potřeba také navážít přesné množství nanopliva oxidu křemičitého. Při manipulaci byly použity bezpečnostní pomůcky (rukavice, respirátor a brýle).

4.2.2 Míchání

Následující fází bylo přimíchání nanočástic do pryskyřice. To bylo provedeno mechanickým mícháním za pomoci laboratorní magnetické míchačky s ohřevem při nejméně viskózním stavu pryskyřice. Po počátečním zamíchání nanočástic byly upraveny otáčky na 500 ot./min. a ohřev na 90°C. Pro co nejrovnoměrnější disperzi nanočástic byl tento stav udržován 12 hodin.

4.2.3 Vakuování

Je potřeba pro eliminaci bublin a nerovností povrchu, které by mohli způsobit praskliny a odchylky v měřených veličinách, zbavit zamíchanou směs molekul vzduchu. K tomu slouží proces vakuování. Nanoplnivo při míchání na sebe vázalo velké množství vzduchových bublinek. Z tohoto důvodu byla směs pryskyřice a nanočástic, za pomoci vakuové pumpy KNF LABOPORT, vakuována při konstantní teplotě 90 °C a 50 ot./min.. Proces vakuování probíhal 7 a více hodin, v závislosti na výskytu bublin ve směsi.

4.2.4 Zalévání do forem a vytvrzování

Po dokončení procesu vakuování byly vzorky nalévány do forem. Formy se skládaly z čtvercových teflonových podkladů a rámečků. Vnitřní rozměry rámečku, které dávaly podobu finálních vzorků, byly 100 x 100 milimetrů. Tloušťka rámečku a konečného vzorku byla 1 milimetr. Jeden vzorek byl složen s přibližně 15g pryskyřice. Bylo důležité odstranit vyskytnuté nečistoty a vzniklé vzduchové bubliny, které by mohly výsledný vzorek znehodnotit pro následné měření. Pro vytvrzování byla použita laboratorní sušárna VentiCell. Vzorky byly nejdříve, do stupně gelace, vytvrzovány při 155°C bez horní části formy. Po dosažení tohoto správného stupně byly vzorky přikryty horním dílem formy. Následně byly vytvrzovány 12 hodin při výrobcem deklarovaných 165 °C. Po vytvrzení byly vzorky očištěny a popsány pro následné měření.



Obr. 4.1: Přikryté vzorky ve fázi gelace připravené pro konečné vytvrzení

4.3 Měřicí metody

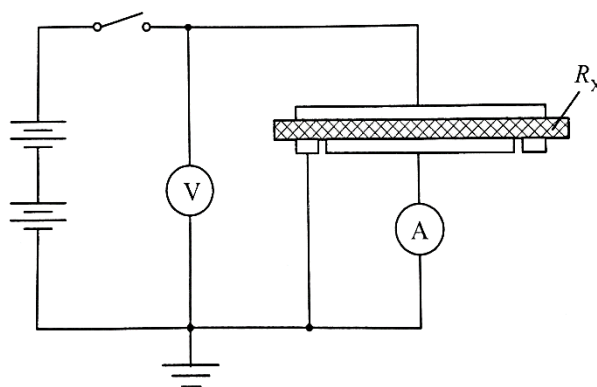
Diskutované nanokompozitní materiály byly podrobeny měřícím metodám zkoumající elektroizolační vlastnosti. Mezi zkoumané veličiny patřily absorpční proudy, z kterých byly vypočteny polarizační indexy v první (ρ_{i1}) a desáté (ρ_{i10}) minutě. Z ustálené hodnoty absorpčního proudu byla poté, pro měřený vzorek, vypočtena hodnota vnitřní rezistivity ρ_v . Následně byla zkoumána relativní permitivita ϵ_r společně se ztrátovým činitelem $\tan \delta$ v závislosti na změně teploty. Nakonec byly nanokompozity podrobeny zkoušce elektrické pevnosti zkoumající průrazné napětí U_p . Změna všech těchto veličin byla sledována v závislosti na změně doby expozice zrychlenému tepelnému stárnutí, trvající celkově 1000 hodin. Tuto dobu byly materiály vystaveny teplotě 220 °C stanovené výrobcem, jako hraniční mez životnosti impregnačního laku TSA220. Během všech diskutovaných měření byly respektovány normy jednotlivých zkoušek ČSN IEC 93, ČSN IEC 250 a ČSN EN 60243-1 ed. 2.

4.3.1 Absorpční a resorpční charakteristiky

Metoda absorpčních charakteristik se využívá pro zjištění izolačního odporu R_x , polarizačních indexů a následně vnitřní rezistivity zkoumaného materiálu.

$$\rho_{i1} = \frac{R_{60}}{R_{15}} = \frac{i_{15}}{i_{60}} = \frac{i_{a15} + i_{\infty}}{i_{a60} + i_{\infty}} [-] \quad (5)$$

Polarizačním indexem rozumíme podíl absorpčních proudů, odečtených v 10. a 60. sekundě či 1. a 10. minutě, popisující vzorec (5). Čím je tento podíl blíže k jedné, tím je z důvodu vlhkosti či polárních nečistot v izolačním materiálu více volných nosičů náboje. V praxi se hodnoty polarizačních indexů pohybují v rozmezí 3 – 5. Izolační odpor je podíl stejnosměrného napětí, přiloženého na zkoušený materiál a ustáleného absorpčního proudu. Vnitřní rezistivita je zjištěna z izolačního odporu a z použitého elektrodového systému. Metoda pro měření absorpčních charakteristik využívá metodu voltampérovou s tříelektrodovým měřícím systémem. [2]

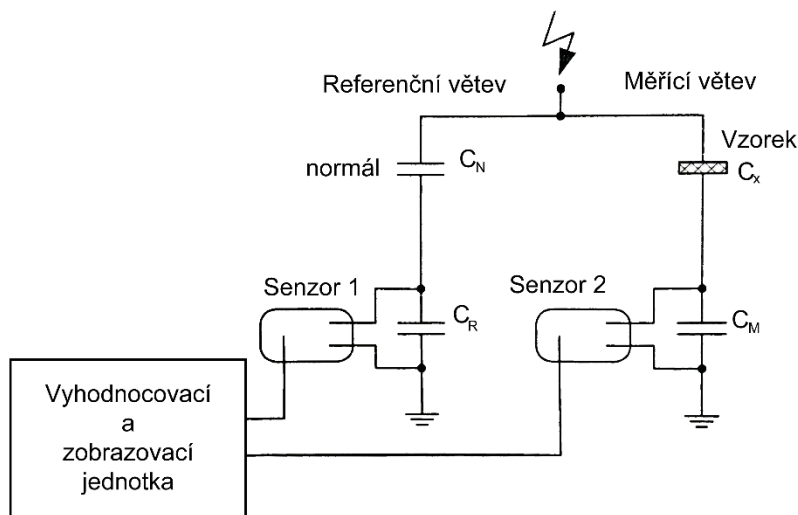


Obr. 4.2: Voltampérová metoda pro měření izolačního odporu (převzato z [2])

Pro měření diskutovaného nanokompozitu byl využit tříelektrodivý měřicí systém s napěťovým zdrojem High Voltage Supply 240A Keithley a Solid State Electrometer 610C řízený počítačem. Použité napětí pro měření bylo 500 V. Důležité také je před měřením uvést vzorek do dielektricky stabilního stavu, tj. neutralizovat povrchový a vnitřní náboj. Z tohoto důvodu byly všechny vzorky vždy alespoň na 12 hodin vloženy mezi uzemněné měděné elektrody.

4.3.2 Ztrátový činitel a permitivita

Problematika permitivity a ztrátového činitele je popsána v kapitole 3.3.1. Pro měření těchto dvou veličin se v dnešní době využívají převážně automatické můstky, které vychází z principu Scheringova můstku pro měření kapacit. Výhodnou automatického můstku oproti konvenčním, je automatické vyvažování a zobrazování veličin. Nemusí být plně vyvážen, jelikož se měří fázový úhel mezi dílčími napětími na obou nízkonapěťových impedancích. Obě nízkonapěťové kapacity C_M a C_R jsou nastaveny tak, aby byly dělicí poměry větví stejného řádu. Ztrátový činitel $\text{tg } \delta$ se určí z fázového úhlu mezi napětími na těchto kapacitách. Senzory následně tento posuv zaznamenají a přenesou v digitální formě do počítače, který jej následně zpracuje a zobrazí uživateli. [2]



Obr. 4.3: Schématické zobrazení automatického můstku pro měření dielektrických ztrát (převzato z [2])

Pro měření diskutovaného nanokompozitního materiálu byl použit automatický můstek s vyhřívaným elektrodovým systémem od Tettex Instruments. Vzorky byly měřeny v závislosti na teplotě v rozmezí 25 až 130 °C.

4.3.3 Napěťové zkoušky

Ve výzkumu byla zjišťována elektrická pevnost diskutovaného nanokompozitu. Pro tuto zkoušku byl využit elektrodový systém ponořený v olejové lázni. Olej byl použit pro eliminaci povrchového náboje, který by mohl zapříčinit přeskok vzduchem kolem vzorku. Tento jev běžně nastává díky vysokým hodnotám průrazného napětí pevných dielektrických materiálů.

4.4 Výsledky experimentu

4.4.1 Polarizační indexy

Z níže uvedené Tab. 4.2, shrnující průměrné hodnoty vzorků, je patrné, že v závislosti na plnění a délce trvání expozice, vykazuje nejlepší výsledky čistá pryskyřice. U nanokompozitu obsahující polyamidovou vláknu můžeme pozorovat nižší hodnoty polarizačních indexů. Stále ovšem spadá mezi kvalitně hodnocené izolační materiály, které mají hodnoty v rozmezí 3-5. Zhoršení vlastností vzorků s nanoplňivou při měření absorpčních proudů a přiloženém napětí 500 V, oproti čisté pryskyřici, potvrzuje již provedený výzkum dle [22]. Hodnoty pro jednotlivé vzorky lze nalézt v příloze C.

Tab. 4.2: Hodnoty polarizačních indexů v 1. a 10. minutě pro jednotlivé doby expozice

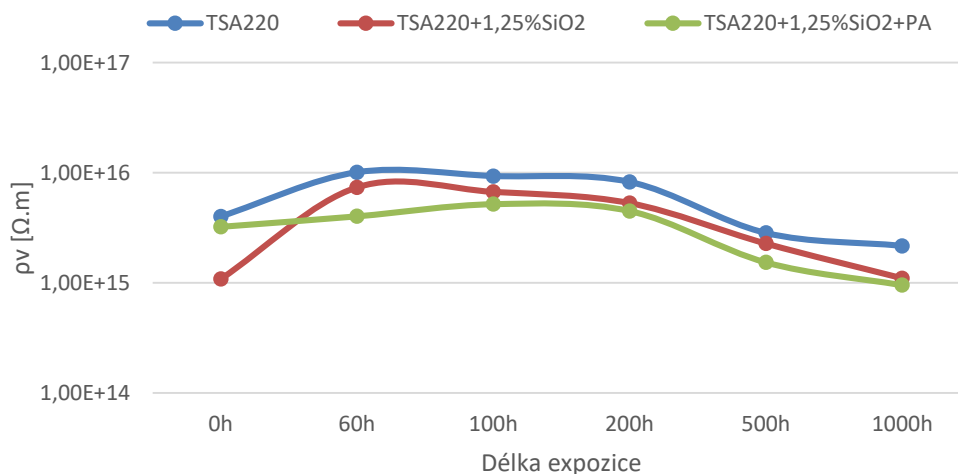
Délka expozice	TSA220		TSA220 +1,25%SiO ₂		TSA220 +1,25%SiO ₂ + PA	
	ρ_{i1}	ρ_{i10}	ρ_{i1}	ρ_{i10}	ρ_{i1}	ρ_{i10}
0 h	2,8	4,1	2,3	2,6	2,8	3,9
60 h	3,2	5,5	3,1	5,0	2,7	4,2
100 h	3,3	5,3	3,2	5,0	3,0	4,7
200 h	3,2	5,1	2,9	5,0	2,7	4,8
500 h	3,2	5,2	3,3	4,8	3,1	4,3
1000 h	3,1	5,7	3,1	4,4	2,8	4,2

4.4.2 Vnitřní rezistivita

Z měřených ustálených absorpčních proudů byly zjištěny hodnoty vnitřní rezistivity pro jednotlivé vzorky. Průměrné hodnoty dle Tab. 4.3 ukazují, že čisté vzorky vykazují vyšší hodnoty vnitřní rezistivity v celé době trvání expozice. U vzorků obsahující polamidovou nanovlákninu můžeme dle Obr. 4.4 pozorovat stabilnější hodnoty v první půlce trvání expozice. Hodnoty pro jednotlivé vzorky lze nalézt v příloze C. Tato skutečnost potvrzuje výsledky z výzkumu dle [22], kdy při použití vyššího napětí dochází ke snížení vnitřní rezistivity u kompozitu s nanoplnivou.

Tab. 4.3: Vypočtené hodnoty vnitřní rezistivity z naměřených absorpčních proudů

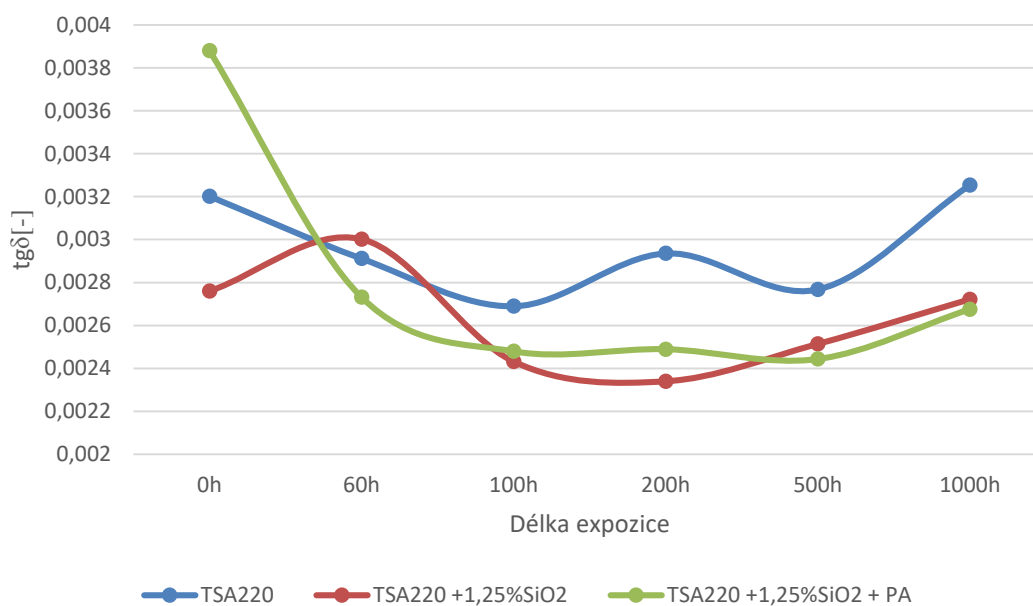
Délka expozice	TSA220	TSA220 +1,25%SiO ₂	TSA220 +1,25%SiO ₂ + PA
	$\rho_v (\Omega.m)$	$\rho_v (\Omega.m)$	$\rho_v (\Omega.m)$
0 h	4,00E+15	1,08E+15	3,22E+15
60 h	1,01E+16	7,37E+15	4,01E+15
100 h	9,32E+15	6,71E+15	5,17E+15
200 h	8,24E+15	5,30E+15	4,48E+15
500 h	2,83E+15	2,28E+15	1,53E+15
1000 h	2,16E+15	1,10E+15	9,52E+14



Obr. 4.4: Graf porovnávající hodnoty vnitřní rezistivity v závislosti na délce expozice

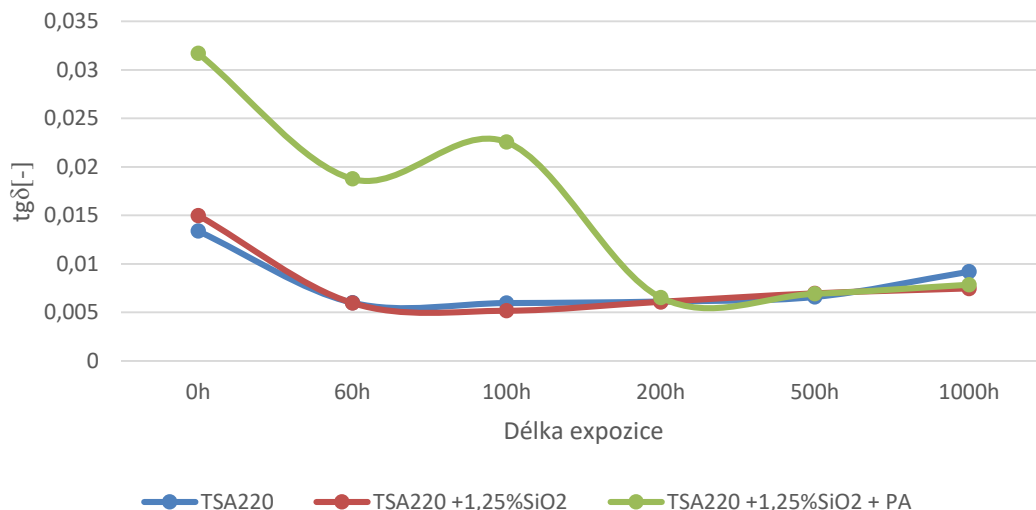
4.4.3 Závislost ztrátového činitele a permitivity na teplotě

Běžné minimální hodnoty $\text{tg } \delta$ u elektroizolačních materiálů bývají v řádu 0,01. Ideální je snaha tyto hodnoty přibližovat k řádu 0,001. Hodnoty pro jednotlivé vzorky lze nalézt v příloze B. Z obr. 4.5 je patrné, že při 30 °C jsou vzorky s nanoplnivými nejlépe hodnocené v celém rozsahu expozice. Ke konci expozice můžeme pozorovat rapidnější horšení vzorků s čistým lakem TSA220.



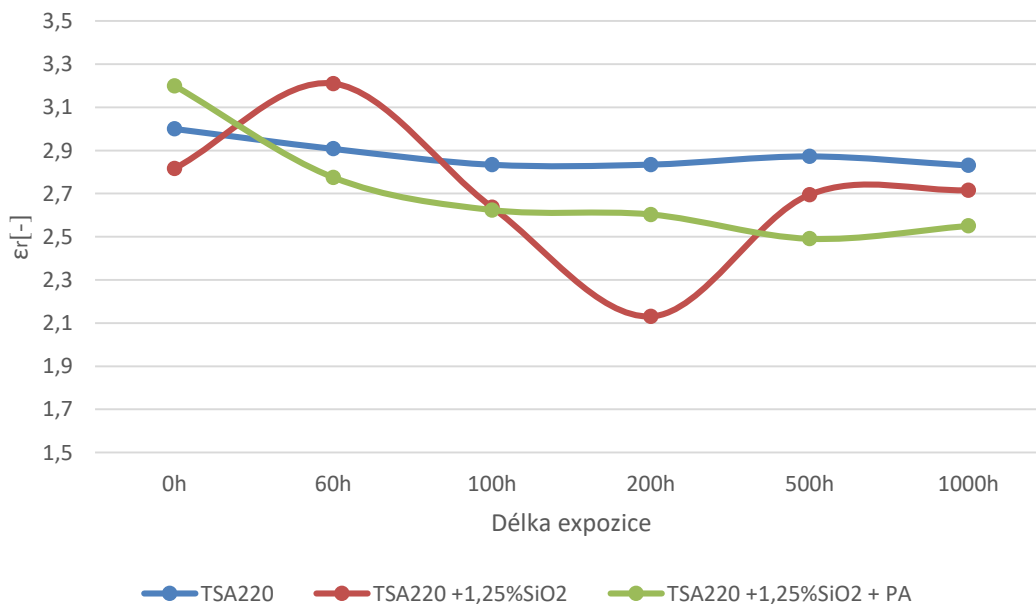
Obr. 4.5: Graf porovnávající hodnoty $\text{tg } \delta$ v závislosti na délce expozice (Hodnoty v 30 °C)

Z obr. 4.6 je patrné, že při vybrané teplotě 90 °C (teplota stroje při provozu) je již rozdíl méně patrný. V konečné fázi expozice je patrná pomalejší tendence horšení vlastností u kompozitů s nanoplnivými. Je zde tedy možné usuzovat, že nanoplniva mohou pomoci k prodloužení životnosti materiálů z hlediska elektrických vlastností. Tuto teorii je ovšem potřeba ověřit dalšími měřeními, které by zahrnovali i delší dobu expozice.



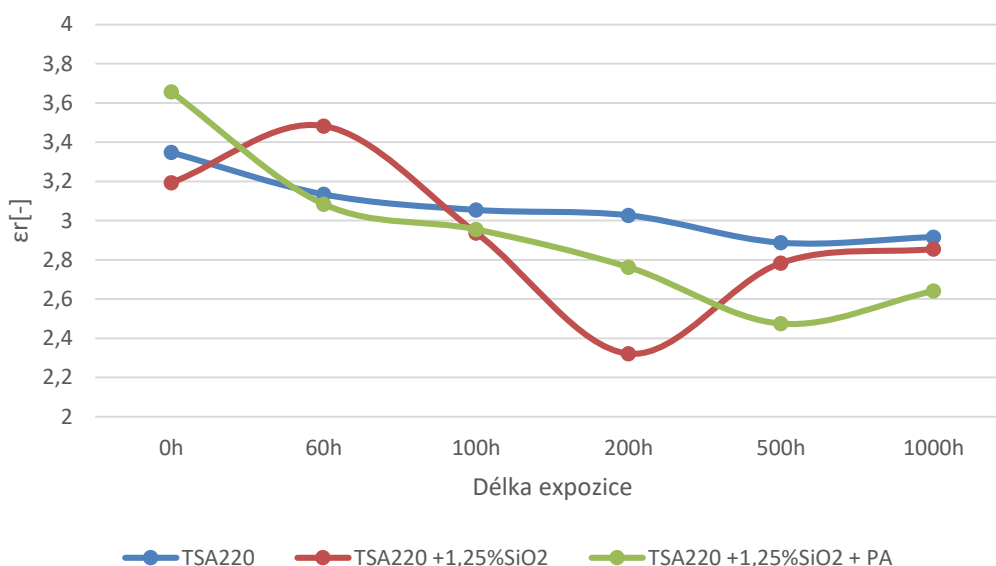
Obr. 4.6: Graf porovnávající hodnoty $\text{tg } \delta$ v závislosti na délce expozice (Hodnoty v 90°C)

Z obr. 4.7 je patrné, že při 30°C má kompozit s nanoplnivými nejmenší hodnoty relativní permitivity v celé době expozice. U nanokompozitu s SiO_2 je patrný kolísavý průběh. U nanokompozitu obsahující polyamidovou nanovlákninu lze pozorovat klesající tendenci relativní permitivity. Tím, že tento nanokompozit vykazuje nižší hodnoty relativní permitivity oproti čistým vzorkům, je potvrzen teoretický předpoklad, který byl definován před započítáním výzkumu.



Obr. 4.7: Graf porovnávající hodnoty ϵ_r v závislosti na délce expozice (Hodnoty v 30°C)

Z obr. 4.8, ukazujícího relativní permitivitu měřenou v 90 °C, je potvrzena již skutečnost z předchozího odstavce. Nanokompozit s polyamidovou nanovlákninou vyhází nejlépe. I zde můžeme vidět u kompozitu s nanoplňivem SiO₂ kolísavý průběh. Od poloviny expoziční doby můžeme také vidět již postupné zhoršování vlastností u všech zkoumaných materiálů.

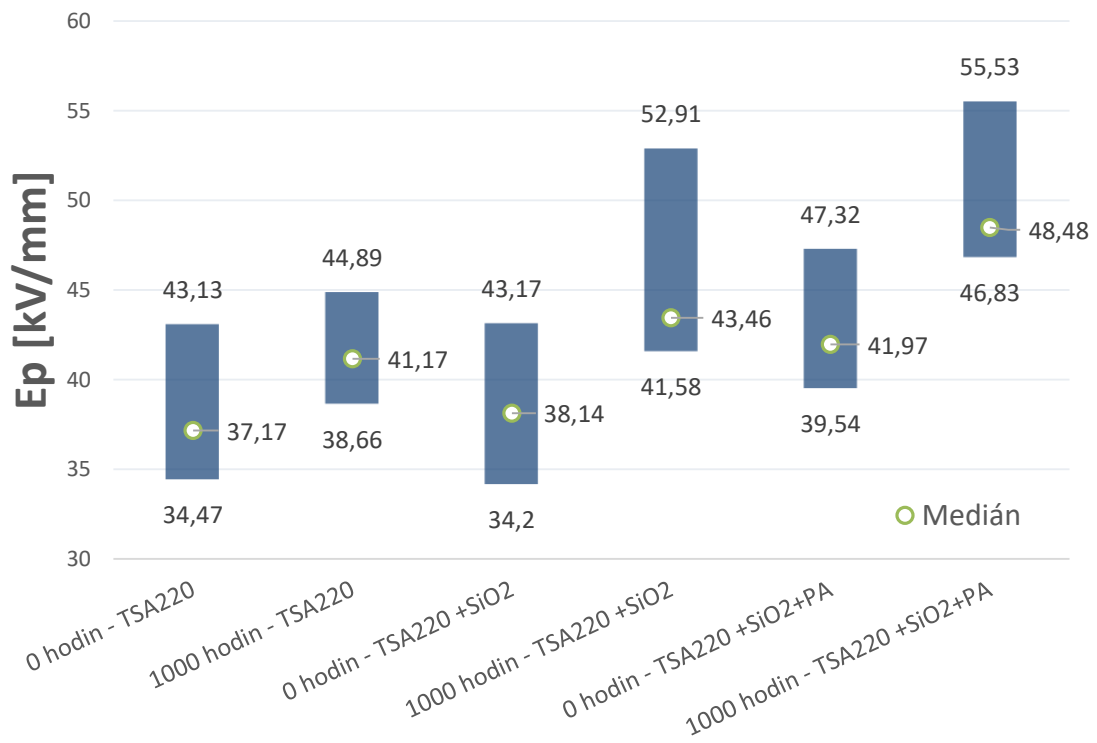


Obr. 4.8: Graf porovnávající hodnoty ϵ_r v závislosti na délce expozice (Hodnoty v 90°C)

Další grafy měřených veličin pro jednotlivé vzorky a pro rozsah měřených teplot lze vidět v příloze E a F.

4.4.4 Elektrická pevnost

Pro měření elektrické pevnosti byly použity vzorky kompozitů v počátečním stavu a vzorky v době expozice 1000 hodin. Zde bylo hlavním úkolem změřit a posoudit změnu elektrické pevnosti jednotlivých sad po 1000 hodinách expozice. Z obr. 4.9 ukazujícího maximální, minimální a hodnoty mediánů pro jednotlivé sady, podložené hodnotami z jednotlivých měření z přílohy D je patrné, že nanoplňivo mělo pozitivní vliv na velikost elektrické pevnosti materiálu. Přidáním polyamidové nanovlákniny došlo ke zlepšení z hlediska mediánu i o 5 kV/mm. Nanoplňivo má tedy za následek zvýšení elektrické pevnosti až o 11%. Hodnoty elektrické pevnosti nanokompozitu v 1000 hodinách expozice ukazují dokonce výraznější zlepšení, a to až o 15% oproti čistému laku TSA 220. Všechna měření proběhla dle normy ČSN EN 60243-1 ed. 2



Obr. 4.9: Graf znázorňující minimální a maximální hodnoty elektrické pevnosti pro měřené materiály v 0 a 1000 hodinách

5 Závěr

V předkládané diplomové práci bylo provedeno shrnutí problematiky izolačních materiálů používaných v točivých elektrických strojích. Následně byla uvedena problematika kompozitních materiálů a nanoplňiv. Pro budoucí vývoj v oblasti elektroizolačních materiálů představují nanokompozitní materiály významnou oblast zaměření. Tyto perspektivní materiály, které představují možnost snížení obsahu potřebného izolačního materiálu, například v diskutovaných točivých elektrických strojích, mohou mít za následek snižování cen těchto strojů či snižování rozměrů, při zachování výkonu stroje.

Polymerní nanokompozity jsou již v dnešní době hojně využívány v různých oblastech průmyslu. Mezi nejčastěji využívané oblasti patří především automobilový či potravinářský průmysl. Nanokompozitní materiály na bázi epoxid a vrstvený silikát nachází uplatnění i v kabelovém průmyslu, kde se osvědčuje jejich schopnost odolávat hoření. Zde jsou využívány nanočástice v podobě příměsí do konvenčních materiálů, díky kterým výsledný nanokompozit vykazuje zlepšené jak zmiňované tepelné, tak i elektrické a mechanické vlastnosti.

Hlavním účelem experimentu v předkládané diplomové práci bylo porovnání elektroizolačních vlastností nanokompozitu a čistého impregnačního laku TSA220 na bázi epoxidové pryskyřice v závislosti na aplikaci zrychleného tepelného stárnutí trvající 1000 hodin. Toto bylo provedeno za účelem zjištění chování nanokompozitu po další možnost zavádění těchto perspektivních materiálů do praxe. Samozřejmě pro komerční užití těchto nanokompozitů bude potřeba vyvinout přijatelný a cenově výhodný způsob výroby. Z výsledků experimentu lze vyvodit, že tyto materiály jsou schopny nahradit běžné konvenční elektroizolační materiály. Zejména zkoumaný nanokompozitní materiál s kombinovaným plnivem obsahující polyamidovou nanovlákninu vykazuje výrazně vyšší hodnoty elektrické pevnosti oproti vzorku z pouhé pryskyřice až o 15%. Tento fakt je výhodný pro použití tohoto materiálu jako izolačního systému pro elektrické točivé stroje. Jelikož by mohlo dojít k snížení potřebného množství elektroizolačního materiálu, čímž by došlo k snížení výrobních nákladů na daný stroj.

Jako další možnost výzkumu těchto nanokompozitů vidím především ve zkoumání dalších nanovláknin či jiných kombinovaných nanoplniv. Další směřování výzkumu doporučuji také v zavedení těchto nanokompozitů do elektrického točivého stroje a následného zkoumání vlastností mimo laboratorní podmínky. Pokud by výsledky dosahovali přijatelných mezí, lze pro tyto nanokompozity hledat cenově přijatelné možnosti přípravy a zavádění do průmyslové výroby. Prozatím jsou pro použití v průmyslu nevýhodné. Především z důvodu časové a tím cenové náročnosti přípravy nanokompozitní směsi. Tato skutečnost platí pro diskutovaný nanokompozitní materiál, který byl připravován v laboratorních podmínkách v malém množství.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] STONE, Greg C. *Electrical insulation for rotating machines: design, evaluation, aging, testing, and repair*. Hoboken, NJ: Wiley-Interscience, c2004. ISBN 0471445061.
- [2] MENTLÍK, Václav. *Dielektrické prvky a systémy*. Praha: BEN - technická literatura, 2006. ISBN 80-7300-189-6.
- [3] SILENT-CZECH spol. s r.o.: *Výroba drážkových izolací včetně lemu* [online]. [cit. 2016-12-14]. Dostupné z: <http://www.silent-czech.cz/vyroba/vyroba-drazkovych-izolaci-vcetne-lemu/>
- [4] LABARA s.r.o.: *Bandážová a drážková izolace* [online]. [cit. 2016-12-14]. Dostupné z: <http://www.labara.cz/cs/izolanty/flexibilni/bandazova-a-drazkova-izolace>
- [5] SEQUENZ, Heinrich. *Technologie vinutí elektrických strojů točivých*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1980.
- [6] COGEBI a.s.: *RESIN RICH IZOLAČNÍ SYSTÉM pro vysokonapěťová vícezávitová cívková vinutí točivých strojů třídy F (155 °C)* [online]. [cit. 2016-12-14]. Dostupné z: http://www.vukitrade.sk/content/download/Brochure%20coils%20RR_2009%20CZ.pdf
- [7] *Difference between VPI and resin rich system: Siemens* [online]. [cit. 2017-02-01]. Dostupné z: <https://zh.scribd.com/doc/234788464/VPI-vs-Resin-Rich-pdf>
- [8] *Comparison of Resin Rich and VPI system: Özgür Motor* [online]. [cit. 2017-02-01]. Dostupné z: <http://www.ozgurbobinaj.com.tr/dosyalar/tr/pdf/comparison-of-resin-rich-and-vpi-system.pdf>
- [9] *Delba Electrical (Pty) Ltd.* [online]. [cit. 2017-02-01]. Dostupné z: <http://www.delba.co.za/>
- [10] Marzio Piller, Gianni Schena, Alfredo Contin, Germano Rabach, Ground-wall insulation system analysis combining advanced imaging techniques and numerical simulation, Electric Power Systems Research, Volume 116, November 2014, Pages 444-450, ISSN 0378-7796
- [11] MÍŠEK, Bohumil. *Kompozity*. Brno: Technický dozorčí spolek - Sekce materiálů a svařování, 2003. ISBN 80-903386-0-7.
- [12] EHRENSTEIN, Gottfried W. *Polymerní kompozitní materiály*. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009. ISBN 978-80-86960-29-6.

- [13] ARORA, Ravindra. a Wolfgang. MOSCH. *High voltage and electrical insulation engineering*. Hoboken, NJ: J. Wiley, c2011. ISBN 9780470609613.
- [14] DUCHÁČEK, V. *Polymery, výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. VŠCHT Praha. Praha, 2006. ISBN 80-7080-617-6, 80-7080-241-3(1. Vyd.).
- [15] KRATOCHVÍL, Bohumil, Václav ŠVORČÍK a Dalibor VOJTĚCH. *Úvod do studia materiálů*. Vyd. 1. Praha: VŠCHT, 2005, 190 s. ISBN 80-708-0568-4.
- [16] Composite materials 1. *Slideshare* [online]. [cit. 2017-04-18]. Dostupné z: <https://www.slideshare.net/Bedar1988/composite-materials-1>
- [17] Cost-Effective Aluminum Nitride Powders for High Thermal Conductivity Resins. *Ceramic industry* [online]. [cit. 2017-04-18]. Dostupné z: <http://www.ceramicindustry.com/articles/95038-cost-effective-aluminum-nitride-powders-for-high-thermal-conductivity-resins>
- [18] *Složení polymerů - přísady* [online]. [cit. 2017-04-18]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/05.html>
- [19] TANAKA, T. Dielectric nanocomposites with insulating properties. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* [online]. 2005, **12**(5), 914-928 [cit. 2017-04-18]. DOI: 10.1109/TDEI.2005.1522186. ISSN 1070-9878. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/1522186/>
- [20] S. Anandhan a S. Bandyopadhyay. *Polymer Nanocomposites: From Synthesis to Applications, Nanocomposites and Polymers with Analytical Methods*, Dr. John Cuppoletti (Ed.), ISBN: 978-953-307-352-1, InTech, Dostupné z: <http://www.intechopen.com/books/nanocomposites-and-polymers-with-analyticalmethods/polymer-nanocomposites-from-synthesis-to-applications>
- [21] *Nanopharma* [online]. [cit. 2017-04-18]. Dostupné z: <http://www.nanopharma.cz>
- [22] PLESA, ILONA, FLORIN CIUPRINA, PETRU V. NOTINGHER a DENIS PANAITESCU. *INORGANIC NANOFILLER EFFECTS ON RESISTIVITY AND ABSORPTION CURRENTS IN LOW DENSITY POLYETHYLENE NANOCOMPOSITES* [online]. , 8 [cit. 2017-04-18]. Dostupné z: http://revue.elth.pub.ro/upload/91012304IPLESA_pp277_284.pdf
- [23] KOCHETOV, Roman. *Thermal and Electrical Properties of Nanocomposites, Including Material Processing*. 2012. Dizertační práce. Lappeenranta University of Technology, Finland.

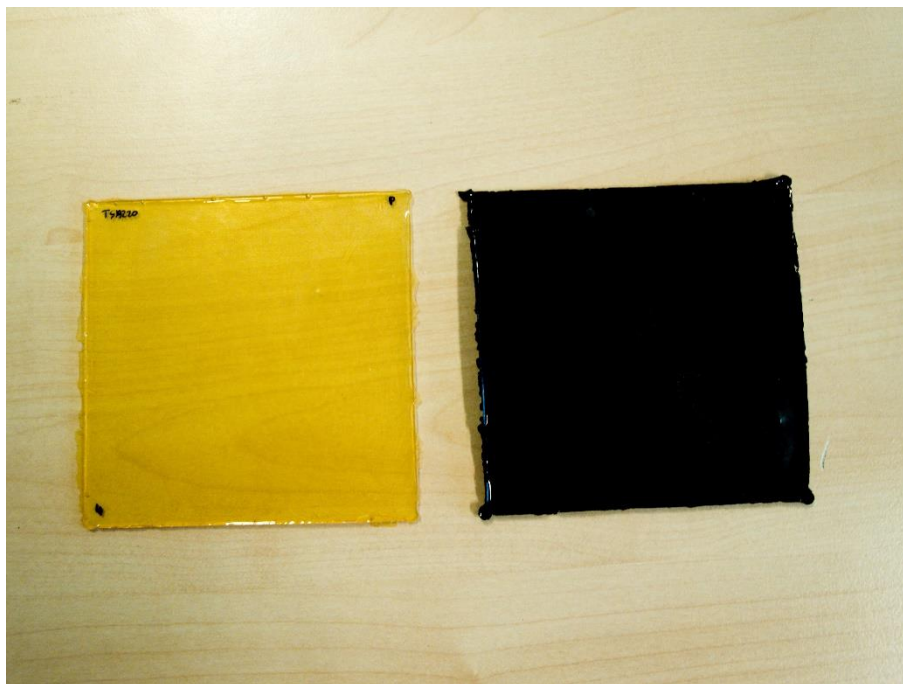
- [24] SEM photograph of SiO₂ nanoparticles. *ResearchGate* [online]. [cit. 2017-04-18]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/282534089_fig10_SEM-photograph-of-SiO2-nanoparticles
- [25] Ultrazvukové rozptylování oxidu křemičitého (SiO₂). *Hielscher – Ultrazvukové technologie* [online]. [cit. 2017-04-18]. Dostupné z: https://www.hielscher.com/cs/size_reduction_silica_01.htm
- [26] SINGHA, Santanu a M THOMAS. Polymer composite/nanocomposite processing and its effect on the electrical properties. *2006 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*. IEEE, 2006, , 557-560. DOI: 10.1109/CEIDP.2006.311993. ISBN 1-4244-0546-7. Dostupné také z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/4105494/>
- [27] WANG, Q. a G. CHEN. *Effect of nanofillers on the dielectric properties of epoxy nanocomposites*. Dostupné z: <http://technopress.kaist.ac.kr/samplejournal/pdf/amr0101008.pdf>
- [28] NELSON, J. *Dielectric polymer nanocomposites*. New York: Springer, 2010, x, 368 p. ISBN 978-144-1915-917.
- [29] HUICHENG SHI, NAIKUI GAO, HAIYUN JIN, GANG ZHANG a ZONGREN PENG. Investigation of the effects of nano-filler on dielectric properties of epoxy based composites. *2009 IEEE 9th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials*. IEEE, 2009, , 804-807. DOI: 10.1109/ICPADM.2009.5252175. ISBN 978-1-4244-4367-3. Dostupné také z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5252175/>
- [30] ERSOY, Aysel a H. R. HIZIROGLU. Electrical breakdown of polyurethane-based nanocomposites. *2010 10th IEEE International Conference on Solid Dielectrics* [online]. IEEE, 2010, , 1-3 [cit. 2017-04-18]. DOI: 10.1109/ICSD.2010.5568090. ISBN 978-1-4244-7945-0. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5568090/>

Přílohy

Seznam příloh

- A** Fotodokumentace
- B** Naměřené hodnoty dielektrických ztrát
- C** Hodnoty z měření absorpčních proudů
- D** Hodnoty z měření elektrické pevnosti
- E** Závislost ztrátového činitele na teplotě
- F** Závislost relativní permitivity na teplotě
- G** Katalogový list impregnačního laku Epoxylite TSA220

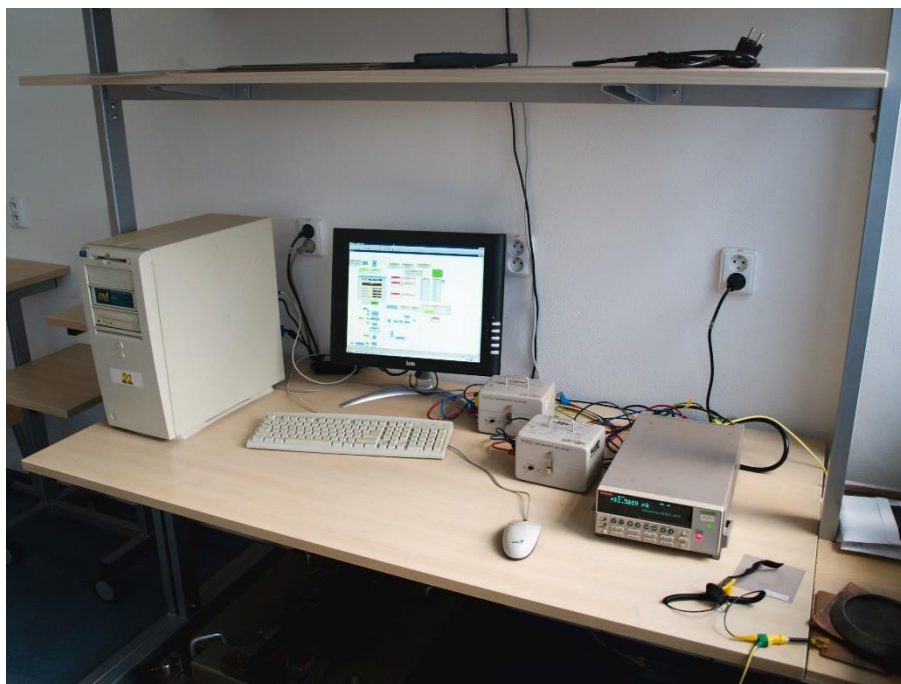
Příloha A: Fotodokumentace



Obr. 1: Porovnání vzorku v 0 a 1000 hodinách expozice



Obr. 2: Elektromagnetická míchačka využitá při procesu míchání a vakuování



Obr. 3: Pracoviště pro měření absorpčních proudů



Obr. 4: Vyhřívaný elektrodový systém Tettex Instruments



Obr. 5: Automatický měřicí systém LDV pro měření elektrické pevnosti



Obr. 6: Sušící pec využita pro stárnutí vzorků

Příloha B: Naměřené hodnoty dielektrických ztrát

Tab. 1: Dielektrické ztráty změřené pro jednotlivé vzorky TSA220

TSA220			25°C	30°C	40°C	50°C	60°C	70°C	80°C	90°C	100°C	110°C	120°C	130°C
0 h	VZ1	tgδ	0,00246	0,00244	0,00244	0,00259	0,00300	0,00368	0,00434	0,00498	0,00582	0,00754	0,01120	0,02030
		ε _r	2,836	2,844	2,883	2,926	2,984	3,052	3,118	3,180	3,250	3,358	3,485	3,735
	VZ2	tgδ	0,00285	0,00283	0,00283	0,00299	0,00350	0,00414	0,00493	0,00568	0,00678	0,00854	0,01320	0,02300
		ε _r	3,104	3,126	3,170	3,220	3,288	3,365	3,436	3,499	3,578	3,691	3,849	4,134
	VZ3	tgδ	0,00289	0,00287	0,00288	0,00305	0,00357	0,00425	0,00505	0,00583	0,00685	0,00866	0,01410	0,02380
		ε _r	3,036	3,063	3,098	3,149	3,216	3,291	3,365	3,434	3,511	3,620	3,798	4,078
	VZ4	tgδ	0,00341	0,00342	0,00351	0,00385	0,00439	0,00510	0,00586	0,00672	0,00813	0,01070	0,01650	0,03480
		ε _r	2,964	2,995	3,038	3,087	3,152	3,222	3,298	3,355	3,472	3,578	3,708	3,947
	VZ5	tgδ	0,00300	0,00300	0,00303	0,00323	0,00382	0,00473	0,00577	0,00684	0,00808	0,01110	0,01750	0,03390
		ε _r	2,966	2,974	3,008	3,050	3,100	3,159	3,221	3,272	3,343	3,442	3,577	3,817
60 h	VZ1	tgδ	0,00246	0,00244	0,00244	0,00259	0,00300	0,00368	0,00434	0,00498	0,00582	0,00754	0,01120	0,02030
		ε _r	2,640	2,652	2,686	2,717	2,759	2,812	2,859	2,886	2,916	2,946	2,994	3,063
	VZ2	tgδ	0,00285	0,00283	0,00283	0,00299	0,00350	0,00414	0,00493	0,00568	0,00678	0,00854	0,01320	0,02300
		ε _r	2,978	2,989	3,017	3,045	3,087	3,134	3,184	3,216	3,249	3,291	3,353	3,441
	VZ3	tgδ	0,00289	0,00287	0,00288	0,00305	0,00357	0,00425	0,00505	0,00583	0,00685	0,00866	0,01410	0,02380
		ε _r	2,874	2,887	2,918	2,949	2,993	3,044	3,093	3,111	3,125	3,137	3,163	3,216
	VZ4	tgδ	0,00341	0,00342	0,00351	0,00385	0,00439	0,00510	0,00586	0,00672	0,00813	0,01070	0,01650	0,03480
		ε _r	3,053	3,062	3,101	3,139	3,184	3,230	3,276	3,311	3,346	3,386	3,441	3,526
	VZ5	tgδ	0,00300	0,00300	0,00303	0,00323	0,00382	0,00473	0,00577	0,00684	0,00808	0,01110	0,01750	0,03390
		ε _r	2,944	2,949	2,969	2,992	3,028	3,071	3,117	3,146	3,174	3,208	3,261	3,341
100 h	VZ1	tgδ	0,00237	0,00235	0,00240	0,00259	0,00304	0,00375	0,00455	0,00516	0,00617	0,00777	0,01200	0,02540
		ε _r	2,668	2,678	2,709	2,738	2,770	2,818	2,854	2,874	2,889	2,907	2,939	3,012
	VZ2	tgδ	0,00270	0,00269	0,00273	0,00290	0,00339	0,00409	0,00511	0,00593	0,00699	0,00902	0,01300	0,02570
		ε _r	2,910	2,919	2,947	2,982	3,029	3,084	3,147	3,188	3,223	3,252	3,286	3,359
	VZ3	tgδ	0,00275	0,00275	0,00277	0,00295	0,00345	0,00421	0,00515	0,00586	0,00697	0,00896	0,01340	0,02610
		ε _r	2,842	2,852	2,878	2,905	2,945	2,992	3,034	3,051	3,067	3,098	3,133	3,185
	VZ4	tgδ	0,00276	0,00274	0,00281	0,00301	0,00359	0,00443	0,00541	0,00637	0,00735	0,00966	0,01570	0,02800
		ε _r	2,840	2,855	2,890	2,923	2,968	3,018	3,063	3,096	3,126	3,165	3,227	3,318
	VZ5	tgδ	0,00292	0,00292	0,00297	0,00319	0,00371	0,00461	0,00566	0,00657	0,00761	0,01010	0,01630	0,03110
		ε _r	2,863	2,867	2,892	2,918	2,954	2,996	3,042	3,064	3,088	3,118	3,166	3,244
200 h	VZ1	tgδ	0,00288	0,00289	0,00298	0,00329	0,00383	0,00451	0,00536	0,00591	0,00683	0,00840	0,01140	0,02090
		ε _r	2,581	2,592	2,624	2,655	2,697	2,738	2,774	2,797	2,824	2,854	2,894	2,959
	VZ2	tgδ	0,00288	0,00289	0,00298	0,00329	0,00383	0,00451	0,00536	0,00591	0,00683	0,00840	0,01140	0,02090
		ε _r	2,981	2,993	3,012	3,040	3,076	3,119	3,162	3,183	3,218	3,251	3,289	3,349
	VZ3	tgδ	0,00290	0,00290	0,00299	0,00320	0,00376	0,00443	0,00521	0,00588	0,00661	0,00789	0,01090	0,01790
		ε _r	2,845	2,845	2,871	2,886	2,917	2,955	2,997	3,008	3,013	3,010	3,006	3,033
	VZ4	tgδ	0,00295	0,00297	0,00315	0,00347	0,00412	0,00493	0,00574	0,00646	0,00747	0,00913	0,01320	0,02390
		ε _r	2,906	2,929	2,962	2,993	3,032	3,072	3,111	3,135	3,160	3,193	3,237	3,306
	VZ5	tgδ	0,00304	0,00303	0,00313	0,00346	0,00414	0,00494	0,00583	0,00652	0,00761	0,00949	0,01360	0,02520
		ε _r	2,811	2,816	2,841	2,867	2,907	2,948	2,989	3,012	3,035	3,060	3,092	3,158

500 h	VZ1	tgδ	0,00231	0,00232	0,00243	0,00270	0,00317	0,00394	0,00480	0,00594	0,00723	0,00942	0,01550	0,03090
		ε _r	2,607	2,618	2,648	2,661	2,679	2,704	2,728	2,748	2,771	2,785	2,790	2,831
	VZ2	tgδ	0,00277	0,00278	0,00288	0,00319	0,00377	0,00468	0,00572	0,00686	0,00818	0,01100	0,01710	0,03350
		ε _r	2,958	2,966	2,988	2,985	2,986	2,997	3,000	2,995	2,973	2,951	2,978	2,994
	VZ3	tgδ	0,00290	0,00291	0,00294	0,00330	0,00380	0,00466	0,00551	0,00660	0,00800	0,01050	0,01590	0,03070
		ε _r	2,923	2,932	2,951	2,945	2,943	2,955	2,957	2,955	2,957	2,942	2,936	2,971
	VZ4	tgδ	0,00283	0,00287	0,00305	0,00329	0,00381	0,00474	0,00593	0,00689	0,00828	0,01100	0,01630	0,03140
		ε _r	2,923	2,932	2,951	2,945	2,943	2,955	2,957	2,955	2,957	2,942	2,936	2,971
	VZ5	tgδ	0,00295	0,00296	0,00308	0,00336	0,00391	0,00471	0,00569	0,00672	0,00793	0,01040	0,01640	0,02710
		ε _r	2,910	2,917	2,925	2,900	2,858	2,833	2,804	2,783	2,771	2,757	2,739	2,764
1000 h	VZ1	tgδ	0,00290	0,00293	0,00311	0,00358	0,00438	0,00556	0,00677	0,00819	0,01010	0,01270	0,01800	0,03340
		ε _r	2,655	2,668	2,691	2,708	2,732	2,763	2,795	2,830	2,870	2,903	2,927	2,974
	VZ2	tgδ	0,00310	0,00312	0,00331	0,00382	0,00466	0,00587	0,00738	0,00875	0,01090	0,01370	0,02060	0,03540
		ε _r	2,852	2,861	2,886	2,898	2,918	2,946	2,978	3,011	3,038	3,061	3,074	3,078
	VZ3	tgδ	0,00327	0,00336	0,00356	0,00405	0,00516	0,00639	0,00820	0,00992	0,01210	0,01470	0,02410	0,03880
		ε _r	2,843	2,855	2,868	2,876	2,889	2,900	2,900	2,899	2,890	2,844	2,727	2,709
	VZ4	tgδ	0,00334	0,00334	0,00359	0,00417	0,00492	0,00637	0,00825	0,01010	0,01230	0,01550	0,02360	0,03680
		ε _r	2,884	2,891	2,919	2,928	2,942	2,972	3,005	3,039	3,067	3,096	3,122	3,152
	VZ5	tgδ	0,00351	0,00352	0,00373	0,00429	0,00508	0,00639	0,00767	0,00903	0,01090	0,01390	0,01890	0,03430
		ε _r	2,875	2,879	2,891	2,881	2,855	2,835	2,810	2,802	2,802	2,796	2,773	2,765

Tab. 2: Dielektrické ztráty změřené pro jednotlivé vzorky TSA220+SiO₂

TSA220+SiO ₂		25°C	30°C	40°C	50°C	60°C	70°C	80°C	90°C	100°C	110°C	120°C	130°C	
0 h	VZ1	tgδ	0,00266	0,00267	0,00280	0,00310	0,00394	0,00560	0,00840	0,01340	0,02430	0,04760	0,10500	0,21200
		ε _r	2,839	2,849	2,896	2,939	3,001	3,077	3,158	3,231	3,321	3,453	3,63	3,998
	VZ2	tgδ	0,00273	0,00274	0,00288	0,00322	0,00423	0,00596	0,00901	0,01500	0,02760	0,05190	0,10600	0,23300
		ε _r	2,809	2,819	2,865	2,908	2,969	3,043	3,117	3,192	3,281	3,395	3,593	3,929
	VZ3	tgδ	0,00279	0,00280	0,00293	0,00330	0,00424	0,00613	0,00931	0,01490	0,02560	0,05380	0,11700	0,25700
		ε _r	2,754	2,764	2,807	2,852	2,914	2,989	3,07	3,137	3,229	3,358	3,535	3,943
	VZ4	tgδ	0,00275	0,00275	0,00291	0,00328	0,00419	0,00613	0,00895	0,01420	0,02660	0,05080	0,10000	0,22700
		ε _r	2,879	2,898	2,946	2,994	3,056	3,133	3,206	3,275	3,358	3,477	3,653	4,016
	VZ5	tgδ	0,00282	0,00284	0,00300	0,00342	0,00450	0,00636	0,00976	0,01740	0,03080	0,06190	0,12800	0,27600
		ε _r	2,741	2,752	2,788	2,826	2,888	2,96	3,039	3,129	3,215	3,371	3,635	4,107
60 h	VZ1	tgδ	0,00316	0,00312	0,00317	0,00344	0,00415	0,00471	0,00535	0,00611	0,00725	0,00921	0,01390	0,03990
		ε _r	3,384	3,401	3,441	3,484	3,544	3,599	3,653	3,697	3,749	3,814	3,892	4,12
	VZ2	tgδ	0,00298	0,00296	0,00301	0,00327	0,00387	0,00447	0,00508	0,00576	0,00682	0,00886	0,01400	0,02450
		ε _r	3,227	3,241	3,285	3,329	3,385	3,437	3,484	3,522	3,565	3,62	3,688	3,773
	VZ3	tgδ	0,00319	0,00316	0,00322	0,00351	0,00414	0,00481	0,00550	0,00632	0,00741	0,00968	0,01510	0,02980
		ε _r	3,287	3,305	3,351	3,393	3,446	3,495	3,541	3,579	3,624	3,673	3,736	3,839
	VZ4	tgδ	0,00253	0,00252	0,00255	0,00277	0,00327	0,00382	0,00441	0,00511	0,00605	0,00791	0,01130	0,01990
		ε _r	2,731	2,743	2,782	2,822	2,876	2,933	2,984	3,031	3,078	3,136	3,2	3,294
	VZ5	tgδ	0,00327	0,00325	0,00331	0,00360	0,00421	0,00494	0,00572	0,00648	0,00797	0,01010	0,01680	0,03190
		ε _r	3,351	3,36	3,391	3,423	3,468	3,511	3,55	3,582	3,621	3,662	3,727	3,819

100 h	VZ1	tgδ	0,00261	0,00259	0,00267	0,00295	0,00349	0,00421	0,00498	0,00559	0,00672	0,00852	0,01340	0,02610
		ε _r	2,917	2,933	2,979	3,031	3,09	3,161	3,249	3,313	3,389	3,459	3,556	3,686
	VZ2	tgδ	0,00247	0,00248	0,00252	0,00273	0,00320	0,00380	0,00447	0,00513	0,00587	0,00762	0,01100	0,02160
		ε _r	2,658	2,663	2,699	2,738	2,784	2,831	2,875	2,903	2,924	2,956	2,983	3,057
	VZ3	tgδ	0,00243	0,00244	0,00247	0,00266	0,00312	0,00378	0,00443	0,00513	0,00587	0,00793	0,01200	0,02140
		ε _r	2,599	2,607	2,634	2,665	2,71	2,769	2,832	2,883	2,933	3,001	3,07	3,185
	VZ4	tgδ	0,00197	0,00198	0,00202	0,00214	0,00250	0,00293	0,00350	0,00402	0,00466	0,00571	0,00806	0,01500
		ε _r	2,183	2,187	2,212	2,243	2,283	2,327	2,376	2,423	2,472	2,514	2,559	2,63
	VZ5	tgδ	0,00266	0,00267	0,00274	0,00299	0,00353	0,00425	0,00514	0,00592	0,00701	0,00888	0,01270	0,02500
		ε _r	2,783	2,796	2,84	2,889	2,955	3,034	3,104	3,165	3,224	3,278	3,326	3,415
200 h	VZ1	tgδ	0,00259	0,00260	0,00271	0,00299	0,00359	0,00438	0,00548	0,00682	0,00822	0,01080	0,01850	0,04010
		ε _r	2,805	2,823	2,861	2,898	2,949	3,014	3,61	3,112	3,159	3,21	3,253	3,311
	VZ2	tgδ	0,00240	0,00239	0,00250	0,00274	0,00327	0,00412	0,00509	0,00610	0,00724	0,00970	0,01780	0,03450
		ε _r	2,779	2,797	2,836	2,873	2,917	2,965	3,001	3,004	3,008	3,011	3,024	3,067
	VZ3	tgδ	0,00239	0,00240	0,00254	0,00288	0,00343	0,00428	0,00526	0,00611	0,00747	0,00983	0,01590	0,03690
		ε _r	2,709	2,721	2,752	2,787	2,825	2,877	2,921	2,935	2,959	2,983	3,003	3,084
	VZ4	tgδ	0,00195	0,00196	0,00208	0,00233	0,00281	0,00350	0,00438	0,00514	0,00663	0,00937	0,01520	0,03650
		ε _r	2,266	2,276	2,31	2,341	2,389	2,43	2,486	2,531	2,591	2,651	2,724	2,824
	VZ5	tgδ	0,00261	0,00261	0,00273	0,00300	0,00367	0,00458	0,00576	0,00697	0,00857	0,01190	0,02100	0,04620
		ε _r	2,856	2,862	2,895	2,929	2,974	3,027	3,088	3,138	3,194	3,254	3,33	3,445
500 h	VZ1	tgδ	0,00264	0,00265	0,00275	0,00301	0,00359	0,00462	0,00589	0,00718	0,00904	0,01220	0,01920	0,04150
		ε _r	2,842	2,856	2,872	2,884	2,905	2,923	2,946	2,969	2,958	2,941	2,932	2,924
	VZ2	tgδ	0,00261	0,00263	0,00278	0,00315	0,00376	0,00472	0,00602	0,00735	0,00920	0,01300	0,01990	0,04250
		ε _r	2,826	2,834	2,861	2,872	2,885	2,914	2,948	2,968	2,973	2,945	2,926	2,916
	VZ3	tgδ	0,00248	0,00250	0,00262	0,00293	0,00360	0,00439	0,00562	0,00672	0,00811	0,01140	0,01750	0,03850
		ε _r	2,644	2,654	2,664	2,655	2,653	2,656	2,649	2,623	2,583	2,538	2,504	2,5
	VZ4	tgδ	0,00204	0,00207	0,00220	0,00250	0,00302	0,00378	0,00489	0,00613	0,00837	0,01190	0,02080	0,04130
		ε _r	2,276	2,297	2,326	2,35	2,378	2,414	2,461	2,506	2,558	2,614	2,677	2,747
	VZ5	tgδ	0,00270	0,00272	0,00287	0,00323	0,00388	0,00473	0,00607	0,00737	0,00895	0,01240	0,02150	0,03810
		ε _r	2,823	2,833	2,853	2,849	2,841	2,855	2,866	2,853	2,825	2,782	2,795	2,815
1000 h	VZ1	tgδ	0,00282	0,00289	0,00298	0,00333	0,00389	0,00451	0,00510	0,00625	0,00814	0,01200	0,01990	0,03310
		ε _r	2,869	2,872	2,879	2,885	2,899	2,909	2,921	2,933	2,951	2,948	2,944	2,955
	VZ2	tgδ	0,00271	0,00275	0,00294	0,00332	0,00399	0,00489	0,00594	0,00751	0,00915	0,01310	0,01920	0,03210
		ε _r	2,836	2,841	2,848	2,859	2,869	2,881	2,896	2,919	2,936	2,958	2,959	2,946
	VZ3	tgδ	0,00279	0,00282	0,00301	0,00342	0,00432	0,00536	0,00688	0,00859	0,01040	0,01420	0,02160	0,03430
		ε _r	2,684	2,695	2,727	2,749	2,776	2,8	2,83	2,862	2,888	2,913	2,937	2,941
	VZ4	tgδ	0,00229	0,00230	0,00242	0,00276	0,00339	0,00414	0,00540	0,00663	0,00834	0,01090	0,01540	0,03080
		ε _r	2,275	2,279	2,304	2,325	2,355	2,387	2,435	2,485	2,539	2,591	2,644	2,718
	VZ5	tgδ	0,00285	0,00285	0,00302	0,00338	0,00418	0,00513	0,00665	0,00832	0,01040	0,01330	0,02070	0,03490
		ε _r	2,882	2,892	2,918	2,93	2,953	2,988	3,033	3,074	3,117	3,146	3,136	3,15

Tab. 3: Dielektrické ztráty změřené pro jednotlivé vzorky TSA220+SiO₂+PA

TSA220+SiO ₂ +PA		25°C	30°C	40°C	50°C	60°C	70°C	80°C	90°C	100°C	110°C	120°C	130°C	
0 h	VZ1	tgδ	0,00381	0,00418	0,00472	0,00535	0,00785	0,01280	0,02200	0,03370	0,05170	0,09160	0,15700	0,29000
		ε _r	3,339	3,377	3,419	3,467	3,536	3,615	3,714	3,813	3,930	4,100	4,337	4,687
	VZ2	tgδ	0,00380	0,00398	0,00451	0,00521	0,00755	0,01240	0,02080	0,03220	0,04970	0,08880	0,14900	0,30600
		ε _r	3,291	3,316	3,37	3,427	3,494	3,578	3,672	3,767	3,893	4,066	4,323	4,747
	VZ3	tgδ	0,00395	0,00408	0,00467	0,00528	0,00740	0,01260	0,02130	0,03890	0,05360	0,08900	0,15700	0,26800
		ε _r	3,454	3,472	3,525	3,577	3,645	3,723	3,811	3,939	4,023	4,188	4,411	4,731
	VZ4	tgδ	0,00331	0,00337	0,00379	0,00432	0,00601	0,01010	0,01580	0,02330	0,03620	0,05650	0,10800	0,22300
		ε _r	2,823	2,836	2,883	2,927	2,986	3,061	3,153	3,243	3,348	3,477	3,672	4,043
	VZ5	tgδ	0,00371	0,00379	0,00439	0,00499	0,00717	0,01160	0,02040	0,03040	0,04710	0,07630	0,13700	0,27700
		ε _r	2,981	2,996	3,058	3,118	3,202	3,297	3,407	3,52	3,66	3,83	4,064	4,464
60 h	VZ1	tgδ	0,00325	0,00321	0,00351	0,00472	0,00581	0,00837	0,01370	0,01980	0,02680	0,03900	0,05310	0,07260
		ε _r	3,167	3,189	3,226	3,27	3,326	3,384	3,447	3,514	3,59	3,688	3,831	4,035
	VZ2	tgδ	0,00274	0,00274	0,00300	0,00380	0,00507	0,00714	0,01200	0,01980	0,02820	0,04330	0,05790	0,06540
		ε _r	2,847	2,864	2,907	2,949	3,005	3,068	3,141	3,289	3,331	3,465	3,644	3,765
	VZ3	tgδ	0,00289	0,00290	0,00317	0,00403	0,00537	0,00801	0,01380	0,02010	0,02940	0,04270	0,05480	0,06460
		ε _r	2,929	2,952	2,986	3,026	3,084	3,142	3,208	3,277	3,36	3,468	3,587	3,682
	VZ4	tgδ	0,00223	0,00224	0,00255	0,00329	0,00416	0,00634	0,01030	0,01430	0,02000	0,02990	0,04230	0,07430
		ε _r	2,402	2,41	2,435	2,464	2,507	2,559	2,617	2,675	2,717	2,764	2,828	2,929
	VZ5	tgδ	0,00254	0,00257	0,00301	0,00389	0,00530	0,00888	0,01430	0,01980	0,02660	0,03530	0,05170	0,09300
		ε _r	2,449	2,46	2,484	2,508	2,543	2,584	2,629	2,666	2,716	2,764	2,813	2,917
100 h	VZ1	tgδ	0,00250	0,00250	0,00267	0,00337	0,00493	0,00848	0,01490	0,02290	0,03410	0,04450	0,05180	0,06650
		ε _r	2,544	2,55	2,583	2,619	2,67	2,743	2,826	2,921	3,036	3,183	3,356	3,569
	VZ2	tgδ	0,00253	0,00252	0,00270	0,00336	0,00495	0,00913	0,01680	0,02620	0,03750	0,05160	0,06740	0,08830
		ε _r	2,663	2,669	2,713	2,763	2,835	2,931	3,052	3,173	3,318	3,529	3,75	3,993
	VZ3	tgδ	0,00283	0,00282	0,00297	0,00361	0,00504	0,00856	0,01540	0,02400	0,03400	0,04770	0,05750	0,07390
		ε _r	3,052	3,054	3,08	3,11	3,154	3,219	3,293	3,377	3,46	3,595	3,741	3,913
	VZ4	tgδ	0,00205	0,00207	0,00219	0,00274	0,00401	0,00708	0,01280	0,01790	0,02560	0,03550	0,05290	0,08510
		ε _r	2,342	2,346	2,366	2,386	2,42	2,467	2,529	2,564	2,591	2,628	2,688	2,807
	VZ5	tgδ	0,00248	0,00249	0,00257	0,00304	0,00460	0,00821	0,01430	0,02180	0,02910	0,03800	0,04910	0,08330
		ε _r	2,498	2,501	2,521	2,545	2,586	2,637	2,691	2,741	2,782	2,781	2,73	2,742
200 h	VZ1	tgδ	0,00252	0,00252	0,00265	0,00298	0,00362	0,00433	0,00511	0,00596	0,00737	0,00988	0,01510	0,02680
		ε _r	2,526	2,531	2,554	2,576	2,61	2,652	2,695	2,737	2,784	2,84	2,911	3,016
	VZ2	tgδ	0,00254	0,00255	0,00262	0,00299	0,00354	0,00439	0,00524	0,00656	0,00810	0,01100	0,01980	0,03450
		ε _r	2,599	2,612	2,628	2,642	2,663	2,683	2,71	2,742	2,781	2,816	2,863	2,901
	VZ3	tgδ	0,00271	0,00272	0,00288	0,00324	0,00388	0,00504	0,00606	0,00725	0,00903	0,01210	0,02110	0,04370
		ε _r	3,003	3,012	3,039	3,066	3,089	3,114	3,126	3,096	3,039	2,99	2,953	2,996
	VZ4	tgδ	0,00206	0,00207	0,00220	0,00246	0,00304	0,00390	0,00495	0,00605	0,00777	0,01090	0,01920	0,03990
		ε _r	2,397	2,408	2,437	2,465	2,504	2,554	2,6	2,602	2,601	2,603	2,629	2,68
	VZ5	tgδ	0,00264	0,00265	0,00281	0,00316	0,00372	0,00439	0,00536	0,00691	0,00831	0,01190	0,02000	0,03580
		ε _r	2,453	2,463	2,49	2,513	2,54	2,566	2,594	2,615	2,608	2,562	2,503	2,5

500 h	VZ1	tgδ	0,00248	0,00249	0,00262	0,00298	0,00368	0,00435	0,00566	0,00710	0,00899	0,01290	0,01880	0,03240
		ε _r	2,499	2,512	2,526	2,531	2,539	2,548	2,539	2,528	2,521	2,512	2,519	2,528
	VZ2	tgδ	0,00250	0,00257	0,00271	0,00302	0,00378	0,00439	0,00575	0,00715	0,00908	0,01240	0,01890	0,03310
		ε _r	2,503	2,511	2,528	2,541	2,548	2,521	2,503	2,486	2,471	2,482	2,496	2,512
	VZ3	tgδ	0,00264	0,00266	0,00284	0,00323	0,00381	0,00472	0,00596	0,00720	0,00913	0,01280	0,01960	0,03970
		ε _r	2,792	2,806	2,834	2,817	2,788	2,741	2,69	2,635	2,585	2,526	2,498	2,527
	VZ4	tgδ	0,00204	0,00205	0,00218	0,00251	0,00302	0,00370	0,00486	0,00606	0,00815	0,01110	0,01850	0,03270
		ε _r	2,213	2,221	2,244	2,251	2,259	2,274	2,29	2,308	2,32	2,321	2,332	2,372
	VZ5	tgδ	0,00244	0,00245	0,00259	0,00291	0,00351	0,00426	0,00557	0,00706	0,00886	0,01250	0,02260	0,03860
		ε _r	2,396	2,404	2,428	2,43	2,431	2,425	2,421	2,416	2,406	2,379	2,375	2,4
1000 h	VZ1	tgδ	0,00262	0,00265	0,00281	0,00317	0,00381	0,00480	0,00606	0,00766	0,00988	0,01350	0,02360	0,03830
		ε _r	2,514	2,526	2,549	2,553	2,557	2,581	2,606	2,649	2,666	2,661	2,656	2,676
	VZ2	tgδ	0,00258	0,00260	0,00269	0,00299	0,00355	0,00432	0,00611	0,00759	0,00990	0,01280	0,01990	0,03100
		ε _r	2,534	2,541	2,549	2,556	2,561	2,566	2,569	2,542	2,534	2,521	2,516	2,528
	VZ3	tgδ	0,00297	0,00299	0,00319	0,00360	0,00431	0,00549	0,00688	0,00812	0,01020	0,01300	0,01790	0,03180
		ε _r	2,799	2,806	2,829	2,833	2,844	2,846	2,841	2,834	2,819	2,793	2,778	2,768
	VZ4	tgδ	0,00244	0,00245	0,00262	0,00302	0,00371	0,00511	0,00621	0,00770	0,00955	0,01340	0,01970	0,03700
		ε _r	2,447	2,454	2,488	2,506	2,53	2,567	2,589	2,617	2,636	2,645	2,672	2,72
	VZ5	tgδ	0,00267	0,00269	0,00286	0,00325	0,00395	0,00506	0,00660	0,00818	0,01040	0,01390	0,02060	0,03860
		ε _r	2,42	2,424	2,453	2,463	2,478	2,499	2,523	2,562	2,563	2,538	2,514	2,509

Příloha C: Hodnoty z měření absorpčních proudů

Tab. 1: Zjištěné hodnoty z měření absorpčních proudů vzorků TSA220

TSA220		i_{15} [pA]	i_{60} [pA]	i_{10} [pA]	p_{i1} [-]	p_{i10} [-]	I_s [A]	R_x [Ω]	ρ_v [$\Omega \cdot m$]
0 h	VZ1	7,336	2,585	0,631	2,84	4,10	2,83E-13	1,77E+15	3,45E+15
	VZ2	7,689	2,698	0,559	2,85	4,10	2,33E-13	2,15E+15	4,46E+15
	VZ3	7,317	2,522	0,604	2,90	4,18	2,41E-13	2,07E+15	4,53E+15
	VZ4	7,627	2,727	0,652	2,80	4,18	2,72E-13	1,84E+15	3,82E+15
	VZ5	7,779	2,746	0,716	2,83	3,83	2,87E-13	1,74E+15	3,74E+15
60 h	VZ1	6,280	1,940	0,370	3,24	5,24	1E-13	5E+15	9,75E+15
	VZ2	6,200	1,940	0,339	3,20	5,72	1,01E-13	4,95E+15	1,03E+16
	VZ3	6,400	1,970	0,362	3,25	5,44	9,58E-14	5,22E+15	1,14E+16
	VZ4	6,320	2,000	0,362	3,16	5,52	1,1E-13	4,55E+15	9,46E+15
	VZ5	6,180	1,920	0,341	3,22	5,63	1,13E-13	4,42E+15	9,5E+15
100 h	VZ1	6,552	2,005	0,393	3,27	5,10	1,15E-13	4,35E+15	8,48E+15
	VZ2	6,936	2,079	0,402	3,34	5,18	1,15E-13	4,35E+15	9,04E+15
	VZ3	6,721	2,004	0,367	3,35	5,47	1,12E-13	4,46E+15	9,74E+15
	VZ4	6,690	2,050	0,381	3,26	5,38	1,06E-13	4,72E+15	9,81E+15
	VZ5	6,533	1,963	0,380	3,33	5,16	1,13E-13	4,42E+15	9,5E+15
200 h	VZ1	7,483	2,377	0,493	3,15	4,83	1,24E-13	4,04E+15	7,88E+15
	VZ2	8,110	2,620	0,513	3,10	5,11	1,41E-13	3,53E+15	7,35E+15
	VZ3	7,910	2,530	0,501	3,13	5,05	1,42E-13	3,53E+15	7,71E+15
	VZ4	7,370	2,270	0,438	3,25	5,18	1,16E-13	4,3E+15	8,95E+15
	VZ5	7,450	2,210	0,421	3,37	5,25	1,16E-13	4,33E+15	9,29E+15
500 h	VZ1	19,700	6,230	1,260	3,16	4,94	4,71E-13	1,06E+15	2,07E+15
	VZ2	17,900	5,750	1,140	3,11	5,04	3,95E-13	1,27E+15	2,63E+15
	VZ3	20,200	6,288	1,179	3,21	5,33	3,68E-13	1,36E+15	2,97E+15
	VZ4	18,000	5,702	1,120	3,16	5,09	3,45E-13	1,45E+15	3,02E+15
	VZ5	16,900	5,330	0,998	3,17	5,34	3,08E-13	1,62E+15	3,48E+15
1000 h	VZ1	24,200	8,040	1,420	3,01	5,66	8,8E-13	5,68E+14	1,11E+15
	VZ2	21,800	7,610	1,350	2,86	5,64	6,04E-13	8,28E+14	1,72E+15
	VZ3	22,500	7,500	1,390	3,00	5,40	4,15E-13	1,21E+15	2,63E+15
	VZ4	18,500	5,700	0,998	3,25	5,71	3,89E-13	1,29E+15	2,67E+15
	VZ5	18,100	5,630	0,955	3,21	5,90	4E-13	1,25E+15	2,68E+15

Tab. 2: Zjištěné hodnoty z měření absorpčních proudů vzorků TSA220+SiO₂

TSA220+SiO ₂	i ₁₅ [pA]	i ₆₀ [pA]	i ₁₀ [pA]	p _{i1} [-]	p _{i10} [-]	I _s [A]	R _x [Ω]	ρ _v [Ω·m]	
0 h	VZ1	8,890	3,518	1,229	2,53	2,86	7,24E-13	6,91E+14	1,39E+15
	VZ2	10,000	4,264	1,680	2,34	2,54	9,89E-13	5,06E+14	1,01E+15
	VZ3	9,538	4,079	1,599	2,34	2,55	9,30E-13	5,38E+14	1,05E+15
	VZ4	9,214	3,982	1,606	2,31	2,48	9,23E-13	5,42E+14	1,03E+15
	VZ5	9,729	4,404	1,770	2,21	2,49	1,01E-12	4,95E+14	9,27E+14
60 h	VZ1	7,230	2,300	0,476	3,14	4,83	1,49E-13	3,36E+15	6,76E+15
	VZ2	6,270	1,980	0,402	3,17	4,93	1,31E-13	3,82E+15	7,64E+15
	VZ3	6,770	2,190	0,445	3,09	4,92	1,4E-13	3,57E+15	6,95E+15
	VZ4	6,150	1,930	0,408	3,19	4,73	1,21E-13	4,13E+15	7,82E+15
	VZ5	6,310	2,030	0,369	3,11	5,50	1,22E-13	4,1E+15	7,67E+15
100 h	VZ1	7,120	2,220	0,442	3,21	5,23	1,45E-13	3,45E+15	6,95E+15
	VZ2	7,350	2,280	0,464	3,22	4,91	1,4E-13	3,57E+15	7,15E+15
	VZ3	6,970	2,210	0,421	3,15	5,25	1,68E-13	2,98E+15	5,79E+15
	VZ4	6,990	2,150	0,454	3,25	4,74	1,36E-13	3,68E+15	6,96E+15
	VZ5	6,967	2,187	0,467	3,19	4,69	1,4E-13	3,57E+15	6,69E+15
200 h	VZ1	8,330	2,840	0,641	2,93	5,13	1,74E-13	2,87E+15	5,79E+15
	VZ2	9,540	3,310	0,667	2,88	4,96	1,81E-13	2,76E+15	5,52E+15
	VZ3	8,890	3,190	0,636	2,79	5,02	1,83E-13	2,72E+15	5,3E+15
	VZ4	8,560	2,990	0,619	2,86	4,83	1,67E-13	3E+15	5,69E+15
	VZ5	8,430	3,010	0,627	2,80	4,80	2,22E-13	2,25E+15	4,22E+15
500 h	VZ1	18,100	5,250	1,150	3,45	4,57	4,58E-13	1,09E+15	2,2E+15
	VZ2	16,500	4,880	1,080	3,38	4,52	4,25E-13	1,18E+15	2,36E+15
	VZ3	17,600	5,390	1,020	3,27	5,28	3,98E-13	1,26E+15	2,45E+15
	VZ4	18,400	5,920	1,230	3,11	4,81	4,91E-13	1,02E+15	1,93E+15
	VZ5	15,700	4,950	1,060	3,17	4,67	3,83E-13	1,31E+15	2,45E+15
1000 h	VZ1	21,100	6,880	1,550	3,07	4,44	8,98E-13	5,57E+14	1,12E+15
	VZ2	19,800	6,210	1,390	3,19	4,47	8,71E-13	5,74E+14	1,15E+15
	VZ3	20,400	6,440	1,460	3,17	4,41	8,87E-13	5,64E+14	1,1E+15
	VZ4	20,300	6,450	1,380	3,15	4,67	8,4E-13	5,96E+14	1,13E+15
	VZ5	20,500	6,840	1,670	3,00	4,10	9,31E-13	5,37E+14	1,01E+15

Tab. 3: Zjištěné hodnoty z měření absorpčních proudů vzorků TSA220+SiO₂+PA

TSA220+SiO ₂ +PA		i ₁₅ [pA]	i ₆₀ [pA]	i ₁₀ [pA]	p _{i1} [-]	p _{i10} [-]	I _s [A]	R _x [Ω]	ρ _v [Ω·m]
0 h	VZ1	7,882	2,660	0,677	2,96	3,93	2,56E-13	1,95E+15	3,89E+15
	VZ2	8,820	3,079	0,782	2,86	3,94	3,23E-13	1,55E+15	3,10E+15
	VZ3	8,090	2,871	0,748	2,82	3,84	2,90E-13	1,72E+15	3,30E+15
	VZ4	9,041	3,418	0,933	2,64	3,66	3,68E-13	1,36E+15	2,81E+15
	VZ5	9,908	3,630	0,904	2,73	4,02	3,71E-13	1,35E+15	3,02E+15
60 h	VZ1	8,580	3,100	0,765	2,77	4,05	2,25E-13	2,22E+15	4,43E+15
	VZ2	8,970	3,180	0,820	2,82	3,88	2,37E-13	2,11E+15	4,23E+15
	VZ3	9,620	3,650	0,827	2,64	4,41	2,34E-13	2,14E+15	4,08E+15
	VZ4	11,100	4,000	0,938	2,78	4,26	2,43E-13	2,06E+15	4,25E+15
	VZ5	14,700	5,640	1,230	2,61	4,59	3,65E-13	1,37E+15	3,07E+15
100 h	VZ1	8,120	2,680	0,572	3,03	4,69	1,75E-13	2,86E+15	5,69E+15
	VZ2	8,390	2,820	0,641	2,98	4,40	1,9E-13	2,63E+15	5,27E+15
	VZ3	8,070	2,680	0,525	3,01	5,10	1,83E-13	2,73E+15	5,22E+15
	VZ4	9,780	3,230	0,736	3,03	4,39	2,19E-13	2,28E+15	4,72E+15
	VZ5	9,950	3,250	0,686	3,06	4,74	2,26E-13	2,21E+15	4,96E+15
200 h	VZ1	9,500	3,440	0,772	2,76	4,46	2E-13	2,49E+15	4,97E+15
	VZ2	9,410	3,390	0,699	2,78	5,05	2,15E-13	2,32E+15	4,65E+15
	VZ3	9,370	3,440	0,704	2,72	4,89	2E-13	2,5E+15	4,78E+15
	VZ4	13,900	5,400	1,110	2,57	4,86	2,58E-13	1,94E+15	4,01E+15
	VZ5	12,600	4,760	1,060	2,65	4,49	2,79E-13	1,79E+15	4,01E+15
500 h	VZ1	21,900	7,150	1,680	3,06	4,26	6,37E-13	7,85E+14	1,56E+15
	VZ2	20,500	6,480	1,490	3,16	4,35	6,58E-13	7,6E+14	1,52E+15
	VZ3	19,100	6,370	1,430	3,00	4,45	6,08E-13	8,23E+14	1,57E+15
	VZ4	23,100	7,450	1,790	3,10	4,16	7,49E-13	6,68E+14	1,38E+15
	VZ5	24,300	8,010	1,840	3,03	4,35	6,9E-13	7,25E+14	1,63E+15
1000 h	VZ1	22,900	7,900	1,940	2,90	4,07	1,01E-12	4,97E+14	9,9E+14
	VZ2	23,100	8,100	1,980	2,85	4,09	1,1E-12	4,55E+14	9,12E+14
	VZ3	18,100	6,050	1,250	2,99	4,84	9,54E-13	5,24E+14	1E+15
	VZ4	25,300	9,380	2,320	2,70	4,04	1,12E-12	4,46E+14	9,22E+14
	VZ5	27,600	10,000	2,650	2,76	3,77	1,2E-12	4,16E+14	9,33E+14

Příloha D: Hodnoty z měření elektrické pevnosti

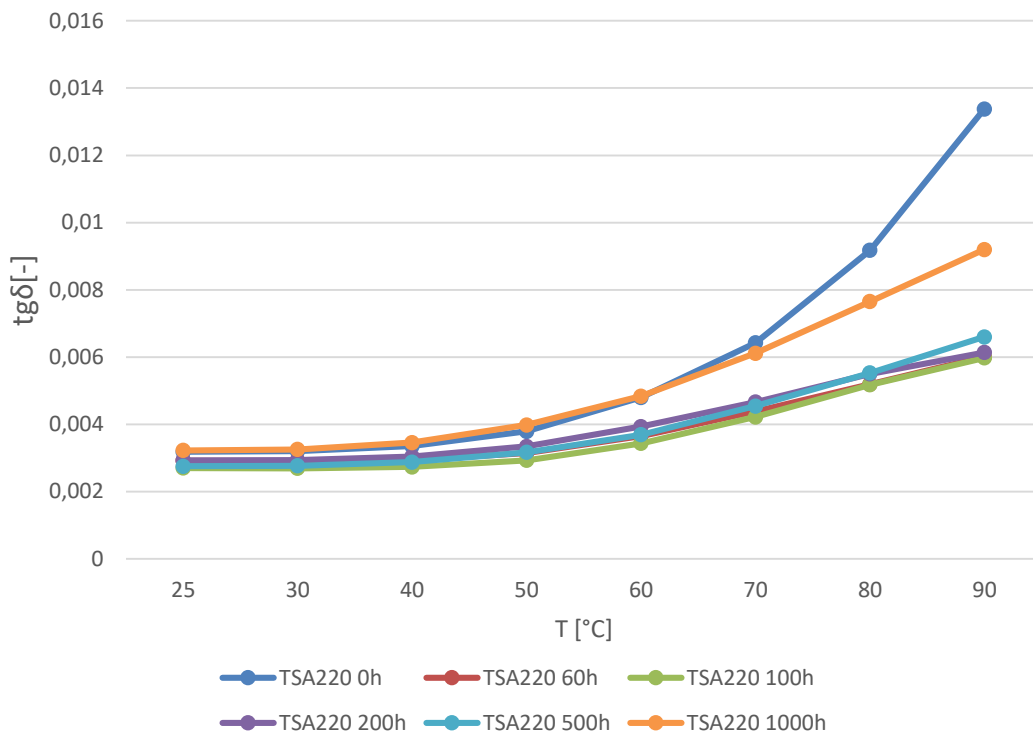
Tab. 1: Zjištěné hodnoty elektrické pevnosti vzorků jednotlivých materiálů

Průraz		TSA220		TSA220+SiO ₂		TSA220+SiO ₂ +PA	
		Up [kV]	Ep [kV/mm]	Up [kV]	Ep [kV/mm]	Up [kV]	Ep [kV/mm]
0 h	1	35,49	35,60	44,24	38,14	43,90	40,76
	2	34,50	34,47	40,08	34,20	36,18	39,54
	3	35,09	37,17	45,11	43,17	50,03	44,43
	4	42,96	43,13	40,02	39,51	38,40	41,97
	5	44,10	41,72	41,30	35,88	44,95	47,32
1000 h	1	42,40	41,17	48,54	46,99	45,09	55,53
	2	41,50	44,82	49,31	41,58	47,03	48,48
	3	38,56	44,89	51,06	52,91	48,16	54,60
	4	55,20	38,66	52,25	42,86	44,86	46,83
	5	50,12	39,19	46,29	43,46	48,91	47,07

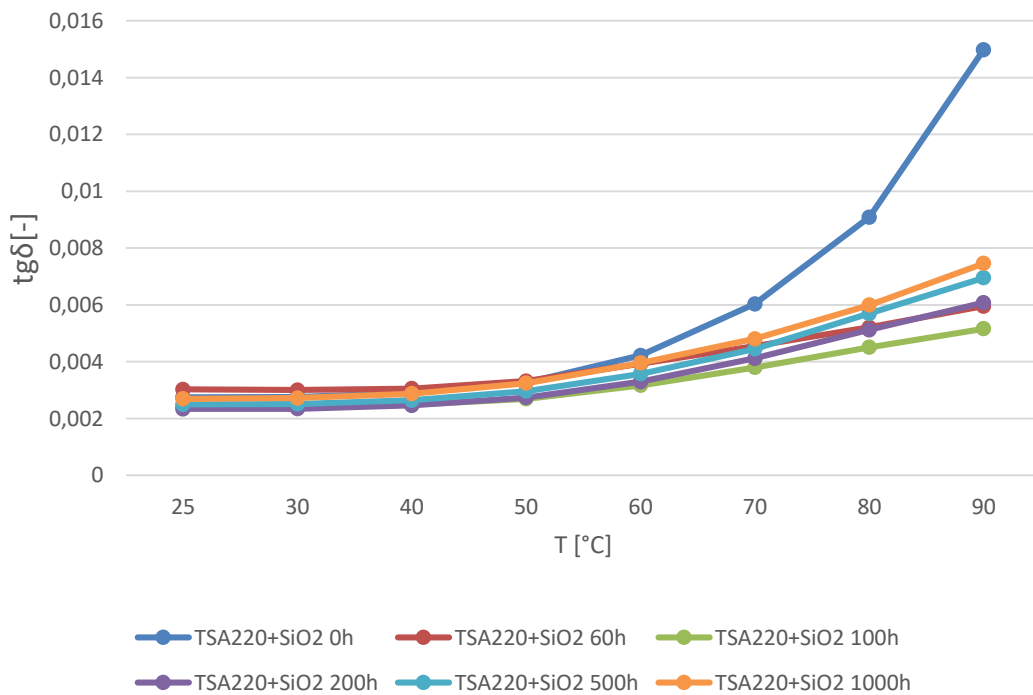
Tab. 2: Statistické hodnoty elektrické pevnosti

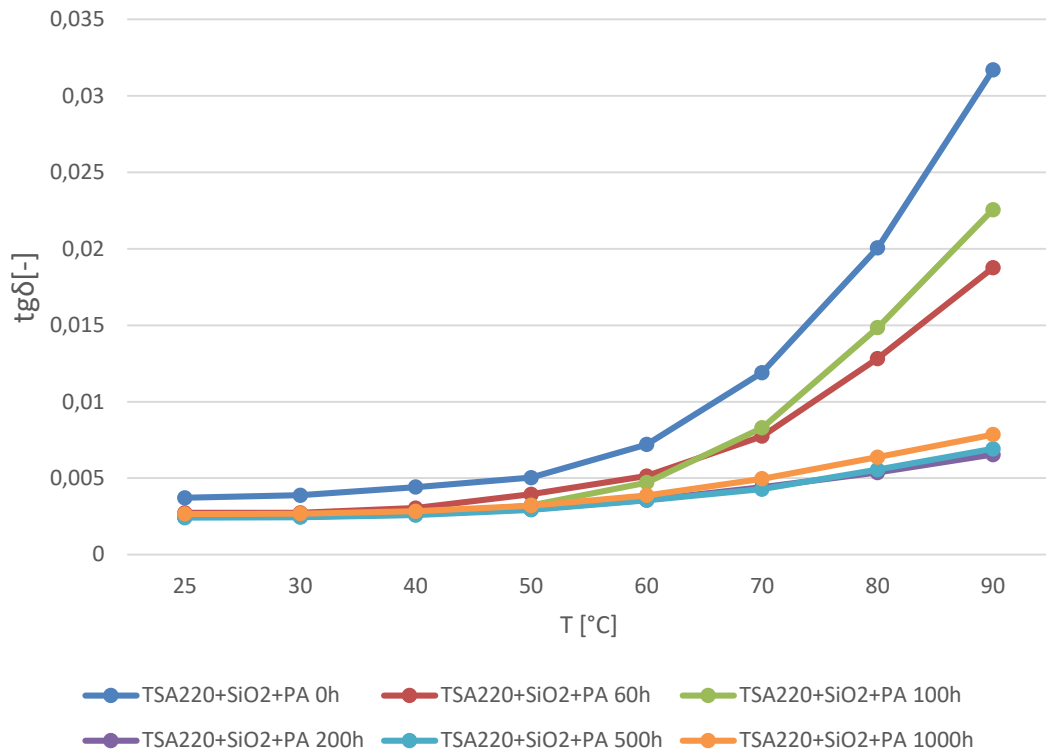
		TSA220	TSA220+SiO ₂	TSA220+SiO ₂ +PA
0 h	x _{min} [kV]	34,47	34,20	39,54
	x _{max} [kV]	43,13	43,17	47,32
	∅ [kV]	38,42	38,18	42,80
	E(x) [kV]	37,17	38,14	41,97
	σ [kV]	3,41	3,09	2,78
	v _x [%]	8,89	8,10	6,48
1000 h	x _{min} [kV]	38,66	41,58	46,83
	x _{max} [kV]	44,89	52,91	55,53
	∅ [kV]	41,74	45,56	50,50
	E(x) [kV]	41,17	43,46	48,48
	σ [kV]	2,67	4,09	3,78
	v _x [%]	6,41	8,98	7,48

Příloha E: Závislost ztrátového činitele na teplotě

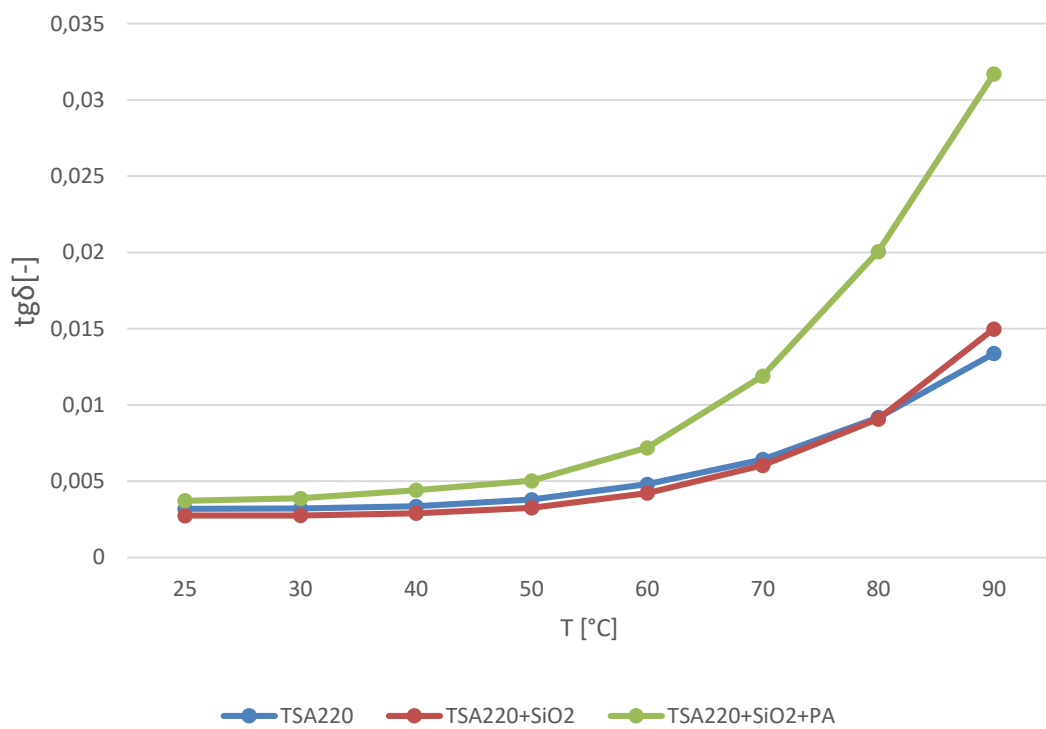


Obr. 1: Graf ukazující závislost ztrátového činitele na teplotě vzorků TSA220

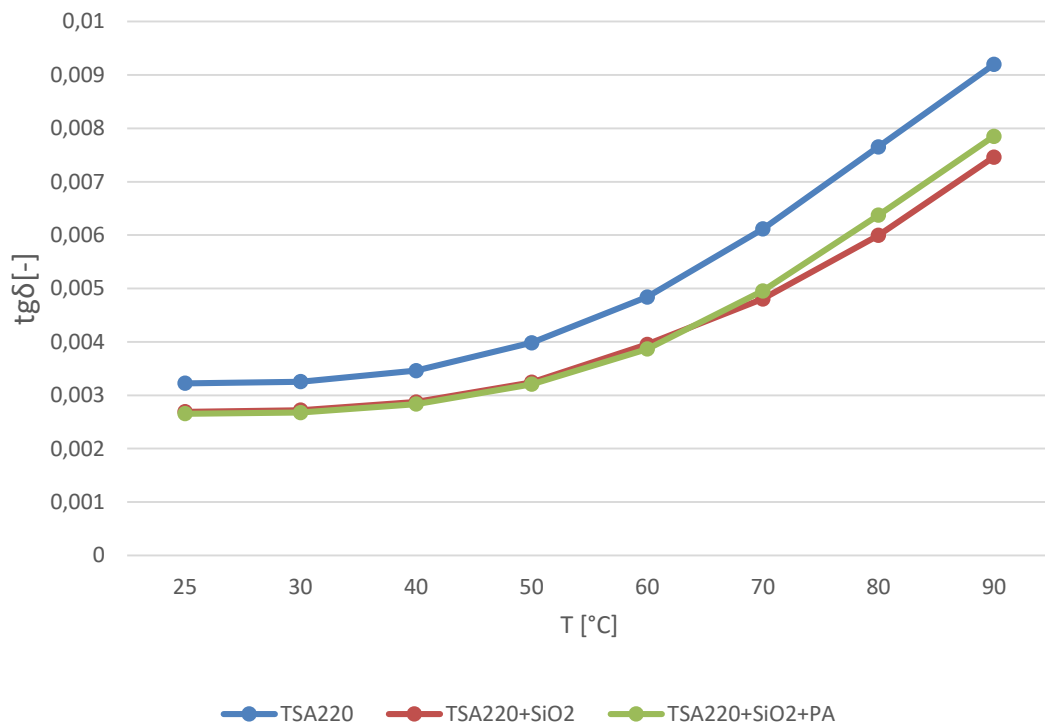
Obr. 2: Graf ukazující závislost ztrátového činitele na teplotě vzorků TSA220+SiO₂



Obr. 3: Graf ukazující závislost ztrátového činitele na teplotě vzorků TSA220+SiO₂+PA

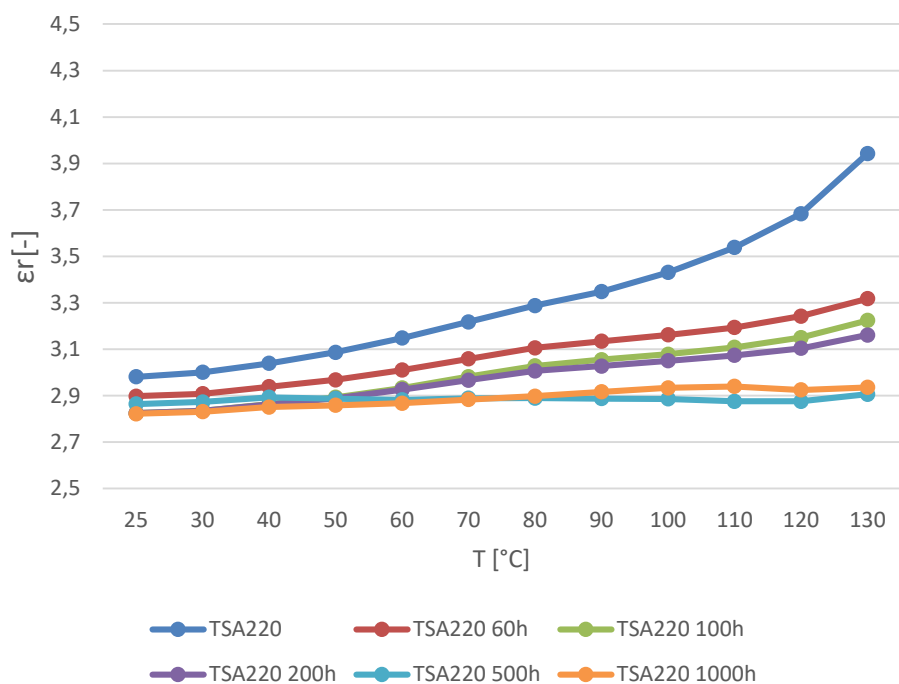


Obr. 4: Graf ukazující porovnání ztrátového činitele jednotlivých materiálů v závislosti na teplotě v době 0 hodin

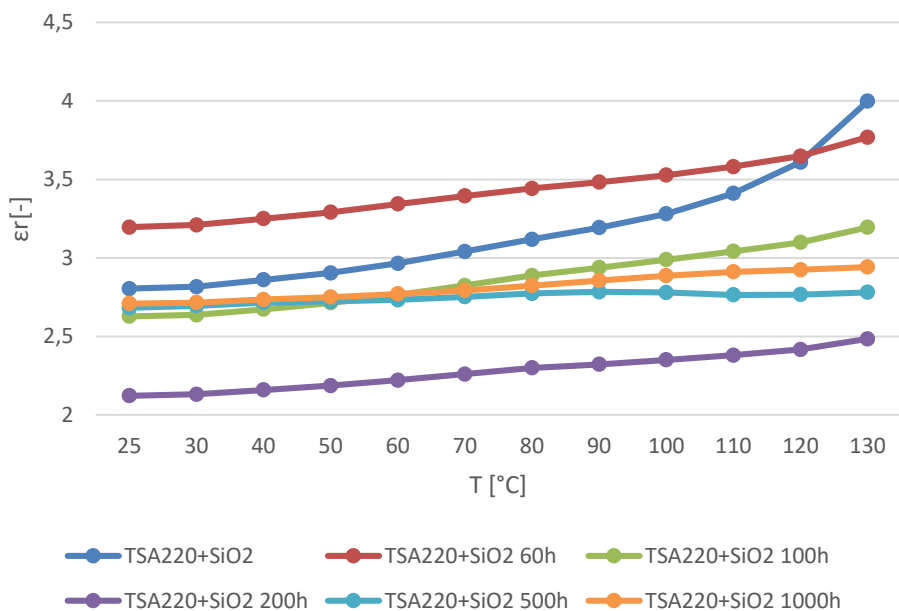


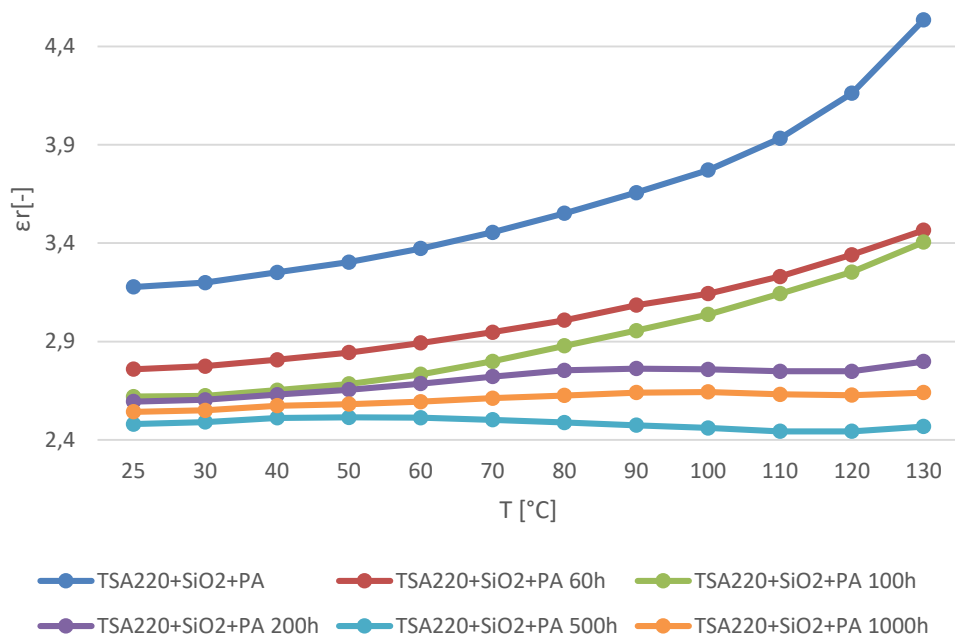
Obr. 5: Graf ukazující porovnání ztrátového činitele jednotlivých materiálů v závislosti na teplotě v době 1000 hodin

Příloha F: Závislost relativní permitivity na teplotě

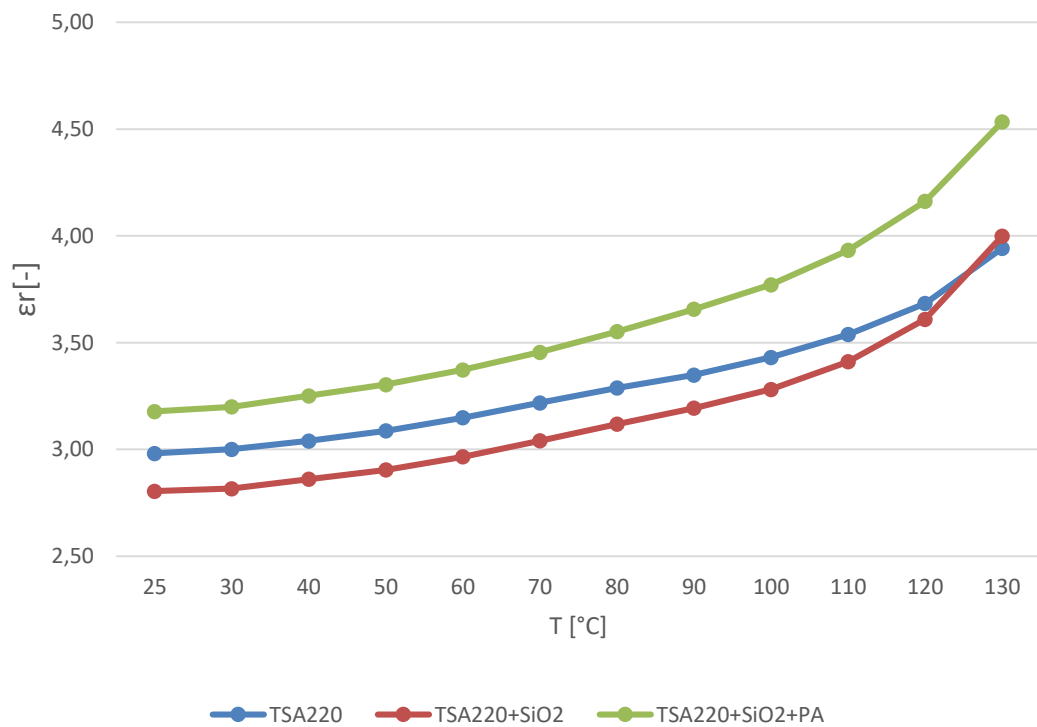


Obr. 1: Graf ukazující závislost relativní permitivity na teplotě vzorků TSA220

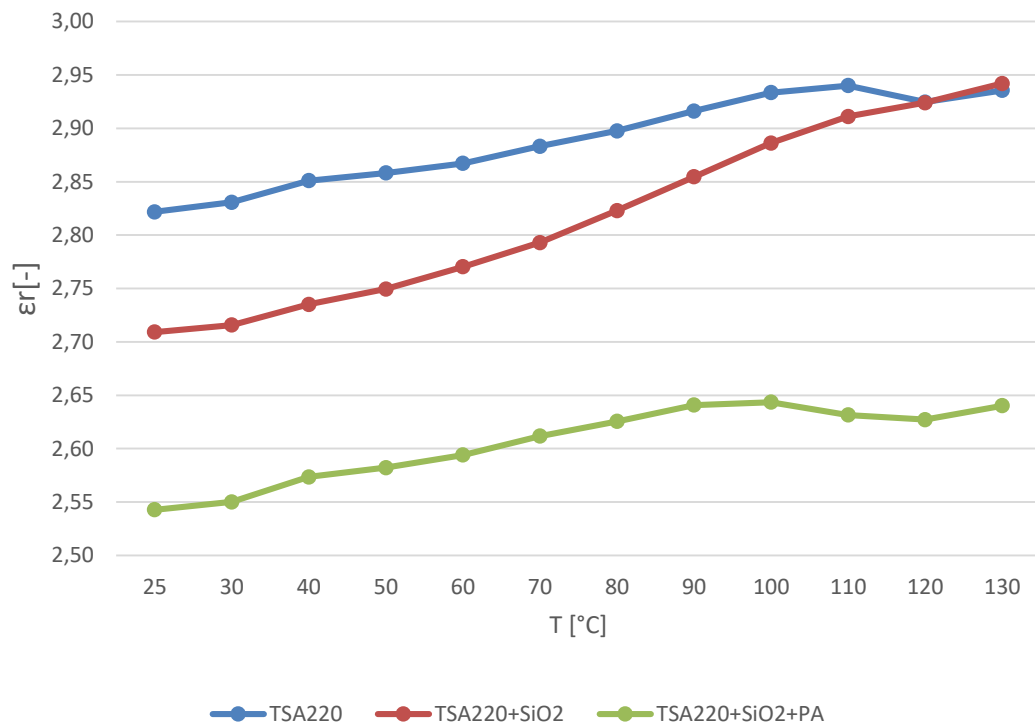
Obr. 2: Graf ukazující závislost relativní permitivity na teplotě vzorků TSA220+SiO₂



Obr. 3: Graf ukazující závislost relativní permitivity na teplotě vzorků TSA220+SiO₂+PA



Obr. 4: Graf ukazující porovnání relativní permitivity jednotlivých materiálů v závislosti na teplotě v době 0 hodin



Obr. 5: Graf ukazující porovnání relativní permitivity jednotlivých materiálů v závislosti na teplotě v době 1000 hodin

Příloha G: Katalogový list impregnačního laku Epoxylite TSA220



Epoxylite® TSA 220

Description:

Single component, clear yellow, 100% solids Epoxy VPI resin.

Product provides for a cured insulation system which conforms to thermal class 220° C.

Application:

High performance VPI resin for treatment of traction motors and field coils.

Processing:

For a complete guide to the processing of components and machines in Epoxylite® TSA 220 please refer to the separate processing data sheet for this product.

Containers of Epoxylite® TSA 220 should be stored in a cool place away from direct sunlight or other heat sources.

Maintenance of Resin:

The viscosity and gel-time of Epoxylite® TSA 220 in tanks should be regularly monitored and maintained within the recommended limits.

A Tank Sample Testing service is available from ELANTAS on request.

Properties:

Appearance	Off white / buff coloured liquid	
Viscosity	1250	mPas @ 50°C
Specific Gravity	1.18	g / cm ³
Mix Ratio	Single Component	p.b.w.
Mix Ratio	Single component	p.b.v.
Gelation Time	6 minutes	@ 165°C
Cure Schedule	12 hours	@ 165°C
Flash Point	> 200	°C

EpoxyLite® TSA 220

Cured Properties		
Thermal Class	(ASTM D2307 / 20000 hrs)	220° C
Shore D Hardness	(DIN 53505)	92 @ 25° C
Glass Transition Temp.	(IEC 1006)	150° C
Tensile Strength	(ISO 527)	110 N / mm ²
Elongation at Break	(ISO 527)	2.5 %
Thermal Coeff of Expansion	(DIN 53752)	50.10 ⁻⁶ K ⁻¹
Thermal Conductivity	(ISO 8894-1)	0.21 W / mK
UL Recognition		
Water Absorption	(ISO 62)	0.12 % @ 23°C
Dielectric Strength	(IEC 243-1)	260 kV / cm
Dielectric Constant	(IEC 250)	3.6 @ 50Hz
Dissipation Factor	(IEC 250)	0.003 @ 20° C
Volume Resistivity	(IEC 93)	> 10 ¹³ ohm / cm
Comparative Tracking Index	(IEC 112)	> 600 Volts
Storage	Minimum storage life 12 months in tightly closed containers at temperatures below 25°C.	
Handling	Refer Material safety data sheet.	
Issue	January 2008	

Our advice in application technology given verbally, in writing and by testing corresponds to the best of our knowledge and belief, but is intended as information given without obligation, also with respect to any protective rights held by third parties. It does not relieve you from your own responsibility to check the products for their suitability to the purposes and processes intended. The application, usage and processing of the products are beyond our reasonable control and will completely fall into your scope of responsibility. Should there nevertheless be a case of liability from our side, this will be limited to any damage to value of the merchandise delivered by us. Naturally, we assume responsibility for the unobjectionable quality of our products, as defined in our General Terms and conditions.