

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ
ELEKTRONIKY**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

**Pevné anorganické elektroizolační materiály a jejich
dielektrické vlastnosti**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2016/2017

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Jakub KYLIÁN**

Osobní číslo: **E13B0455P**

Studijní program: **B2644 Aplikovaná elektrotechnika**

Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**

Název tématu: **Pevné anorganické elektroizolační materiály a jejich dielektrické vlastnosti**

Zadávací katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

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

1. Stručně charakterizujte materiály patřící do skupiny pevných anorganických materiálů s elektroizolačními vlastnostmi.
2. Popište důležité technologie výroby se zaměřením na skleněné a keramické materiály.
3. Uveďte přehled konkrétních aplikací elektroizolačních materiálů na bázi keramiky a skla.
4. Charakterizujte chování anorganických elektroizolačních materiálů v elektrickém poli se zaměřením na mechanismy relaxačních polarizací.
5. Realizujte měření vybraných elektroizolačních materiálů (např. na bázi keramiky) s využitím dielektrické spektroskopie ve vhodném frekvenčním a teplotním rozsahu.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah kvalifikační práce: 30 - 40 stran

Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

1. F. CARDARELLI. Materials handbook: A Concise Desktop Reference. 2. vyd. London: Springer, 2008, 1339 s. ISBN 978-184-6286-698.
2. E. KUČEROVÁ. Elektrotechnické materiály. 1. vyd. V Plzni: Západočeská univerzita, 2002, 174 s. ISBN 80-708-2940-0.
3. F. J. SHACKELFORD a R. DOREMUS. Ceramic and glass materials: Structure, properties and processing. New York: Springer, 2008, xii, 201 s. ISBN 978-1-4419-4460-3.
4. D. W. RICHERSON. Modern Ceramic Engineering: Properties, Processing, and Use Design. 2. vyd. New York: Marcel Dekker, 1992, 860 s. ISBN 08-247-8634-3.
5. Elektronické informační zdroje (SUMMON - vyhledávací nástroj knihovny ZČU, případně přímo Science Direct, IEEE Explore atd.)

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Petr Kadlec
Regionální inovační centrum elektrotechniky

Datum zadání bakalářské práce: 14. října 2016

Termín odevzdání bakalářské práce: 8. června 2017

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



Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 14. října 2016

Abstrakt

Tato bakalářská práce je zaměřena na pevné anorganické elektroizolační materiály, popis jejich vlastností a jejich aplikace v elektrotechnice. V této práci je řešena hlavně problematika skel, keramik a jsou uvedeny základní informace o slídě a azbestu. Anorganické materiály jsou používány hlavně díky své vysoké teplotní odolnosti, odolnosti proti povětrnostním vlivům a také díky některým svým dalším specifickým vlastnostem. S ohledem na tyto vlastnosti jsou pak tyto materiály používány v běžném životě jako konstrukční materiály a díky svým specifickým vlastnostem i v elektrotechnice jako izolanty. Skla a keramiky představují velmi zajímavé materiály i z hlediska jejich výroby. Při výrobě těchto materiálů lze využít různé technologické procesy, v rámci kterých dochází k přípravě vstupních surovin, jejich mísení, tavení, případně lisování a dalším procesům, které jsou níže v práci uvedeny. V práci je také popsáno, proč se jednotlivé pevné anorganické materiály, konkrétní typy keramik a skel, v elektrotechnice používají pro konkrétní aplikace. Praktická část práce se věnuje stručnému představení širokopásmové dielektrické spektroskopie jako nástroje pro hodnocení chování dielektrika v elektrickém poli v širokém frekvenčním i teplotním rozsahu.

Klíčová slova

Keramika, sklo, izolant, širokopásmová dielektrická spektroskopie, relativní permitivita, dielektrikum

Abstract

This bachelor thesis is focused on solid inorganic electrical insulating materials, description of their properties and their application in electrical engineering. This thesis deals mainly with glass, ceramics and basic information about mica and asbestos. Inorganic materials are mainly used because of their high temperature resistance, weather resistance and some of their other specific properties. With respect to these properties, these materials are used in everyday life as structural materials and, due to their specific properties, also as insulators in electrical engineering. Glasses and ceramics are very interesting materials in terms of their production. During the production of these materials, various technological processes can be used to prepare feedstocks, blending them, melting or stamping them, and other processes listed below. The thesis also describes why individual solid inorganic materials, particular types of ceramics and glass, are used in electrical engineering for specific applications. The practical part deals with the brief introduction of broadband dielectric spectroscopy as a tool for evaluation of dielectric behaviour in the electric field in a wide frequency and temperature range.

Key words

Ceramics, glass, insulant, broadband dielectric spectroscopy, relative permittivity, dielectric

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

.....

podpis

V Plzni dne 7.6.2017

Jakub Kylián

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Petru Kadlecovi za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce. Dále bych chtěl poděkovat grantu, díky kterému tato práce vznikla, tj. s podporou Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy ČR v rámci projektu RICE – Nové technologie a koncepce pro inteligentní systémy, číslo projektu LO1607. Zároveň bych chtěl poděkovat panu Ing. Vernerovi, který mne obeznámil s výrobou keramiky v praxi. Chtěl bych také poděkovat Hanině, která mi byla při psaní oporou a díky které jsem vše zvládnul.

Obsah

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	10
ÚVOD.....	13
1 CHARAKTERIZACE ANORGANICKÝCH IZOLAČNÍCH MATERIÁLŮ	14
2 KATEGORIZACE A VYUŽITÍ ANORGANICKÝCH IZOLAČNÍCH MATERIÁLŮ	15
2.1.1 Sklo	15
2.1.2 Slída.....	18
2.1.3 Azbest.....	21
2.1.4 Keramika.....	22
2.2 PROBLEMATIKA ZDRAVOTNÍ NEZÁVADNOSTI ANORGANICKÝCH MATERIÁLŮ.....	24
3 TECHNOLOGIE VÝROBY SKLA A KERAMIKY	26
3.1 TECHNOLOGIE VÝROBY KERAMIKY	26
3.1.1 Suroviny	26
3.1.2 Příprava směsí	27
3.1.3 Tvarování.....	29
3.1.4 Sušení keramiky.....	29
3.1.5 Výpal.....	31
3.1.6 Optimalizace výpalu	32
3.1.7 Povrchové úpravy.....	32
3.2 TECHNOLOGIE VÝROBY SKLA.....	33
3.2.1 Suroviny	33
3.2.2 Tavení	33
3.2.3 Pece	35
3.2.4 Zpracování utavené skloviny.....	35
3.2.5 Chlazení	35
4 APLIKACE ELEKTROTECHNICKÝCH MATERIÁLŮ NA BÁZI KERAMIKY A SKLA	37
4.1 APLIKACE KERAMIKY	37
4.1.1 Kondenzátory typu 1.....	37
4.1.2 Kondenzátory typu 2.....	38
4.1.3 Kondenzátory typu 3.....	38
4.1.4 Keramika v mikroelektronice.....	39
4.1.5 Karbid boru.....	39
4.2 APLIKACE SKLA	39
4.2.1 Nízkoztrátová skla	39
4.2.2 Skleněná vlákna.....	40
5 CHOVÁNÍ ELEKTROIZOLAČNÍCH MATERIÁLŮ V ELEKTRICKÉM POLI.....	41
5.1 ANORGANICKÉ MATERIÁLY JAKO IZOLANTY.....	41
5.2 DIELEKTRICKÉ ZTRÁTY	42
5.3 RELATIVNÍ PERMITIVITA	43
5.4 POLARIZACE.....	44
5.4.1 Pružná polarizace	45
5.4.2 Nepružná polarizace.....	45
5.5 MAKROSKOPICKÝ NÁHLED NA DIELEKTRIKUM	45
5.6 MIKROSKOPICKÝ NÁHLED NA DIELEKTRIKUM	46
5.7 RELAXAČNÍ POLARIZACE	46
5.7.1 Iontová relaxační polarizace	47
5.7.2 Dipólová relaxační polarizace.....	48
6 UŽITÍ ŠIROKOPÁSMOVÉ DIELEKTRICKÉ SPEKTROSKOPIE.....	49

6.1 MĚŘENÍ.....	49
ZÁVĚR	51
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ.....	52
PŘÍLOHA.....	1

Seznam symbolů a zkratk

α [C·m ² ·V ⁻¹]	polarizovatelnost
d [m]	tloušťka izolantu
D [C·m ⁻²]	indukce elektrického pole
E [V/m]	intenzita elektrického pole
E_p [V/m]	elektrická pevnost
\vec{E}_i [V/m]	vnitřní intenzitou působící na dipól
f_0 [s ⁻¹]	vlastní frekvence změny polohy kolem rovnovážné polohy
k [J/K]	Boltzmannova konstanta
$\vec{\Delta M}$ [C·m]	dipólový moment
n_0 [m ⁻³]	počet slabě vázaných iontů v jednotce objemu
\vec{p}_i [C·m]	velikost dipólového momentu
ρ [kg·m ⁻³]	hustota materiálu
ρ_v [Ω·m]	rezistivita
U_p [V]	průrazné napětí
V [m ³]	objem
ϵ_0 [F/m]	permitivita vakua
ϵ_r [F/m]	permitivita prostředí

ε' [F/m]	reálná část permitivity
ε'' [F/m]	imaginární část permitivity
$\text{tg } \delta_0$ [-]	ztrátový činitel
T [K]	termodynamická teplota
T_k [° C]	kalcinační teplota
T_{max} [° C]	maximální provozní teplota
t_v [W/m · Kg]	tepelná vodivost
τ [s]	relaxační doba
W [kJ/mol]	velikost potenciálové bariéry
AlO ₂	oxid hliničitý
Al ₂ O ₃	oxid hlinitý
As ₂ O ₃	oxid arsenitý
BaO	oxid barnatý
B ₂ O ₃	oxid boritý
CaCO ₃	uhličitan vápenatý
CaO	oxid vápenatý
MgO	oxid hořečnatý
Na ₂ SO ₄	síran sodný

PbO	oxid olovnatý
SiO ₄	kyslíkokřemičitý tetraedr
SiO ₂	oxid křemičitý
TiO ₂	oxid titaničitý

Úvod

Z historického hlediska jsou anorganické nekovové materiály nejstarším druhem materiálů, jejichž používání jako zbraní, nástrojů pro výrobu apod., lze datovat až do doby kamenné. Anorganické nekovové materiály mají dlouhou historii používání, která se datuje až do doby kamenné. V této době se však anorganické nekovové materiály používaly v mnohem menším měřítku, než je tomu dnes. Keramika a sklo společně zaujímá postupem času čím dál tím více prostoru v každodenním životě. Od přechodu skla, které bylo hojně využíváno jako stavební a zkrášlovací prvek, se přešlo díky jeho vlastnostem k využívání v elektrotechnice jako dobrého izolačního materiálu. Zmínky o keramice jsou datovány na několik tisíc let před naším letopočtem. Keramika se u starověkých národů využívala na bázi hlíny, jak pro praktické tak pro dekorativní a ceremoniální účely. Keramika byla hojně využívána ve stavebním průmyslu. Tohoto odvětví se keramika drží ve velké míře i na dále, kdy se vyrábí různé dlaždicové desky apod. Oba materiály mají také využití v lékařství, kdy keramiku lze využít jako materiál pro uzemnění. S postupem času a vývojem technologií se přišlo na fakt, kdy jak sklo, tak i keramika, jsou využívány díky svým specifickým vlastnostem jako dobré izolační materiály v elektrotechnice. [4,6]

V dnešní době jsou tyto materiály díky svým specifickým vlastnostem využívány jako materiály izolační. Použití skla, slídy a keramiky jako dobrých izolačních materiálů si rozebereme v dalších kapitolách. Azbest se v dnešní době, díky zdravotní závadnosti, již nepoužívá. Zdravotní závadnosti tohoto materiálu také popíši v dalších kapitolách této práce.

1 Charakterizace anorganických izolačních materiálů

Anorganické materiály jsou tvořeny anorganickými prvky a případně jejich sloučeninami. V případě pevných látek se jedná např. o materiály, které tvoří zemskou kůru a často se označují jako horniny tvořené minerály. Vytěžená hornina se často dále zpracovává a různými technologickými procesy se získávají další anorganické materiály. V elektrotechnické praxi se lze nejčastěji setkat s kovovými materiály pro výrobu elektrických vodičů a s anorganickými nekovovými materiály pro výrobu elektroizolačních systémů. Těmito anorganickými materiály jsou amorfní skla nebo krystalické keramiky, případně např. i slída a azbest. [4]

Charakteristika skla nebo keramiky není snadná. Keramika má charakteristické vyznačení obsah jedné, či více krystalických fází. Keramika může mít atomární strukturu identickou se strukturou krystalů v případě obsažení jedné krystalické fáze. V tomto případě díky tepelnému zpracování však keramika obsahuje řadu nečistot. Keramika je brána jako anorganický nekovový materiál s heterogenní strukturou tvořenou krystalickými látkami o různém složení a uspořádání. [1,4]

Skla, na rozdíl od keramiky, která je charakteristická krystalickými fázemi, se jeví z hlediska struktury jako látky amorfní.

Pevné anorganické materiály se rozdělují do dvou základních skupin a to na základě rozdílné struktury. První skupinou jsou látky amorfní (např. sklo). Tyto látky nemají pravidelné strukturální uspořádání. Druhou skupinou jsou látky krystalické (polykrystalické), které mají pravidelné uspořádání základní struktury. Tyto látky jsou složené z velkého množství krystalů a patří mezi ně keramika, azbest a slída. Keramika patří do skupiny látek, které jsou krystalické s dalekonosným uspořádáním, rozmístění částic v krystalové mřížce je pravidelné. Krystalické látky a krystaly samotné se rozdělují podle chemických vazeb, ta vzniká vzájemným působením dvou nebo více atomů. Typ vazby poté ovlivňuje vlastnosti sloučenin. Chemické vazby se rozdělují do několika typů a to např. na kovalentní, iontové. Krystalický stav je vytvářen částicemi (molekuly, atomy, ionty). Tyto částice jsou uspořádány v prostoru. Amorfní látky se vyznačují nepravidelným uspořádáním částic v prostoru a jsou tedy od krystalických látek odlišné. [1,2,4,5]

2 Kategorizace a využití anorganických izolačních materiálů

Anorganické pevné materiály využívané při výrobě elektroizolačních systémů se rozdělují do dvou základních skupin a to s ohledem na jejich strukturu. Materiály rozdělujeme na amorfnní a na krystalické. Amorfnní materiály jsou charakteristické svým nepravidelným uspořádáním. Mezi amorfnní materiály se řadí sklo. Druhá skupina, krystalické materiály, mají uspořádání pravidelné a do této skupiny řadíme keramiku, azbest a slídu. [1,2]

2.1.1 Sklo

Jak je uvedeno v předešlé kapitole, sklo je materiálem patřící do vlastní významné skupiny, jelikož existuje široká škála skel a to dle jejich chemického složení. Za normální a mírně zvýšené teploty, je sklo pevnou látkou. Sklo je materiál s dobrými izolačními i technologickými vlastnostmi. Sklo je materiálem, který je odolný chemikáliím a vyznačuje se vysokou mechanickou pevností i vysokoteplotní odolností. Nevýhodou skla je jeho křehkost a při výrobě energetická náročnost. Vzhledem na tyto vlastnosti je sklo využíváno v elektrotechnice jako izolant tak i jako konstrukční materiál. Mezi výhody skla patří jeho světelná propustnost a vakuotěstnost. Strukturální uspořádání skla v prostoru je chaotické. Malou uspořádanost tvoří kyslíkokřemíkové tetraedry (SiO_4)v případě skla křemičitého. Sklovitou strukturu s podobnými vlastnostmi může i oxid boritý (B_2O_3), který tvoří síť trojúhelníků BO_3 - borité sklo. Sklovité uspořádání tvoří ionty přídatných látek, které dávají látce její specifické vlastnosti. Mezi tyto vlastnosti patří teplota tavení, pevnost, křehkost, elektrické vlastnosti. Podle použití dělíme skla do několika skupin a to do skel křišťálových, křemenných apod., tyto druhy si rozebereme v následujících kapitolách. [1,2,5]

Sklo je látka silně polární s různou relativní permitivitou ϵ_r , která se pohybuje v rozmezí od $3,7 \div 16$ [1]. Skla s nižší relativní permitivitou jsou skla čistě křemenná. Skla s vysokou relativní permitivitou jsou skla olovnatá. Sklo dosahuje i velké elektrické pevnosti $200 \div 500 \text{ kV/mm}^{-1}$ [1]. V praxi je však elektrická pevnost nižší a to díky malé povrchové rezistivitě, která má za následek povrchovou výbojovou činnost. [1,2,5]

Rezistivita skla při teplotě okolo 20 °C je $10^{12} \div 10^{18} \Omega \cdot m$ [1]. Při růstu teploty klesá rezistivita skla. Tento jev je způsoben difúzí slabě vázaných iontů, které jsou alkalické. Z tohoto důvodu má sklo v praxi nižší elektrickou pevnost. [1,2,5]

Mechanická pevnost skla

Sklo se za normálního provozu a teploty chová jako pevná křehká látka, při zvýšené teplotě začíná sklo téct a chová se jako viskózní kapalina. Aby mělo sklo zvýšenou pevnost a tudíž jsme jej mohli používat i za zvýšených teplot, probíhají speciální povrchové úpravy. Mezi tyto povrchové úpravy lze počítat i tepelné tvrzení, které je definováno jako prudké ochlazení povrchu, které vyvolá tlakové předpětí na povrchu kompenzované takovým napětím v hlubších vrstvách skla. [1,2,5]

Elektrické vlastnosti skla

Za normálních provozních podmínek a teploty se sklo chová jako dobrý izolant. Avšak pokud se teplota prostředí zvyšuje tak tím klesá rezistivita skla jako materiálu a tím pádem začne růst elektrická vodivost. Velikost měrného odporu je u každého skla odlišná, jelikož závisí na obsahu alkalických oxidů. Vysokou hodnotou měrného odporu se mohou pochlubit skla křemenná např. oxid olovnatý (PbO), oxid barnatý (BaO). V elektrotechnice je označení měrného odporu TK100. Tato hodnota udává teplotu, při níž je měrný odpor $10^8 \Omega \cdot cm$. [1,2,5]

Jak je uváděno v předešlé kapitole, permitivita skla se pohybuje v rozmezí od 3,7 \div 16.[1] S rostoucí teplotou a nízkou frekvencí elektrického proudu relativní permitivita vzrůstá. Důležitou hodnotou udávanou u skla, které používáme jako izolant, je údaj o hodnotě napětí které způsobuje následný průraz a tedy ztrátu elektroizolačních vlastností. [1,2,5]

Rozdělení skla

Sklo je v elektrotechnice využíváno velice často, jelikož je považováno za velmi dobrý izolant. Můžeme jej rozdělit podle využití a také podle chemické struktury.

a) dle chemických vlastností

- *Křemenná skla* - Vyznačují se nízkou relativní permitivitou a vyrábí se tavením velmi čistého křemene v grafitových kelímcích ve vakuu při teplotách 2000 °C. Tato skla mají zároveň vysokou hodnotu měrného odporu, a tudíž se hodí jako izolační materiál. Tato skla se vyznačují velmi dobrými elektrickými a chemickými vlastnostmi.
- *Ploché a obalové sklo* - Kromě oxidů obsahují složky upravující jejich vlastnosti a jejich výrobu. Jejich přednostmi je dobrá mechanická pevnost, chemická odolnost a lze je vystavit atmosférickým vlivům.
- *Křišťálová skla* - Mají vysokou chemickou odolnost, vysoký index lomu a vlnění.
- *Tepelně odolná skla* - Jak je již z názvu patrné, mají výbornou tepelnou odolnost.
- *Skleněná vlákna* – Vyznačují se výraznou chemickou a tepelnou odolností, která může činit až 1600 °C. Skleněná vlákna jsou speciální boritokřemičitá skla.
- *Optická a speciální skla* - Optická skla požadují vysokou propustnost světla, mají přesně dány hodnoty indexu lomu a vlnění. Zároveň mají vysokou homogenitu. Většina optických skel obsahuje vysoké množství BaO. Do speciálních skel lze řadit několik set druhů skel rozmanitého složení (např. fluoridová, chalkogenidová skla).
- *Alkalická skla* - Jsou skla dobře zpracovatelná a jejich výhodou je nízká teplota tání.
- *Skelně krystalické hmoty* - Známé také jako sklokeramika. Tyto sklase vyrábí řízenou krystalizací speciálních skel. Mají vysokou teplotní odolnost, elektrické vlastnosti a oděruvzdolnost. [5]

b) dle využití

- *Křemenné sklo* - Lze tedy využít pro kostry cívek pro vf, pro měření permitivity a jako technologická zařízení pro výrobu integrovaných obvodů.
- *Ploché a obalové sklo* – Využívají se pro výrobu lahví, užitkového zboží, nebo jako automobilové sklo.
- *Křišťálová skla* – Nejčastější využití nacházejí jako dekorativní a užitková skla.
- *Tepelně odolné sklo* - Je také známo pod obchodním názvem Simax, Duran a používá se pro varné domácké sklo, průmyslová dopravní potrubí.
- *Skleněná vlákna* - Jejich hlavním využitím jsou izolace v elektrotechnice, sklolamináty a také jako skelná vata ve stavebnictví pro tepelné a akustické izolace a také jako podložky pro integrované obvody.
- *Optická a speciální skla* – Využívají se pro optoelektroniku, filtry a brýle..
- *Alkalická skla* – Používají se pro konstrukční účely a izolační sloupky.
- *Sklokeramika* - Má širokou škálu využití od varného nádobí, přes výměníky tepla až pod hlavice raket. [1,2,5]

2.1.2 Slída

Slída je hmotou polykrystalickou a je složena z velkého množství krystalů a výraznou vrstevnatou strukturou. Slída se využívá ve dvou typech, modifikacích a to jako muskovit, nebo flogopit. Tyto dva typy mají výborné elektroizolační vlastnosti, které si rozebereme v dalších bodech. Dielektrické ztráty slídy jsou vysoce závislé na teplotě a také na frekvenci. Slída má neměnné vlastnosti až do své kalcinační teploty. Po překročení této hodnoty nastává ztráta vody, která je vázána ve slídě a následná změna vlastností slídy. [3]

Muskovit, také znám jako draselná slída, kyselý křemičitan hlinitodraselný má bezbarvou, hnědou, zelenou barvu. Narozdíl od flogopitu má nižší provozní max. teplotu

(600 °C) a také tepelnou vodivost ($0,3 \div 0,56 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$). [2] Jeho hustota ($2,7 \div 3,2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$) elektrická pevnost ($60 \text{ kV} \cdot \text{mm}^{-1}$) a také relativní permitivita ($6 \div 7$) jsou hodnotami vyššími než u flogopitu. [2]



Obr. 1: Muskovit, převzato z [6]

Flogopit, známý jako hořečnatá slída, kyselý křemičitan hlinitodraselnohořečnatý má jantarovou, zlatou, šedivou barvu. Na rozdíl od muskovitu má vyšší provozní max. teplotu (900 °C) a také tepelnou vodivost ($0,5 \div 0,6 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$). [2] Jeho hustota ($2,6 \div 2,8 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$) elektrická pevnost ($45 \text{ kV} \cdot \text{mm}^{-1}$) a také relativní permitivita ($5 \div 6$) jsou hodnotami nižšími, než-li u muskovitu. [2]



Obr. 2: Flogopit, převzato z [9]

Převážná část slídy se zpracovává dvěma způsoby a to buď mechanickým, nebo chemickým do tzv. slídového papíru – remiky. Remika je slída rozdělaná na jemné částičky a následně zpracována na papírenských strojích. Remika se využívá ve formě kompozitů, kde je nutná nosná složka a pojivo. Hlavním využitím remiky je izolace systému elektrických strojů. [1,2]

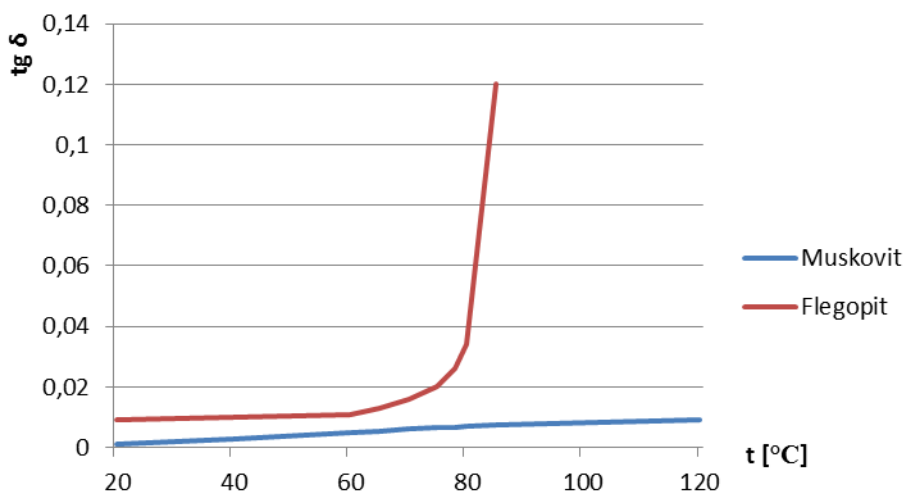
Využití slídy

Slídu lze využít jako dielektrikum v kondenzátorech a také na vysokonapěťové izolační systémy a to ve formě slídového papíru. Slídový papír např., vyráběn firmou SILENT-CZECH. [10] Muskovit lze v elektrotechnice využít jako izolátor, dielektrikum pro kondenzátory a reostaty. Flogopit, obdobně jako muskovit, má široké zastoupení v elektrotechnice a to v závislosti na svých charakteristických vlastnostech. [1,2,3]

Pro izolanty se využívají dva tzv., systémy slídy, mikanity kde je slída aplikována ve své původní podobě, nezměněných slídových lístku. Mikafolium patří pod mikanity je materiál, který je složený ze slídových lístků a podkládacího speciálního celulózniho papíru spojený s šelakem, který se například používá jako izolant statorového a rotorového vinutí do provozního napětí 6kV. Druhým systémem jsou remikanity, kde je slída ve formě slídového papíru. [3]

Tabulka 1 : Vlastnosti muskovitu a flogopitu, převzato z [2]

Vlastnost	muskovit	flogopit
barva	bezbarvý, hnědý, zelený	jantarový, zlatavý
ρ [kg·m ⁻³]	2,7 ÷ 3,2	2,6 ÷ 2,8
T_k [°C]	700 ÷ 800	900 ÷ 1000
t_v [W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]	0,3 ÷ 0,56	0,5 ÷ 0,6
ϵ_r [-]	6 ÷ 7	5 ÷ 6
$\text{tg } \delta$ [-]	1 ÷ 3·10 ⁻⁴	10 ÷ 50·10 ⁻⁴
E_p [kV·mm ⁻¹]	60	45
ρ_v [Ω·m]	10 ¹³ ÷ 10 ¹⁴	10 ¹⁰ ÷ 10 ¹²
T_{max} [°C]	600	900



Graf 1 : Teplotní závislost $\text{tg } \delta$, převzato z [1]

2.1.3 Azbest

Azbestem se nazývají dvě skupiny vláknitých silikátových minerálů. Nejčastějším typem zpracování azbestu je Chryzolit, který můžeme rozdělit na několik vláken s malým průměrem. Azbest bylo možné využívat do extrémních teplot, jelikož jeho specifickými vlastnostmi jsou odolnost vysokým teplotám, nehořlavost ale také ohebnost a odolnost korozi. Největším problémem azbestu je však jeho zdravotní škodlivost na lidské zdraví. Jsou to právě vlákna azbestu, která jsou pro lidský organizmus zdravotně škodlivá. Z tohoto důvodu se azbest již nepoužívá, v minulosti bylo však jeho používání častým jevem. Azbest je v dnešní době nahrazen materiály na bázi skleněných, nebo keramických vláken, kevlaru a polypropylenu. Využití azbestu v dnešní době lze pouze tam, kde nemůže být nahrazen materiály jinými a to za přísného dodržování technologického postupu. [1,2]

Využití azbestu

Jak je již psáno v předchozím bodě, azbest byl kvůli svým zdraví ohrožujícím vlastnostem nahrazen skleněnými, nebo keramickými vlákny. V minulosti se azbest zpracovával jako např. azbestový papír, který se používal jako izolant teplotní třídy H. Azbest byl také zpracován do podoby azbestové lepenky, z které se vyráběly vnitřní izolace plechových krytů vypínačů. [1,2]

2.1.4 Keramika

Keramika je anorganický nekovový materiál s heterogenní strukturou tvořenou krystalickými a někdy i skelnými látkami o různém uspořádání a složení. O technologii výrobě keramiky se budeme zabývat dalším bodě. Keramika obvykle obsahuje póry. Jedná se o jeden z nejvýznamnějších a nejdůležitějších polykrystalických materiálů používaných v elektrotechnice. Specifickým znakem keramiky je její křehkost a malá mechanická pevnost. Jelikož však keramika dokáže čelit vysokým teplotám, je ideální jako tepelný izolant. [1,2,5]

Keramika je zastoupena několika typy, ať už se jedná o izolační hmoty nebo o speciální dielektrika, a to vše podle typu jejího složení a jejích specifických vlastností. Její výchozí surovinou jsou práškovité látky, které se nejprve vytvarují ve formách a následně vypalují v pecích. Základní technologickou operací je proces slinování surové keramické látky při teplotě nižší, než je její teplota tavení. [1,2,5]

Hlavními složkami keramiky jsou oxid hlinitý, oxid křemičitý a voda. Po procesu vypálení keramika obsahuje tři fáze. První fáze nese název krystalická a určuje fyzikální vlastnosti keramiky. Druhá fáze je amorfni, ta ovlivňuje technologické vlastnosti keramiky. Poslední fází je fáze plynná, která nepříznivě ovlivňuje vlastnosti elektrické. [1,2,5]

Keramika je křehká, má velkou smrštivost při spékání a po jejím vypálení lze keramiku upravovat jen broušením. Povrch keramiky je ošetřován glazováním. [1,2,5]

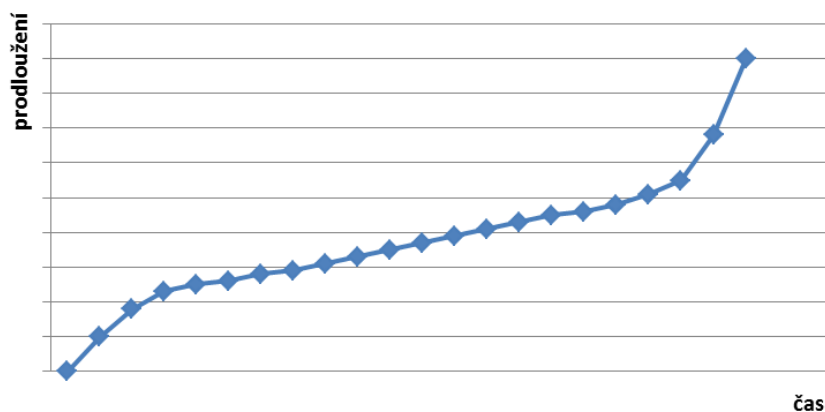
Suroviny pro výrobu keramiky rozdělujeme na dva typy a to na plastické a neplastické. O této problematice budu psát v kapitole číslo 3. [1,2,5]

Vlastnosti keramiky

Keramika je materiál, který je vysoce odolný vysokým teplotám a také následným prudkým změnám teplot. Díky těmto vlastnostem je žáruvzdorná, odolná proti vlhkosti, chemickým vlivům a prakticky nestárne. Na bázi silikátů se tudíž keramika řadí mezi dobré tepelné izolátory. Avšak přenos tepelné energie způsobuje v keramice vlnění, které se šíří krystalem rychlostí zvuku. Vlnění lze nahradit částicemi tzv., fotony jejichž počet

s teplotou roste. Během chemického zatížení za studena může u keramiky docházet k porušení a to v důsledku křehkého lomu. [2]

Její dalším plusem je snadná dostupnost na domácím trhu.



Graf 2: Časový průběh deformace tavení, převzato z [5]

Keramika je díky svým specifickým vlastnostem využívána pro obvody, kde panují vysoké teploty a vysoké kmitočty v řádu GHz. Měřítkem dielektrický ztrát je ztrátový úhel $\text{tg } \delta$. Který je definován vzorcem 1

$$\text{tg } \delta = I_c / I_j \quad (1)$$

kde I_c je vektorem činného proudu a I_j vektorem jalové proudu kondenzátoru. Tento úhel charakterizuje zpoždění vektoru proudu na reálném kondenzátoru proti ideálnímu.

Dielektrické ztráty jsou způsobeny vnitřní a povrchovou vodivostí dielektrika. Společně s rostoucí teplotou rostou i dielektrické ztráty a jsou zároveň závislé na frekvenci elektrického pole. [2,5]

Chemické složení má velký vliv na výsledné vlastnosti keramiky a ta se dělí do několika skupin. Do této skupiny patří keramika silikátová s určitým podílem skelné fáze, keramika besilikátová ve které je určitý podíl sloučenin nebo pevných roztoků oxidů kovů. Dalšími dvěmi skupinami jsou keramiky oxidové vyrobené z jediného žáruvzdorného oxidu kovu, nebo keramiky bezoxidové vyrobené z vysokotavitelných sloučenin. [2,5]

Použití keramiky

Keramiky dále rozdělujeme do skupin podle jejího použití na základě jejích charakteristických vlastností. Pro izolátory a součástky silnoproudé elektrotechniky, součástky odolné náhlým změnám teploty, pro konstrukční a kondenzátorové materiály. [2,5]

- *porcelán* – využíváme jej pro vedení nn, vn, vvn a pro kabelové koncovky
- *kamenina* – využití na izolátorech a nosičích odporových drátů
- *stealit* – steatit je využíván za okolností, které nevyhovují porcelánu. Mezi ně se řadí vyšší mechanická pevnost při vyšších teplotách, které nevyhovují porcelánu.
- *korundová keramika* – tento druh keramiky se používá při vysokých teplotách, které mohou dosahovat až 1300 °C. [2] S ohledem na tento fakt lze použít korundovou keramiku pro vakuovou a vysokofrekvenční techniku. Díky její veliké tvrdosti je její úprava možná jen diamantem. [2,5]

2.2 Problematika zdravotní nezávadnosti anorganických materiálů

Zmiňované anorganické pevné materiály vykazují velmi dobré elektroizolační vlastnosti a jsou tak pro řadu aplikací v elektrotechnice velmi důležité. Je však třeba také počítat s možností určitého škodlivého působení na lidské zdraví. I když většina z nich vážné zdravotní komplikace nezpůsobuje, jejich výroba může být pro člověka zdraví škodlivá. V kapitole o azbestu jsem se o tomto problému již zmiňoval. Azbest představuje zdravotní riziko při zpracování a obrábění materiálu, kdy se z něj uvolňuje jemný prach. Tento jemný prach je následně vdechnut a usazuje se v plicích, kde následně může způsobit rakovinu. Z tohoto důvodu bylo od používání azbestu opuštěno a je postupně nahrazován materiály, které nejsou zdraví člověka škodlivé. Hlavnímu nebezpečnému prvku, azbestovému prachu, můžeme předejít zvlhčením. Tato nebezpečná látka se z azbestu uvolňuje při tepelném zatížení. Další nebezpečí azbestu vězí v uvolňování azbestových vláken. Při delším působení azbestových vláken na organismus člověka dochází k vyvolání zhoubných bujení ve vnitřních orgánech člověka. [2]

Dalším nebezpečným faktorem je křemenný prach, který vzniká např. při řezání křemenných monokrystalů. Tomuto nebezpečnému faktoru můžeme předejít řezáním za mokra a pracoviště musejí být důkladně odsávána. Při dlouhém působení na lidský organismus vyvolává křemenný prach u člověka silikózu plic. [2]

Nebezpečí pro člověka představuje výroba skla. Při výrobě skla, jeho řezání, se uvolňuje tzv., skelný prach. Sklený prach se následně dostává do pokožky, trávicího traktu a dýchací soustavy a tím způsobuje zdravotní komplikace jako je třeba dušení a špatné dýchání. [2]

Keramika je vůči ostatním pevným anorganickým materiálům zdraví nejméně škodlivá. Její jediný škodlivý faktor je prach, který vzniká při jejím broušení. Keramika jako škodlivá látka je brána ve formě beryliové keramiky. Berylium je totiž jedna z nejtoxičtějších látek s akutními i chronickými riziky. Z tohoto důvodu není tudíž doporučeno tuto keramiku brousit. [2]

3 Technologie výroby skla a keramiky

Celkový proces výroby je velmi složitý a skládá se z několika technologických kroků. Hlavní kroky výroby jsou popsány jsou s ohledem na zaměření této práce v následujícím textu. Informace týkající se praktického příkladu výroby keramiky byly získány v průběhu exkurze v pobočce firmy LASSELSBERGER, s.r.o. v Chlumčanech, kde jsem byl proveden po celé výrobní lince panem Ing. Pavlem Vernerem. Fotografická dokumentace pořízená v rámci exkurze je uvedena v Příloze.

3.1 Technologie výroby keramiky

Výroba keramiky je časově náročným procesem, který nelze vzhledem k snaze dosáhnout co nejlepších materiálových vlastností uspěchat. Je třeba zajistit, aby nedošlo např. k popraskání keramiky při velkých změnách teploty. Ve výrobním závodě v Chlumčanech se vyrábí keramika jako obkladový materiál a podlahová krytina (dlaždice). Nevyrábí se zde tedy keramika určená pro aplikaci v elektrotechnice. Keramiku pro elektrotechnické účely vyrábí např., firma QuickCool se sídlem ve Švédsku. [11]

3.1.1 Suroviny

Hlavní surovinou pro výrobu keramiky jsou tzv., plastické suroviny a dále suroviny neplastické. Hlavním pro výrobu obkladové a dlaždicové keramiky je plavený kaolín, který je složkou plastickou. Velká ložiska kaolinu jsou jak v Chlumčanech, tak Horní Bříže a Kaznějově kde se navíc nachází velká kaolínka. Z tohoto pohledu je tedy Plzeňský kraj je lokalitou s výskytem významných nalezišť keramických surovin, které jsou potřebné k následnému vytvoření keramiky. [4]

Plastické suroviny

Mezi plastické suroviny pro výrobu keramiky, jak jsem již zmiňoval, patří plavený kaolín a jíly. Tyto suroviny, jak už je patrné z názvu, dodávají plasticitu a schopnost tvarování.

Plavené kaoliny jsou charakteristické svou žáruvzdornou vlastností, která se pohybuje až okolo 1780 °C [4]. Kaolín se těží za pomoci povrchových rypadel a jeho výsledný produkt se musí ještě před zpracováním upravit. Tento krok je nutný z důvodu obsahu

křemíku slídy a nerozloženého živce. Existuje několik druhů kaolinů, které jsou rozdělovány podle procentuální složky kaolinitu, křemíku a slídového materiálu. V oblasti elektrotechniky se využívá značka Sedlec Ia, Premier a T79. Tyto názvy jsou obchodními značkami a jsou využívány pro výrobu elektrotechnické keramiky. Například Sedlec Ia je vyráběn v České republice a jeho výhodou je až 90% obsah v plaveném kaolinu. Výrobu tohoto kaolinu obstarává firma Sedlecký kaolin a.s. Tyto druhy vykazují až 90 % objemu kaolinitu, 2 % křemíku a zbytek tvoří slídové materiály. Pro výrobu keramiky existuje několik druhů jíílů, které se rozlišují dle požadovaného složení a následného využití keramiky. [4,6,12]

Neplastické suroviny

Druhou neodlučitelnou částí jsou suroviny neplastické, které ovlivňují vlastnosti keramiky v závislosti na svém obsahu ve výsledné směsi. Při běžné teplotě tyto suroviny ovlivňují tvarovací vlhkost a při sušení a následném výpalu také snížení smrštění keramiky. Při výpalu tyto suroviny ovlivňují mechanické vlastnosti keramiky, mezi které patří smrštění, pórovitost a rychlost slinování. P procesu výpalu pak ovlivňují elektrické a tepelné vlastnosti keramiky. [4]

Neplastické suroviny se následně rozdělují na dvě části a to na ostřiva a na taviva.

Ostřiva se používají za účelem snížení smrštění při sušení a výpalu. Ostřiva zároveň způsobují snížení plasticity. Kdyby tomu tak nebylo došlo by k mechanickému poškození. Mezi ostřiva se primárně řadí křemen a korund. V Chlumčanech je jako ostřivo používán křemičitý písek společně s pegrafem, což je zbylý odpad z kaolínu. [4]

Jako tavivo jsou při výrobě použity živce sodno draselné. Při tepelném zpracování se vytvoří tavenina, alkalický živec. Tavenina je používána s ohledem na výpal živce, kdy se tento proces díky jejímu obsahu urychluje. Jako tavivo lze použít i dolomit v kombinaci se živcem. Tato kombinace má za následek snížení tavicí teploty a působí jako katalyzátor tavení. [4]

3.1.2 Příprava směsí

Příprava směsí je specifická pro každý druh keramiky, který je následně zpracováván. Příprava jako taková je založena na úpravě a homogenizaci výchozích složek k získání

směsí s potřebnými výslednými vlastnostmi a vhodné konzistence keramiky. K homogenizaci a mletí směsí dochází v diskontinuálních, nebo kontinuálních mlýnech. Kontinuální mlýny zpracují okolo 5t/hod. [4]

Mlýn si můžeme představit jako velký otáčivý buben, který je vyzděn keramickou vyzdívkou, nebo otěruvzdornou pryží. V mlýnu jsou také přítomny tzv., mlecí tělesa, díky kterým dochází za míchání a otáčení bubnu k semletí směsi. Mlecí tělesa jsou keramické koule, nebo pazourky. [4]

Zaplnění těchto mlýnů je vždy okolo 50 % jejich vnitřní velikosti. Nejužívanějším způsobem přípravy keramické směsi je mletí v bubnovém mlýnu na tzv., mokré mletí. Směs, která je v bubnu mletá, se nachází ve vodní suspenzi. [4]

Mokrým mletím v mlýnech se dosahuje velké jemnosti meliva a to v řádech jednotek mikrometrů. Při následné výpusti umleté suspenze je zapotřebí sít, filtrů k odstranění přebytečných, nedomletých částic ve směsi a jejich následné odmagnetování. [4]

Dále poté rozlišujeme suché a mokré mletí v bubnovém mlýně.

Mokré mletí je prováděno v mlýně, který je rozdělen na několik samostatných sekcí. Neplastické suroviny se do mlýna přivádějí přímo, zatímco plastické jíly ve formě suspenze. Odstranění nevhodných částic, které tato suspenze může obsahovat, se provádí prolitím přes vhodná síta. Následná umletá suspenz má teplotu okolo 75 °C [4] a tedy nízkou viskozitu k tomu aby mohla protéct potřebnými síty. Díky tomuto druhu mletí dosahujeme vysoké homogenity směsi. [4]

Následně dochází k odvodňování suspenzí, která je přítomna mletí směsí v mlýnech. Existují dva druhy odvodnění vodní suspenze a to kaolisování a rozprašovací sušení. Na kaolisování se můžeme dívat jako na filtraci přes tzv., filtrační tkaninu za působení tlaku. Tlak dosahuje hodnot od 0,5 ÷ 1,5 MPa. [4] Rozprašovací sušení je rychlé odvodnění jemně rozprašovaných kapek suspenze v proudu teplého sušícího vzduchu. Suspenze je rozprašována v sušící věži a sušící vzduch dosahuje velmi vysokých teplot 500 ÷ 800°C. [4]

3.1.3 Tvarování

Tvarování keramiky je rozděleno na tři způsoby a to z hlediska konzistence keramické směsi. Každá tato směs je použita dle velikosti procentuálního obsahu vody ve směsi. Prvním způsobem je lití ze suspenze, kdy je směs pod tlakem lita do pórovitých sádrových forem. Druhý způsob se nazývá plastické tvarování a třetí lisování. V Chlumčanech je prováděn třetí způsob a to lisování. Výlisek totiž obsahuje jílové plastické složky a je ovlhčen cca 5 % obsah vody, což značí jeho malou pevnost, a tudíž putuje do sušárny, kde panují teploty okolo 150 °C. [4] Po svém následném vysušení dosahuje poměrně vysoké pevnosti 2 ÷ 3 MPa. Pro lisování jsou použity ocelové formy. [4]

3.1.4 Sušení keramiky

Sušení je velmi nákladným procesem výroby. Při jeho realizaci je možné vynaložení až 30 % veškeré energie, která je potřebná ke zhotovení. Jelikož výrobky stále obsahují veliké množství vody, jsou vlhké a s obsahem sušiny, je tento proces nevyhnutelný. Je to obecně fyzikální proces se pomocí působení tepla snižuje obsah vlhkosti materiálu, aniž by se měnilo chemické složení. Sušení keramiky probíhá celkem ve 3 stádiích. Prohřev tělesa je částí první a v tomto stádiu se povrch ohřívá rychleji než vnitřek tělesa. Postupně roste rychlost sušení a následně klesá vlhkost materiálu. Na řadu přichází konstantní sušení, kdy se prolíná volná vlhkost z vnitřku tělesa až na jeho povrch. Tato část sušení je bodem nejdůležitějším, jelikož se vyvolávají objemové změny, které mají za následek vyvolání vnitřního napětí, které může vést k deformaci výrobku. Teplota tělesa je v tomto bodě konstantní a klesá množství vody, následné přiblížení částic a smrštění. Poslední fází je klesající rychlost sušení kdy se zvyšuje teplota tělesa a vlhkost ustupuje do vnitřku tělesa. Při dosažení rovnovážné vlhkosti je sušení zastaveno. [4,5]

Při bližším pohledu na proces sušení můžeme narazit na speciální variace sušení. Jednou z těchto variací je dielektrické sušení. Při tomto sušení vzniká teplo v důsledku tření dipólů vody v keramickém materiálu pohybujícím se ve střídavém elektrickém poli o frekvenci v rozmezí 10 ÷ 60 Hz.[4] Toto sušení je velmi rychlé, jelikož uvnitř tělesa vzniká pára, která odvádí vlhkost pryč. [4,5]

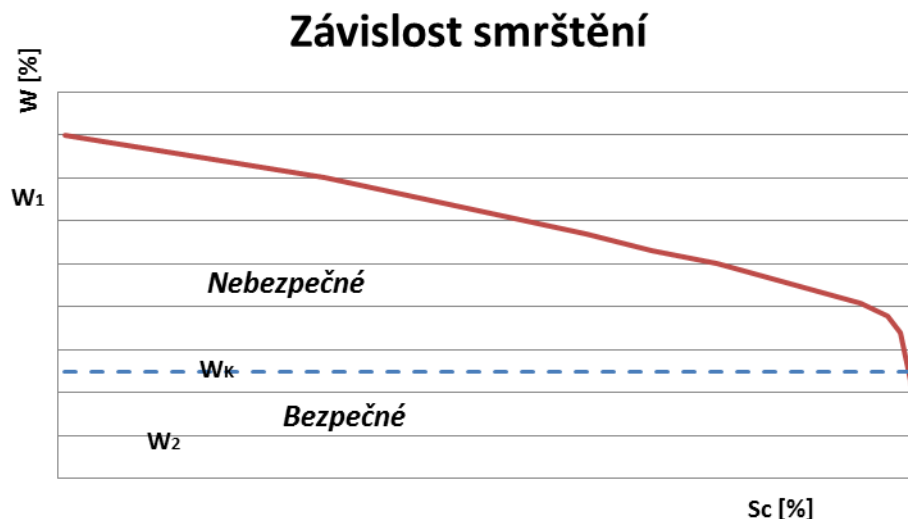
Dalším druhem je sušení elektrodporové, které je využíváno při výrobě elektrotechnického porcelánu. Toto sušení probíhá za průchodu střídavého elektrického proudu, který způsobí ohřev materiálu. [4,5]

Existují dva hlavní typy sušáren a to komorové, nebo kontinuální tunelové pece, které se využívají pro velkou výrobu. Sušení keramiky trvá zhruba 15 ÷ 30 minut. [4,5]



Graf 3: Rozdělení etap, převzato z [5]

V bodě I, kdy je rychlost odpařování konstantní voda ještě zcela vyplňuje prostor mezi pevnými částicemi. Při jejím poklesu se částice přibližují a nastává smrštění. Postupně však obsah vody klesá a částice se bodově, nebo plošně dotýkají. Rychlost vypařování v tomto okamžiku začíná klesat, jelikož se voda stahuje dovnitř pórů (bod II). V posledním cyklu voda zůstává pouze na povrchu pevných částic ve formě tenkého filmu. Vypařování dále klesá. [4,5]



Graf 4: Bigotova křivka ukazující závislost smrštění tělesa sušením S_s (%) na vlhkosti sušeného materiálu W (%), převzato z [4]

3.1.5 Výpal

Vypalování keramiky probíhá za velmi vysokých teplot, až nad 1000 °C . [4] Při výpalu dostává jednotlivá keramika, v závislosti na svém složení, své specifické vlastnosti. Zvýšená teplota způsobuje v materiálu zvýšený pohyb atomů a dalších stavebních látek, difúzi a chemickou reakci v pevné fázi. [4,5]

Při tomto procesu nastává slinování, kdy se keramika zpevní a zhutní. Zpevnění si můžeme představit jako srůst zrn pevné fáze a zhutnění jako snížení pórů keramiky. Keramika, jak je psáno výše, se zahřívá nad vysokou teplotu, tato teplota však musí být nižší než je její samotná teplota tání. Při slinování dojde ke spojení, splnutí práškových částic keramiky. [4,5]

Tabulka 2 : Procesy při výpalu keramické směsi ve fázi ohřevu, převzato z [4]

Proces	Teplotní úsek Δt (°C)
vypařování fyzikálně vázané vody	< 300
dehydroxidace jílových materiálů	450 ÷ 700
spalování organických příměsí a uhlíku usazeného ve střepu	300 ÷ 1040
průběh vratných a nevratných modifikačních přeměn, rozklad síranů, uhličitanů, oxidů a dalších příměsí	400 ÷ 1000
reakce složek v pevném stavu	500 ÷ 1050
tvorba skelné fáze	> 900
nukleace a krystalizace nových fází	> 1000
stínování některých fází v tavenině	> 1100
rozpuštění některých fází v tavenině	> 1100

3.1.6 Optimalizace výpalu

Jak je psáno v předchozím odstavci, keramika se vypaluje za vysoké teploty. Tato teplota však musí být optimální, aby nedošlo k porušení celistvosti, tvaru keramiky a doba výpalu trvala co nejkratší dobu. Při výpalu je nutné stanovit limitní rychlosti, které představují hranici, při jejímž překročení by došlo k trvalé deformaci materiálu. Proces se rozděluje na čtyři následující základní úseky:

- 1) úsek ohřevu kdy se materiál chová jako křehký,
- 2) vykazování nevratné deformace (dosáhnutí optimální teploty),
- 3) úsek kdy se materiál chladí a zároveň se ještě nevratně deformuje,
- 4) úsek, ve kterém se materiál stává opět křehký. [5]

3.1.7 Povrchové úpravy

K povrchovým úpravám může dojít za pomoci nanášení hutných vrstev, nebo vrstev sklených, které jsou známy jako glazury. Glazury jsou tenké skelné vrstvy na povrchu a teplota tavení glazur je závislá na teplotě slinutí keramiky. Glazura je důležitou technickou pomůckou keramiky, neboť uzavírá zbylou otevřenou pórovitost střepu a oproti neglazovanému tělesu zvyšuje mechanickou pevnost. Zároveň zlepšuje elektrické

vlastnosti keramiky např., její vodivost, nebo odpor. Glazura je nehomogenní a má výborné mechanické, chemické i elektrické vlastnosti. Existuje několik způsobů nanášení glazury. Chlumčany používají glazování airlet při tlaku 5 ÷ 6 Bar. [5]

3.2 Technologie výroby skla

Jak jsme si již popsali v předchozích kapitolách, sklo je společně s keramikou dobrý izolační materiál a řadí se mezi amorfnní materiály. Hlavními druhy skel jsou skla oxidová a neoxidová. Jak už název napovídá, skla jsou tvořena oxidy. Mezi sklotvorné oxidy patří například čistý křemičitý písek, oxid křemičitý (SiO_2). Tyto oxidy vytvářejí nepravidelnou strukturu skla. Oxid hlinitý (Al_2O_3) je oxidem podporujícím tvorbu skla.

Vlákna z binární skloviny $\text{Al}_2\text{O} - \text{SiO}_2$ jsou využívána jako dobrý vysokoteplotní izolant, až do 1450 °C. [5] Tyto vlákna obsahují 50 ÷ 75 % Al_2O_3 . Tento typ lze tedy využít jako náplň filtračních zařízení. [5,6]

V dalších bodech se budu snažit popsat výrobu skla.

3.2.1 Suroviny

Pro přípravu, výrobu skla se používá celá řada jak přírodních, tak syntetických surovin. Tyto suroviny musejí splňovat specifické požadavky, týkající se chemické čistoty a zrnitosti. Výsledné suroviny se dokonale mísí a tímto způsobem vznikne sklářský kmen. Sklářský kmen se skládá ze sklotvorných oxidů, látek podporujících výrobu skla tak i modifikátorů. [5]

Mezi modifikátory můžeme pro zmínku zařadit oxid sodný, draselný. Modifikátory upravují strukturu skla. Další látky můžeme připustit barviva a také urychlovače tavení.

3.2.2 Tavení

Sklářský kmen je heterogenní vícesložková soustava. Její chování je díky její různorodosti chemického složení, při ohřevu těžké popsat. Při tavení skla dochází k reakcím. První reakcí je rozklad některých uhličitánů. Pokud použijeme uhličitán vápenatý (CaCO_3) se začíná pomalu rozkládat od teploty pohybující se přes 600 °C a úplný, spontánní rozklad přichází při teplotě 900 °C. [5]

Druhou reakcí jsou chemické reakce mezi kyselými a bazickými složkami. Tyto reakce nastávají už za pevného uskupení, stavu. Tyto reakce probíhají v době, kdy je sklářský kmen rychle ohříván na tavnou teplotu. Poté nastává rozhodující etapa tavení. V této rozhodující etapě se rozpouštějí zbylé pevné látky, které jsou stále v tavenině. Proto předcházející chemické reakce nemají rozhodující vliv na čas, který je potřebný k utavení skla. [5]

Avšak minoritní složky, které jsou záměrně přidávány do sklářského kmene, zasluhují pozornost větší. Důvodem této pozornosti je fakt, že tyto složky slouží jako urychlovače tavení. [5]

Jako minoritní složka je často používán přídavek síran sodný (Na_2SO_4). Tento přídavek urychluje jak tavení, tak čření. Dalšími minoritními složkami jsou polyvalentní oxidy, které se používají jako barvicí látky. [5]

O celkové době tavení rozhodují procesy, které probíhají za vysokých teplot v tavenině. Za těchto teplot se rozpouštějí zbylá zrnka písku, nastává homogenizace taveniny. Rozpouštění zrn křemenného písku je však pomalé. V reálu je díky složitému charakteru proudění a působením účinků plynů uvolňovaných z povrchu zrn křemenného písku předpokládat lineární závislost času rozpouštění na velikosti těchto zrn. Celkový čas potřebný k roztavení je tedy závislý na rozpouštění těch největších zrn křemenného písku. Z tohoto důvodu se přidávají tzv., urychlovače tavení, mezi něž patří fluoridy, Na_2SO_4 apod. [5]

Vzniklou taveninu vzápětí musíme zbavit bublin plynů a dokonale ji homogenizovat. Pro odstranění plynných produktů vzniklých z rozkladných reakcí se používají čeřiva. Průběh čření je vzhledem na vysokou viskozitu taveniny pomalý a proto se používají čeřicí látky mezi něž patří např. oxid arsenitý (As_2O_3), Na_2SO_4 . Čeřiva jsou však přidávána v malém množství. [5]

Nepříznivým vlivem na homogenizaci taveniny má vypařování těkavých složek, alkalických kovů, z taveniny. Tímto vypařováním vznikají na povrchu koncentrační rozdíly. Tento jev může mít za následek poškození výrobku a následný vznik nekvalitního materiálu, látky. [5]

3.2.3 Pece

V průmyslové výrobě je sklo taveno ve sklářských pecích rozdělovaných na tři typy:

a) pánvové

Pro tyto pece je specifický periodický provoz a slouží pro výrobu menšího množství skel, která si vyžadují speciální složení. Jedná se o skla barevná a také pro skla používaná v elektronice.

b) vanové

Provoz na vanových pecích je kontinuální a mají lepší energetickou účinnost a vysoký měrný výkon až 4 t/m^2 za den.

c) elektricky speciální konstrukce

Oproti vanovým pecím se vyznačují menším výkonem, ale větší tepelnou účinností $60 \div 80 \%$. Tyto pece můžeme celkem snadno regulovat. [5]

3.2.4 Zpracování utavené skloviny

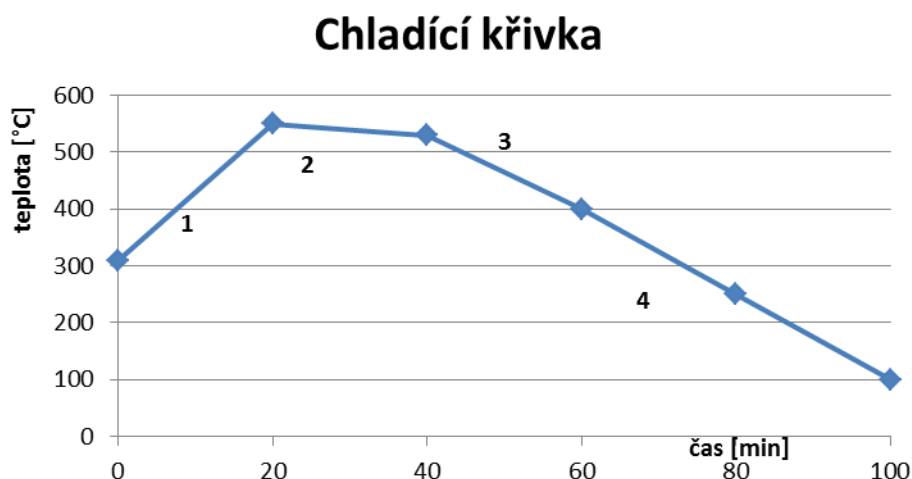
Sklovina, homogenní tavenina, je specifická svou velkou variabilitou viskozity v závislosti na chemickém složení. Díky této vlastnosti je možné sklovinu dále zpracovávat, tedy přivést jí do konečného, potřebného tvaru. Pro následné zpracování je využíváno několika technologických postupů, které jsou využívány při tvarování. Jedná se o tažení, lití, lisování atd. Pokud má výrobek tvar, který je žádoucí, díky ohlazení ztuhne a zpevní se. Pokud je však výrobek ochlazován nestejně, dochází ke vzniku velkého napětí. Při neodstranění tohoto napětí může dojít k následné destrukci, poškození výrobku. [5]

3.2.5 Chlazení

Proto, aby výrobek nebyl už při ochlazování, nebo následném používání poškozen, je používán zvláštní teplotní režim chlazení. Chlazení je tedy nutné provádět tak aby nastala relaxace trvalého napětí vzniklého po vytvarování a zpevnění. Druhým bodem je, aby přechodné napětí, které vzniká, nepřekročilo mez v pevnosti skla v tahu. Chladicí postup tyto požadavky splňuje a je složen z několika časových intervalů. Prvním intervalem je

vyhřátí na maximální chladicí teplotu následované udržováním skla na této hodnotě po dobu, která je nezbytně nutná k odstranění trvalého napětí. Poté se sklo pomalu ochlazuje s ohledem na další nevzniknutí trvalého napětí až po rychlejší ochlazování směřujícího k normální teplotě. [5]

Horní, tedy maximální, teplota je zvolena tak aby v krátké době nastala relaxace trvalého napětí. Správně vychlazený výrobek poté nesmí mít vnitřní napětí vyšší než 3,5 MPa.[5] Pokud je trvalé napětí vhodně rozložené, sklo získává větší pevnost. Této vlastnosti lze docílit tzv., tvrzením skla. Povrchová vrstva se prudce ochladí a vytvoří se tlakové napětí. [5]



Graf 5: Chlazení, převzato z [5]

4 Aplikace elektrotechnických materiálů na bázi keramiky a skla

V předešlých kapitolách jsme se blíže seznamovali s anorganickými materiály, mezi které patří jak sklo, tak keramika, a jejich následnou výrobou. Z předešlých kapitol je patrné, že keramika a sklo jsou díky svým specifickým vlastnostem dobrými izolanty. Tyto materiály jsou dále používány v elektrotechnice, ale také jako konstrukční materiály. V dalších kapitolách si rozebereme, kde se tyto dva materiály mohou v elektrotechnice použít.

4.1 Aplikace keramiky

Jako izolant na bázi keramiky se používá elektrotechnický porcelán včetně korundového porcelánu. Tyto materiály mají nízkou relativní permitivitu s poměrně vysokými dielektrickými ztrátami $\tan \delta$. Při výrobě těchto izolantů není použit jako tavivo živec, ale směs oxidů žiravých zemin oxid vápenatý (CaO), oxid hořečnatý (MgO). [4,5]

Keramika se dále využívá jako dielektrikum pro kondenzátory. Tato skupina keramiky se oproti předchozí vyznačuje vyšší relativní permitivitou. Keramická dielektrika pro kondenzátory se s ohledem na svou polarizaci rozdělují do třech typů. [4,5]

4.1.1 Kondenzátory typu 1

Do kondenzátorů tohoto typu jsou použita keramická dielektrika, která mají poměrně nízkou relativní permitivitu $\varepsilon_r = 12 \div 300$. [4] Tato permitivita je nezávislá na napětí a je závislá na teplotě. Jedná se tedy o lineární dielektrika s nízkými dielektrickými ztrátami. Důležitým údajem těchto kondenzátorů je údaj o teplotní kapacitě kondenzátoru. Tyto typy se používají do tepelně kompenzovaných obvodů. [4]

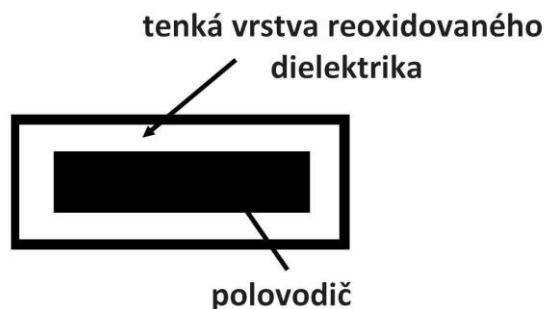
Keramiky používané do těchto obvodů se jmenují různě např., stabilit K, rutilit oxid titaničitý (TiO₂) apod. Tyto materiály mají na základě svého specifického složení také specifické vlastnosti. Jedná se o vnitřní rezistivitu, relativní permitivitu, ztrátový činitel apod. [4]

4.1.2 Kondenzátory typu 2

Tyto kondenzátory obsahují dielektrikum, které má feroelektrické vlastnosti. Mají výrazně vyšší relativní permitivitu než kondenzátory typu 1 a to v řádech tisíců a s nelineární teplotní závislostí. Až do Curieovy teploty vykazují tato dielektrika feroelektrické vlastnosti. Jelikož mají tyto kondenzátory vysoké dielektrické ztráty je jejich využívání v kondenzátorech, které mají vysokou kapacitu a nemají vysoké nároky na dielektrické ztráty. Do tohoto typu tedy patří blokovací kondenzátory, napěťově a teplotně závislé kondenzátory. Tato dielektrika nesou název Permittit společně s číselným označením a jejich specifické vlastnosti jsou Curieova teplota, relativní permitivita a ztrátový činitel. [4]

4.1.3 Kondenzátory typu 3

Posledním typem jsou kondenzátory, které mají výrazně vyšší kapacitu než kondenzátory typu 2. Tohoto jevu dosahují zvýšením zdánlivé permitivity. Dielektrikum je tvořeno sloučeninou, která má feroelektrické vlastnosti s vnitřní rezistivitou např., oxid titaničito-barnatý. V případě těchto kondenzátorů se využívá nestability tohoto oxidu v redukční atmosféře, to vede ke vzniku sloučeniny s polovodičovými vlastnostmi. V tomto případě klesá její vnitřní rezistivita. Po dalším výpalu dielektrika dochází k oxidaci povrchových vrstev a tím vzniká dielektrikum s tenkou dielektrickou vrstvou a polovodičovým jádrem. Permitivita je stále velmi vysoká a díky tomu dosáhneme kondenzátorů s velmi vysokou kapacitou, ale nízkou elektrickou pevností. Z tohoto důvodu jsou používány do obvodů s malým napětím. [4]



Obr. 3: Znárodnění kondenzátoru typu 3, převzato z [4]

4.1.4 Keramika v mikroelektronice

Na elektrické obvody, na které jsou kladeny vysoké požadavky na odolnost klimatickým změnám a spolehlivost, se keramika používá při jejich pouzdření. Tato pouzdra tvoří 10 ÷ 15 % [4] všech pouzder čipů, které v mikroelektronice vykonávají náročné aplikace. Tyto materiály si můžeme představit jako slinuté, tenké a mechanicky pevné podložky nebo laminované struktury z několika fólií z keramických směsí. tato fólie je připravována litím suspenze na pás. Tyto směsi obsahují vysoké procento oxidu křemičitého a dalších oxidů, namátkou MgO, CaO které s oxidem hlinitým vytvoří za dobu výpalu skelnou fázi. Vypalování fólií probíhá za velmi vysokých teplot. [4]

4.1.5 Karbid boru

Karbid boru se řadí do skupiny neoxidové keramiky. Vyznačuje se žáruvzdorností a vysokou tvrdostí. Jeho výroba je uskutečňována v obloukové peci a to rozkladem B_2O_3 . Karbid boru je důležitým materiálem ze kterého se vyrábějí kontrolní tyče a ochranné štíty v jaderných reaktorech. [5]

4.2 Aplikace skla

Jak je popsáno v předešlých kapitolách, skla rozdělujeme na oxidová, skla křemičitá, a neoxidová. Podobně jako keramika mají skla své specifické vlastnosti, díky kterým jsou poté specificky používána. [5]

4.2.1 Nízkoztrátová skla

Mezi nízkoztrátová skla lze zařadit skla křemičitá a boritokřemičitá. Sklo křemičité je specifické svou téměř dokonalou čistotou SiO_2 . Specifickou vlastností tohoto skla je odolnost proti prudkým změnám teplot a žáruvzdornost do 1150 °C.[5] Jeho relativní permitivita je frekvenčně nezávislá a vyznačuje se větší vnitřní rezistivitou a dobrou elektrickou pevností. Využití křemenného skla je u výroby integrovaných obvodů a jako kostry vysokofrekvenčních cívek. Boritokřemičité sklo $SiO_2 + B_2O_3$ je oproti křemennému sklu levnější. Toto sklo má uplatnění jako elektrický izolátor v obvodech, kde panují vysoká napětí. [5]

4.2.2 Skleněná vlákna

V dnešní době se rozdělují skleněná vlákna na dva druhy. První skupinou jsou vlákna, která se využívají pro tepelné a elektrické izolace. Tyto vlákna se využívají jako výplň filtračních zařízení. Tento typ se vyrábí z tzv., E skla, které je složeno z $\text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{CaO} - \text{MgO}$. Je to bezalkalická sklovina, která může být tavena při vysokých teplotách. Výroba vláken je dvoustupňová, nebo jednostupňová. Ve dvoustupňovém případě se vytvářejí kuličky o průměrech desítek milimetrů, ty se dále dávají do platinových píček z nichž se táhne skleněné vlákno. U jednostupňové se kuličky netvarují a sklovina je vedena přímo do tvarovacího zařízení. E sklo je při výrobě dominantní, může se však použít i vlákno jiného chemického složení. Tato vlákna jsou poté využívána k izolaci. Žárovzdorná vlákna jsou vyráběna z binární skloviny oxid hlinitý $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$ s procentuálně vysokým obsahem Al_2O_3 . Tato vlákna se využívají jako teplotní izolace. [5]

Druhá skupina je tvořena vysoce čistými speciálními vlákny pro optické a optoelektronické účely. tato vlákna mají proti první skupině vyšší technologické nároky na svou výrobu. Tato vlákna jsou využívána pro lékařskou diagnostiku a také jako optické vlnovody. [5]

5 Chování elektroizolačních materiálů v elektrickém poli

5.1 Anorganické materiály jako izolanty

Izolantem je nazýván materiál, který můžeme použít ke vzájemnému odizolování. Izolant je prvkem pasivním a brání průchodu proudu mezi dvěma místy s rozdílným elektrickým potenciálem. Izolanty mají své specifické vlastnosti, díky kterým o nich můžeme mluvit jako o izolantech. Mezi tyto specifické vlastnosti patří co nejvyšší elektrická pevnost, relativní permitivita v řádech jednotek, vysoká rezistivita a co nejnižší dielektrické ztráty. Tyto vlastnosti jsou zároveň závislé na podmínkách, které panují při normálním provozu. Ideální izolační materiál nemá žádné volné nosiče, v reálu však v izolantu jsou i volné nosiče a tím dochází k dielektrickým ztrátám. [1,2]

Velmi důležitou vlastností izolantů je jejich elektrická pevnost E_p . Pokud vzroste napětí, které je přiloženo na izolant, nad určitou kritickou hodnotu dochází k rychlému, lavinovému nárůstu volných nosičů elektrického náboje se zvyšující se pohyblivostí. Tato příčina poté vede k průrazu, kdy elektrická vodivost nekontrolovaně vzroste a tím izolant ztrácí svou primární funkci. Napětí, které průraz způsobí, se nazývá napětí průrazné. Elektrická pevnost je díky tomuto napětí a tloušťce materiálu definována rovnicí 2

$$E_p = \frac{U_p}{d} \quad (2)$$

Elektrická pevnost závisí na velkém množství parametrů a podmínkách, při kterých je měřena. Jedná se o druh přiloženého napětí, teplota, vlhkost a další. [1,2]

Pevné izolanty vlivem průrazu ztrácí trvale svou izolační schopnost. Průraz způsobuje propálení vodivé cesty a tím dochází k trvalému poškození. Materiál poškozený průrazem vykazuje i optické, chemické vady. [1,2]

Průraz může být buď elektrochemický, či teplený a to na základě převládající degradační složky. [1,2]

Tepelné vlastnosti izolantů jsou jejich důležitou vlastností, jelikož při normální provozu dochází k celkovému oteplení stroje a tedy i izolačního systému. Tepelné vlastnosti jsou

vyjádřeny konstantami jako měrná tepelná kapacita, součinitel teplotní vodivosti apod. Vlivy rozdílných teplot mají za příčinu změnu struktury, optickou změnou a změnou mechanických vlastností. Izolanty řadíme do několika specifických tříd, které vyjadřují maximální teplotu, do které může být izolant vystaven. Díky těmto teplotním třídám má každý izolant vlastní tepelnou oblast, kde může být použit. [1,2]

V realitě se setkáváme častou záměnou pojmů izolant a dielektrikum. Dielektrikum, jak je psáno v následujícím odstavci, je materiál, který má schopnost polarizace a je to prvek aktivní. Ne každé dielektrikum je izolant, zatímco každý izolant je dielektrikem. Izolant je brán jako dielektrikum, které je upravené pro průmyslové aplikace, které mají zabránit průchodu proudu. [1,2]

Dielektrikum je látka, která má schopnost udělat vlastní elektrické pole a má vlastní polarizovatelnost. Dielektrika jsou, na rozdíl od izolantů, aktivní prvky, které využívají své specifické vlastnosti. Po vložení vnějšího elektrického pole vzniká v dielektriku vlastní elektrické pole a to díky polarizaci dielektrika. [1,2]

Dielektrikum je nadřazené izolantu, to tedy znamená, že každý izolant je dielektrikum, ale každé dielektrikum nemusí být nutně izolantem, viz obr 4. [1,2]



Obr. 4: Dielektrikum vs. izolant, převzato z [3]

5.2 Dielektrické ztráty

Nežádoucí jevy, jak už je z názvu patrné, ztráty, se v dielektriku začnou odehrávat při zatížení vnějším elektrickým polem. Primární jevem je přeměna elektrické energie na tepelnou. Tento jev působí na izolaci negativně, izolace je poškozována, a nazývají se dielektrické ztráty. Z tohoto hlediska se při konstrukci dbá na správná chladicí zařízení, která by neměla být opomenuta. [2,3]

Druhy dielektrických ztrát závisí na druhu látky a jejím složením, jsou tedy pro materiály, kterými se budeme zabývat, jednotlivě specifická. Ztráty závisí na chemickém složení, a jaký původ a druh nečistot materiál obsahuje. Podle tohoto složení, nečistot a poruch vnitřní stavby se může velikost jednotlivých ztrát lišit. Například keramické izolanty vykazují malé ztráty. [5]

5.3 Relativní permitivita

Relativní permitivita je bezrozměrná veličina, která charakterizuje chování izolantů v elektrickém poli a jejich schopnost polarizace. Její charakteristickou značkou je ε_r a je definována vztahem 3. [7]

$$\varepsilon = \varepsilon_r \cdot \varepsilon_0 \quad (3)$$

Kde ε je celková permitivita materiálu, ε_r relativní permitivita a ε_0 je permitivita vakua.

Navíc relativní permitivita izolačního materiálu závisí na frekvenci použitého elektrického pole a může být popsána jako složitá fyzikální veličina, kde imaginární část je spojena s dielektrickými ztrátami. Může být proto také vyjádřena vztahem 4. [7]

$$\varepsilon_r = \varepsilon_r' + j \cdot \varepsilon_r'' \quad (4)$$

Kde ε_r' představuje reálnou složku relativní permitivity a ε_r'' představuje imaginární složku relativní permitivity.

Na rozdíl od polarizovatelnosti je tato veličina měřitelná, což je její velkou devízou. Relativní permitivita může být definována také jako poměr kapacity kondenzátoru s uvažovaným dielektrikem a s vakuem. [1,3]

Relativní permitivitu lze rozdělit díky závislosti elektrické indukce na intenzitě elektrického pole. Pokud je relativní permitivita konstanta, tudíž není závislá na intenzitě jedná se o dielektrika lineární. Nelineární dielektrika jsou pak definovány závislostí relativní permitivity na intenzitě elektrického pole. Závislost elektrické indukce na intenzitě elektrického pole lze popsat rovnicí 5. [1,2]

$$\varepsilon_r(E) = \frac{1}{\varepsilon_0} \cdot \frac{dD}{dE} \quad (5)$$

Následná velikost dipólového momentu závisí na intenzitě elektrického pole a je taktéž vyjádřena rovnicí 6.

$$\vec{p}_i = \alpha \cdot \vec{E} \quad (6)$$

Kde \vec{p}_i je velikost dipólového momentu jednotlivých částic, \vec{E} je intenzita elektrického pole a α je polarizovatelnost (schopnost částic polarizace).

Polarizaci izolantu lze pak vyjádřit výslednou rovnicí 7.

$$\vec{P} = \varepsilon_0 \cdot (\varepsilon_r - 1) \cdot \vec{E}_i \quad (7)$$

Kde \vec{E}_i je vnitřní intenzitou působící na dipól.

5.4 Polarizace

Působením vnějšího elektrického pole dochází k přitahování iontů, jader atomů a elektronů k opačně nabitým elektrodám. Tomuto pohybu ale brání vzájemné vazebné síly a tepelný pohyb molekul. Přiložením vnějšího elektrického pole dochází k posunu nábojů v látce, které doprovází vznik dipólového momentu M . Tento stav popisujeme vektorem polarizace uvedeného v rovnici 8.

$$\vec{P} = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{M}}{\Delta V} \quad (8)$$

Kde \vec{P} je vektorem polarizace, $\Delta \vec{M}$ je dipólový moment objemového elementu, ΔV je objem elementu izolantu.

Polarizovatelnost α je buď elektronová, iontová nebo dipólová. Tato rozdělení můžeme určit díky mechanismu pohybu elektrického náboje, které je vyvoláno elektrickým polem. [1,2,3]

Podle povahy vazebných sil poté rozlišujeme dva druhy polarizace a to polarizaci pružnou, nepružnou. [1,2,3]

5.4.1 Pružná polarizace

Charakteristickým znamením této polarizace je rychlý posun částic. Rovnováha elektrických a vazebných sil udává rovnovážnou polohu částic. Mezi pružné polarizace řadíme deformační polarizaci a deformační iontovou, které nejsou závislé, s ohledem na velikost vazebných sil, na vnějších podmínkách. [1,3]

5.4.2 Nepružná polarizace

U nepružné deformace dochází k většímu posunutí nábojů a také delší dobou ustálení, než u polarizace pružné. Nepružná polarizace je také známá jako polarizace relaxační. Tato polarizace je silně závislá na teplotě, která se přímo podílí na pohyby nábojů. [1,3]

Polarizace je dějem, který nastává v dielektriku po jeho vložení do elektrického pole. O průběhu polarizace rozhoduje stavba a struktura materiálu, který je polarizován. Druhů polarizací je několik a jejich základním rozdělením je zda dojde k polarizování za působení elektrického pole, nebo nepůsobením. Já se budu s ohledem na zaměření práce a výběr materiálů zaměřovat na zpolarizování za působení elektrického pole, které se dělí dle druhu nosičů elektrického náboje a to na slabě vázané, nebo silně vázané nosiče. U silně vázaných nosičů náboje se jedná o tzv., deformační polarizace, kterými se zabývat nebudu. Relaxační polarizace se řadí mezi tu, která má nosiče elektrického náboje vázané slabě. [3,13,14]

Působením elektrického pole vzniká v dielektriku proces polarizace. V dielektriku, které je vloženo do vnějšího elektrického pole, se volné i vázané nosiče náboje začnou přitahovat k elektrodám, které jsou nabity opačně. Elektrické náboje se díky tomuto jevu posouvají a dochází k polarizaci. Když už je dielektrikum vloženo do elektrického pole nastává vzájemná interakce a na řadu přicházejí polarizační procesy. Pro pochopení a následné sledování těchto procesů se užívají dvě metody a to makroskopický přístup a mikroskopický přístup. [2,3]

5.5 Makroskopický náhled na dielektrikum

Dielektrikum je předpokládáno jako subjekt daných rozměrů, u něhož se hodnotí vnější projevy polarizačních procesů. U makroskopického přístupu je důležitá vzájemná interakce mezi okolím dielektrika a dielektrikem samotným. Na povrchu dielektrika

vznikají vázané elektrické náboje které vedou ke vzniku dipólového momentu, který je výsledkem celkové polarizace dielektrika, která je v makroskopickém přístupu nejdůležitější. [2,3]

Toto dielektrikum, které je již zpolarizované, je popsáno vzorečkem 6.

5.6 Mikroskopický náhled na dielektrikum

Přístupem mikroskopickým se pozorují změny ve struktuře dielektrika, tudíž opačný přístup než tomu je u makroskopického. Zabývá se tedy strukturou vnitřní a jeho výsledným poznatkem jsou znalosti o dění, které probíhá uvnitř dielektrika. Tyto děje se poté projevují, jako u makroskopického přístupu, navenek. Projevem tohoto přístupu polarizace je pak vznik nových dipólových momentů, nebo přemístění orientace stávajících. Nové dipólové momenty vznikají za působení elektrického pole, kdy těžiště, která původně splývala, jdou od sebe a zaujímají novou pozici oproti předchozí. Po ukončení působení elektrického pole dojde k jejich navrácení do původních pozic. [3]

5.7 Relaxační polarizace

Bez přítomnosti elektrického pole nedochází k polarizaci a oproti deformačním polarizacím je delší. Relaxační polarizace se rozděluje na relaxační polarizaci iontovou a dipólovou, které rozeberu v dalších bodech. V některých zdrojích je možné se setkat s jiným pojmenováním a to jako tepelná polarizace. Velký vliv na průběh polarizace totiž hraje teplota, pohyblivost dipólů je závislá na viskozitě subjektu. Díky tepelnému pohybu částice překonávají potenciálové bariéry. [3]

Po přiložení vnějšího elektrického pole se mění poměry uvnitř dielektrika. Polohy, ve kterých do té doby byly slabě vázané nosiče elektrického náboje, se rázem stávají energeticky nevýhodnými a naopak vznikají nové polohy, které jsou energeticky výhodnější. Nosiče elektrického náboje se tudíž do těchto poloh natácejí, dochází k relaxační polarizaci a vzniká dipólový moment. Avšak přechod na dielektrikum zpolarizované nenastává okamžitě po přiložení elektrického pole, ale až za nějakou dobu, která se jmenuje relaxační doba, jelikož nosiče elektrického náboje potřebují určitou dobu k zaujmutí nové pozice. Jakmile přestane elektrické pole působit, nosiče se vracejí do svých výchozích pozic tepelného pohybu. [3]

Relaxační doba je vyjádřena vztahem 9

$$\tau = \frac{1}{2 \cdot f_0} \cdot e^{\frac{W}{kT}} \quad (9)$$

Kdy W představuje velikost potenciálové bariéry [kJ/mol], k je Boltzmannova konstanta [J/K] a f_0 je vlastní frekvence změny polohy kolem rovnovážné polohy [s^{-1}]. [3]

5.7.1 Iontová relaxační polarizace

Iontová relaxační polarizace nastává, probíhá u pevných dielektrik. V objemu dielektrika musí být přítomny ionty příměsí nebo nečistot, které jsou slabě vázány k sousedním stavebním částím dielektrika, jinak by k této polarizaci nedošlo. Tato slabá vazba způsobuje velkou citlivost na vnější elektrické pole. Tato polarizace je frekvenčně a teplotně závislá a potřebuje čas ke svému ustálení. Pro matematický popis se využívá principu dvojité potenciální jámy. Předpoklad výchozího momentu je, že nosiče elektrického náboje obou polarit, které kmitají mezi polohami, mohou zaujmout dvě různé energeticky rovnocenné polohy. Pokud na látku nepůsobí žádné elektrické pole, obě energetické polohy jsou na stejné úrovni a díky tepelnému pohybu nosičů náboje, je potenciálová bariéra překonávána. Za tohoto stavu je přechod z jedné polohy do druhé stejně velký i v opačném pohybu. Tudíž platí, že $A \rightarrow B \sim B \rightarrow A$ a přechody jsou tedy stejně pravděpodobné. Pravděpodobnost tohoto přechodu je dána Boltzmannovým rozdělením uvedeným v rovnici 10.

$$P(A \rightarrow B) \approx P(B \rightarrow A) \approx e^{-\frac{W}{kT}} \quad (10)$$

Kdy W představuje velikost potenciálové bariéry [kJ/mol], k je Boltzmannova konstanta [J/K] a T je termodynamická teplota [K]. [3]

S rostoucí teplotou pravděpodobnost, že k přechodu dojde, roste a naopak klesá s rostoucí velikostí potenciální bariéry W . Na základě toho lze podle vzorce 11 určit pravděpodobný počet částic, které mezi polohami přejdou

$$n_z = \frac{n_0}{6} \cdot f_0 \cdot e^{-\frac{W}{kT}} \quad (11)$$

kde n_0 je počet slabě vázaných iontů v jednotce objemu [m^{-3}], ostatní veličiny jsou již definovány. Jak je tedy patrné, bez vnějšího elektrického pole jsou všechny přechody stejně pravděpodobné. [3]

Začne-li na dielektrikum působit vnější elektrické pole, dojde posunutí energetických úrovní a vznikají úrovně nové. Působením elektrického pole se začne měnit hloubka jam proti hodnotě bariéry W , která není ovlivněna polem. V novém bodě A' je poloha nižší a v bodě B' zase vyšší, oproti situaci kdy nepůsobilo vnější elektrické pole. Díky tomuto jevu se pravděpodobnost pohybu změní a je vyjádřena v rovnicích 12 a 13

$$P(A' \rightarrow B') = e^{-\frac{W-\Delta W}{kT}} \quad (12)$$

$$P(B' \rightarrow A') = e^{-\frac{W+\Delta W}{kT}} \quad (13)$$

Postupně poté dochází k nerovnoměrnému rozložení nosičů a vzniká dipólový moment. Tato polarizace je frekvenčně a teplotně závislá. [3]

5.7.2 Dipólová relaxační polarizace

Dipólová relaxační polarizace nastává u látek, kde jsou dipólové momenty slabě vázány, nebo nejsou vázány vůbec. Vlivem působení vnějšího elektrického pole se tedy natáčejí do směru, kterým působí siločáry pole. Je silně teplotně závislá, jelikož teplotní pohyb tomuto natáčení brání a lze se setkat s názvem tepelně orientační polarizace. Pokud na látku nepůsobí žádné vnější elektrické pole, je výsledný dipólový moment nulový. Jako v předchozím případě i zde se dá použít popis pomocí dvojité potenciální jámy. Aby se přešlo z jedné polohy do druhé, je nutné pootočení dipólu o 180° . Jako tomu bylo v předchozím případě, po přiložení vnějšího elektrického pole zaujmají dipóly nové, výhodnější pozice a dochází k zpolarizování látky. Při zpolarizování látky vzniká makroskopický dipól momentu. Postupným růstem teploty slábnou mezimolekulární síly, zmenšují se překážky a zvyšuje se energie pro tepelný chaotický pohyb. Z toho je patrné, že tepelný pohyb působí výrazný vliv a začne působit proti vlivu elektrického pole a polarizace slábne. [3]

6 Užití širokopásmové dielektrické spektroskopie

Pro měření dielektrických vlastností elektroizolačních materiálů je možné využít řadu diagnostických metod. Mezi nejkompexnější diagnostické metody v této oblasti měření patří širokopásmová dielektrická spektroskopie. Jedná se o nedestruktivní metodu pro hodnocení chování dielektrika v elektrickém poli v závislosti na frekvenci přiloženého napětí a teplotě okolí.

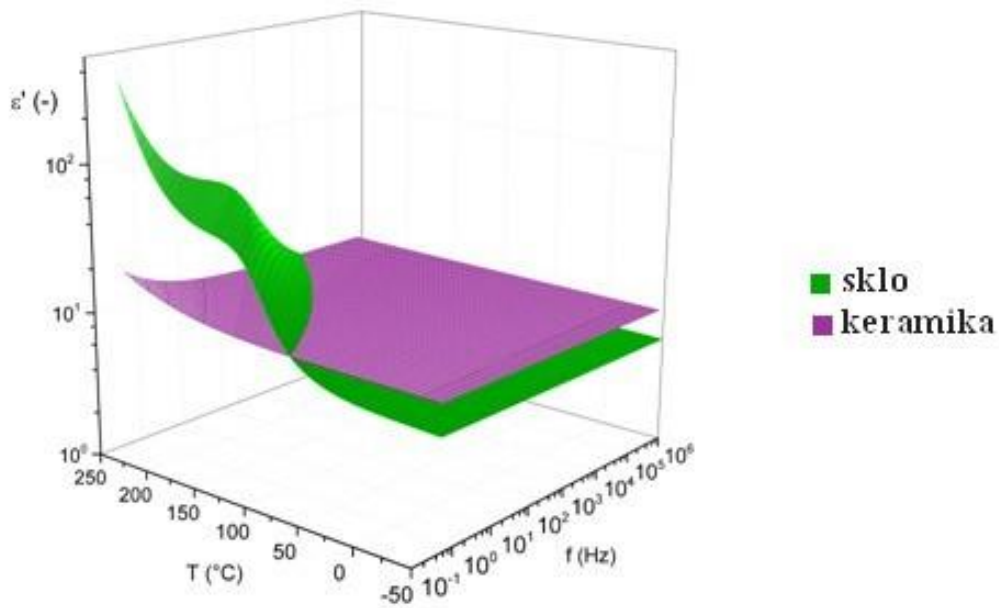
Pro měření byl použit přístroj Novocontrol Alpha-A s elektroodovým systémem ZGS. Měřený vzorek se vkládá mezi elektrody elektroodového systému a dochází tak k vytvoření deskového kondenzátoru. Elektroodový systém lze umístit do uzavřené komory, kde je možné regulovat teplotu. Vzhledem k připojení komory k Dewarově nádobě s tekutým dusíkem je možné měřený vzorek chladit na teplotu až přibližně $-160\text{ }^{\circ}\text{C}$. Vzorek je také možné zahřívat na teplotu až $400\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Pro měření byly využity pozlacené diskové elektrody o průměru 30 mm. Teplotní rozsah byl zvolen od teploty $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ do teploty $250\text{ }^{\circ}\text{C}$. Frekvence testovacího napětí se pohybovala v intervalu od 0,5 Hz do 1 MHz. Pro možnost hodnotit výsledky získané touto diagnostickou metodou byly zvoleny dva anorganické elektroizolační materiály, konkrétně amorfnní a polykrystalický materiál. Amorfnním materiálem je borosilikátové sklo a polykrystalický materiál představuje korundová keramika.

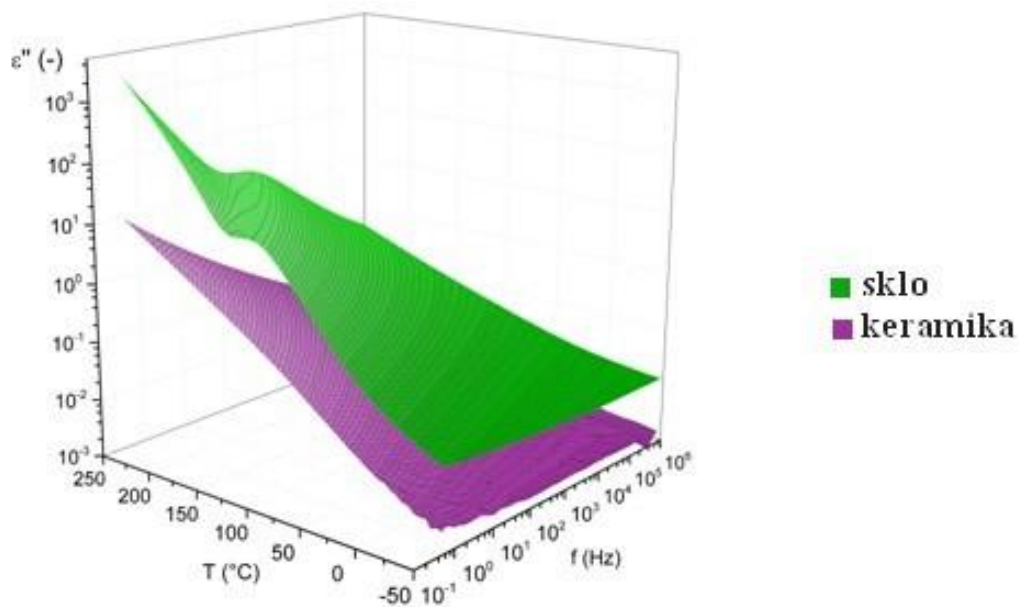
6.1 Měření

Výsledky měření BDS se dají interpretovat jako závislosti několika fyzikálních veličin, které jsou typické pro měření elektrických (dielektrických) vlastností. V první řadě lze uvádět závislosti naměřených impedancí a kapacit. Pro obecnější popis a možnost srovnání dielektrických vlastností s jinými materiály měřenými s rozdílnými rozměry a případně pro srovnání s literaturou lze využít interpretaci na základě relativní permitivity. Přesněji lze relativní permitivitu označit za komplexní frekvenčně a teplotně závislou relativní permitivitu a uvádět odděleně reálnou a imaginární část. Reálná část ε' souvisí s kapacitou měřeného vzorku a imaginární část ε'' popisuje charakter dielektrických ztrát. V rámci této práce byla zvolena právě interpretace výsledků pomocí permitivit, jejichž závislosti jsou pro měřené materiály zobrazeny na grafech 6 a 7. Místo záznamu ε'' se také často využívá záznam ztrátového činitele $\text{tg } \delta$.

Výsledky měření pomocí širokopásmové dielektrické spektroskopie jsou vyobrazeny na následujících grafech.



Graf 6: 3D zobrazení frekvenční a teplotní závislosti ϵ' skla a keramiky



Graf 7: 3D zobrazení frekvenční a teplotní závislosti ϵ'' skla a keramiky.

Měření bylo provedeno na vzorku skla o tloušťce 0,15 mm a na vzorku keramiky o tloušťce 0,66 mm.

Závěr

Hlavní náplní mé bakalářské práce bylo seznámení s pevnými anorganickými materiály a jejich elektroizolačními vlastnostmi. V práci je popsána technologie výroby keramiky, se kterou jsem měl možnost se setkat i v praxi a díky tomu tuto problematiku lépe pochopit. V práci je také zmíněna technologie výroby skla. Tyto dva anorganické materiály, sklo a keramika, můžeme považovat za velmi důležité a často využívané izolační materiály v elektrotechnice. Z tohoto důvodu byly využity zrovna tyto dva materiály k měření dielektrických vlastností pomocí širokopásmové dielektrické spektroskopie.

Výsledkem tohoto měření jsou grafy 6 a 7. Graf 6 ukazuje, že reálná složka relativní permitivity je vyšší u skla. Tato složka se u obou materiálů téměř nemění se změnou frekvence, avšak se zvyšující se teplotou tato složka u skla výrazně vzrostla. Hodnota reálné složky relativní permitivity skla byla po celou dobu, až přibližně do teploty 130 °C, nižší než hodnota keramiky. Poté vzrostla tak výrazně, že hodnota skla velice převyšovala hodnotu keramiky. Tato složka relativní permitivity ovlivňuje kapacitu materiálu. V druhém grafu lze vidět, že chování obou materiálů je téměř totožné, avšak keramika se pohybuje v nižších hodnotách než-li sklo. Tato hodnota představuje dielektrické ztráty materiálu. Lze tedy říci, že keramika má nižší dielektrické ztráty než-li sklo. Díky těmto poznatkům se poté můžeme lépe rozhodnout, který z materiálů použijeme jako izolant v potřebných situacích.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] MENTLÍK, Václav. *Elektrotechnické materiály*. Ediční středisko ZČU. ISBN 80 – 7082 – 227 – 9.
- [2] KUČEROVÁ, Eva. *Elektrotechnické materiály*. Západočeská univerzita v Plzni, 2002. ISBN 80 – 7082 – 940 – 0.
- [3] MENTLÍK, Václav. *Dielektrické prvky a systémy*. BEN – technická literatura, Praha 2006. ISBN 80 – 7300 – 189 – 6.
- [4] HANYKÝŘ, Vladimír. KUTZENDÖRFER, Jaroslav. *Technologie keramiky*. Silikátový svaz, 2008. ISBN 978 – 80 – 86821 – 48 – 1.
- [5] MATOUŠEK, Josef. *Anorganické nekovové materiály*. Praha 1992.
- [6] SHACKELFORD, James F. DOREMUS, Robert H. *Ceramic and glass materials: Structure, properties and processing*. New York: Springer, 2008, xii, ISBN 978 – 1- 4419 – 4460 – 3.
- [7] CARDARELLI, Françoise. *Materials handbook: A Concise Desktop Reference*. London: Springer, 2008. ISBN 978 – 184 – 6286 – 698.
- [8] Obrázek Muskovitu: Minerals - Muskovit $KAl_2[(OH)_2AlSi_3O_{10}]$ ze stránky [Http://www.cms.fu-berlin.de](http://www.cms.fu-berlin.de) [online]. [cit. 2017-03-10]. http://www.cms.fu-berlin.de/geo/fb/e-learning/petrograph/minerale/lesen/mi_muskovit_0/index.html?TOC=mi_muskovit_0%2Findex.html
- [9] Obrázek Flogopitu: Fotografie minerálů ze stránky [Http://www.rockhound.cz](http://www.rockhound.cz) [online]. [cit. 2017-03-13]. Dostupné z: <http://www.rockhound.cz/mineral.php?cislo=82>
- [10] Výroba slídového papíru: Slídové materiály ze stránky [Http://www.silent-czech.cz](http://www.silent-czech.cz) [online]. [cit. 2017-03-13]. Dostupné z: <http://www.silent-czech.cz/produkty/izolacni-materialy/slidove-materialy/>
- [11] Výrobce keramiky. [Http://www.quickcool.se/](http://www.quickcool.se/) [online]. [cit. 2017-03-20]. Dostupné z: <http://www.quickcool.se/>
- [12] Sedlec Ia. [Http://www.sedlecky-kaolin.cz](http://www.sedlecky-kaolin.cz) [online]. [cit. 2017-03-20]. Dostupné z: <http://www.sedlecky-kaolin.cz/cz/vyrobky-a-sluzby/kaolin-sedlec-ia.htm>
- [13] LIPTÁK J., SEDLÁČEK J. *Úvod do elektrotechniky materiálů*. Vyd.1. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2005. ISBN 80 – 01 – 03191 – 8.
- [14] ŠAVEL J. *Elektrotechnologie: materiály, technologie a výroba v elektronice a elektrotechnice*. 4.rozš. vyd. Praha: BEN – technická literatura, 2005. ISBN 80 – 7300 – 190 – X.

Příloha

Příloha A: Diskontinuální mlýn



Příloha B: Kontinuální mlýn



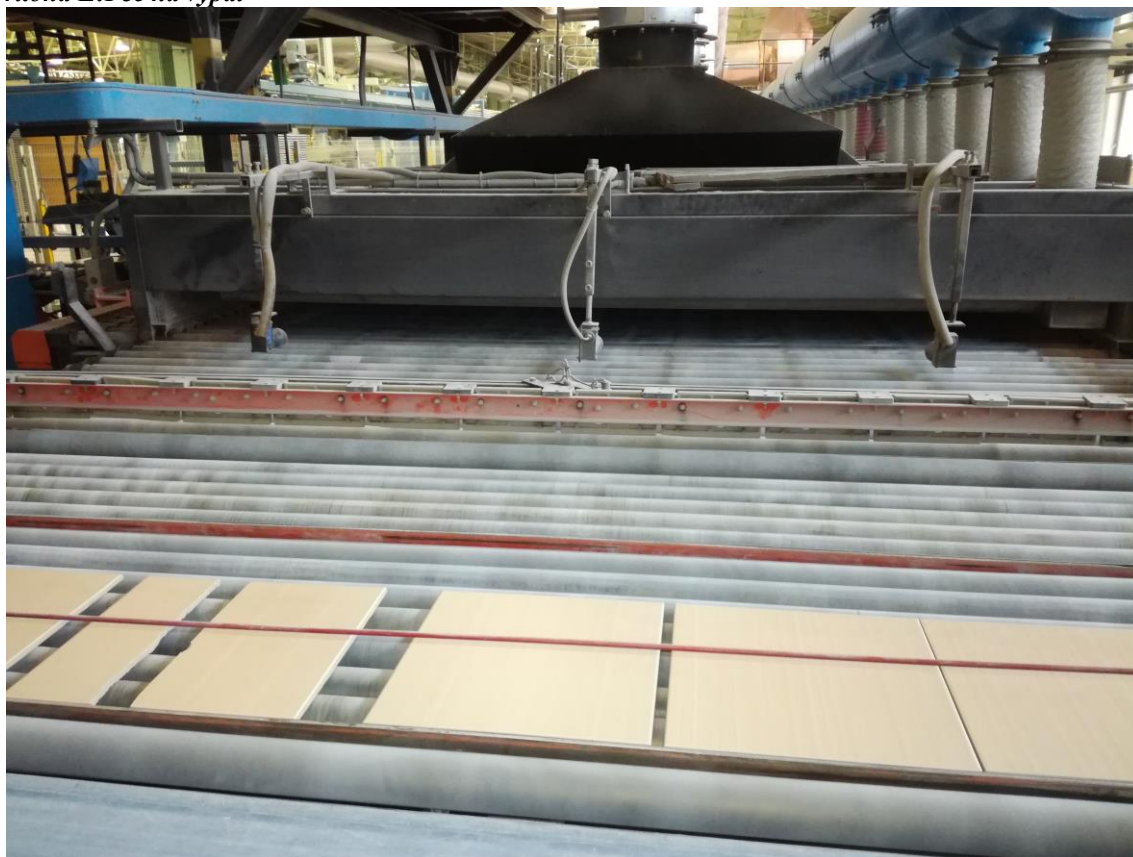
Příloha C: Sušení keramiky I



Příloha D: Sušení keramiky II



Příloha E: Pec na výpal



Příloha F: Velín výpalové pece



Příloha G: Schéma výpalné pece, ovládání úsekových teplot**Příloha H: Glazování**

Příloha CH: Digitální nanášení keramického inkoustu



Příloha I: Optická kontrola výsledného produktu



Příloha J: Balení, distribuce

