

ESF II projekt Západočeské univerzity v Plzni

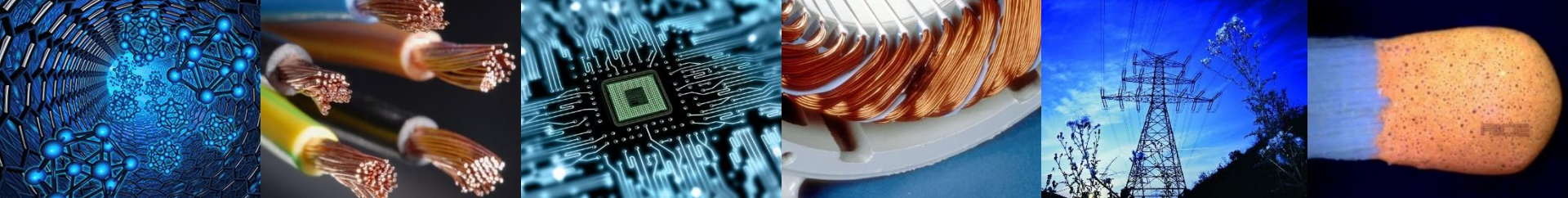
reg. č. CZ.02.2.69/0.0/0.0/18_056/0013239



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY



Západočeská univerzita v Plzni

Katedra materiálů a technologií

10.

Elektrotechnické materiály ***KET/ELTM***

Ing. Robert Vik, Ph.D.



**FAKULTA
ELEKTROTECHNICKÁ
ZÁPADOČESKÉ
UNIVERZITY
V PLZNI**

EK 410, rvik@ket.zcu.cz



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

MŠMT
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

Anorganické izolační materiály

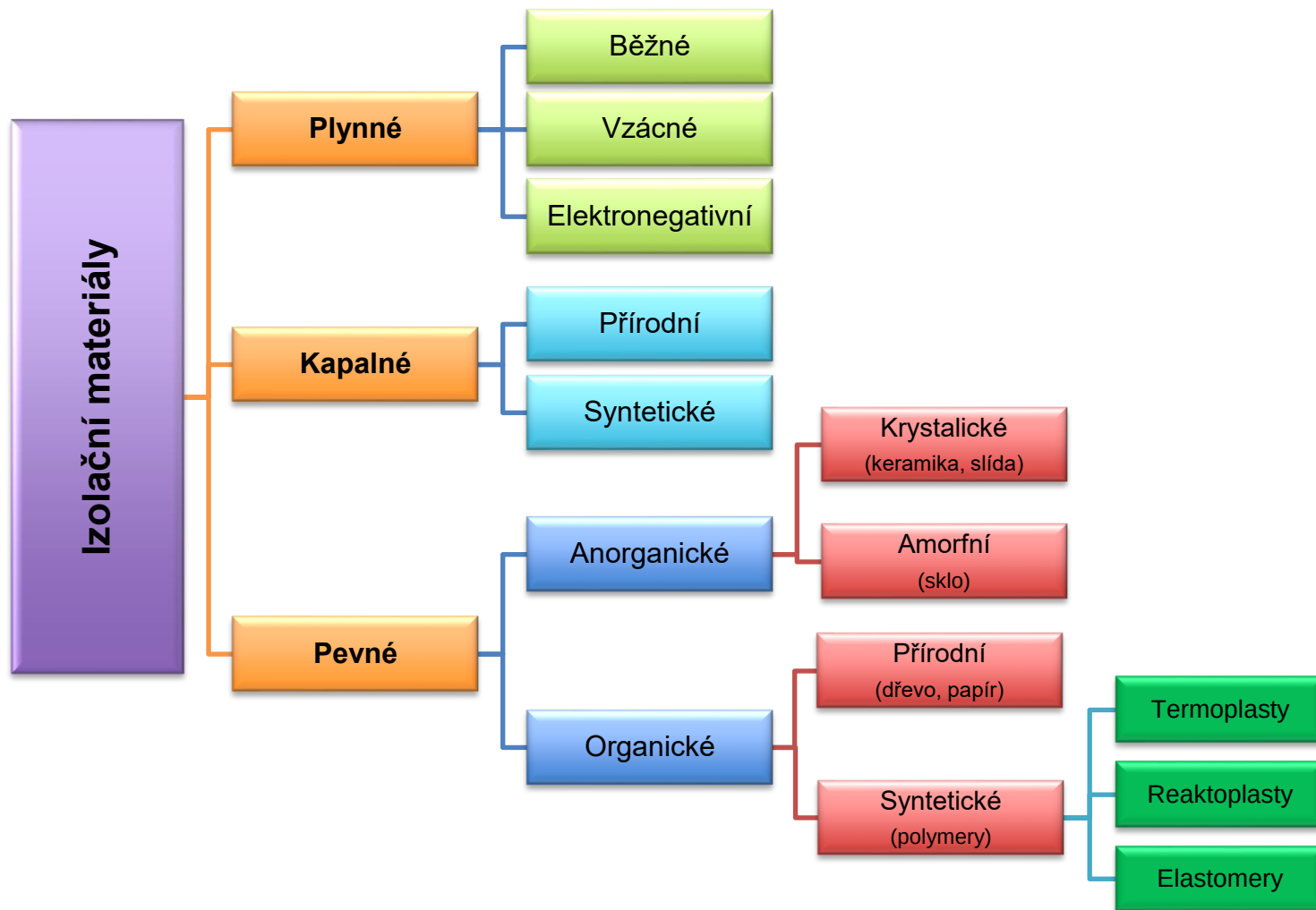


EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání



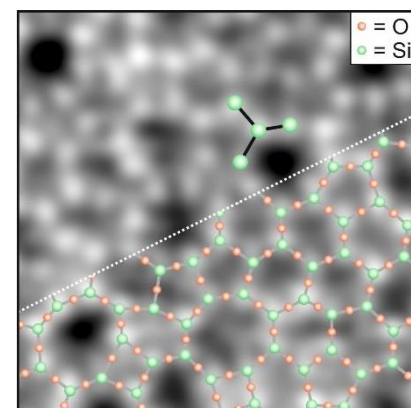
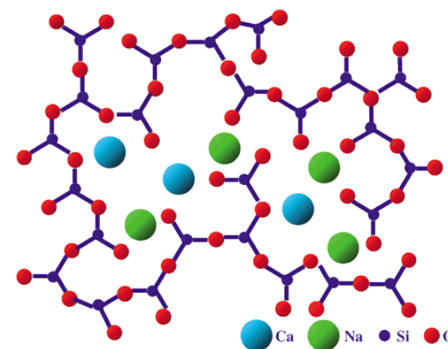
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

Rozdělení elektroizolačních materiálů



Sklo

- anorganická amorfní (tj. nekystalická) pevná látka
- vyrábí se tavením základních surovin a následným řízeným ochlazením vzniklé skloviny bez krystalizace
- **skelný stav** vzniká plynulým přechodem ze stavu kapalného do stavu pevného, kdy dochází k růstu viskozity až na tak vysokou hodnotu, že se materiál navenek jeví jako pevná látka
- nejběžnější **skla křemičitá** (SiO_2) a **boritokřemičitá** ($\text{SiO}_2 + \text{B}_2\text{O}_3$)
- k základnímu materiálu se přidávají **další oxidy** (např. CaO , Na_2O , K_2O a další) – úkolem je snížení teploty tavení, stabilizace, barvení atd.



Suroviny pro výrobu skel

sklotvorné suroviny	minerály, sloučeniny	horniny
SiO_2	křemen, živce, nefelín	sklářský (křemenný) písek
B_2O_3	borax, sassolin, kyselina boritá	
Al_2O_3	živce, nefelín, kryolit, hydroxid hlinitý	kaolín, fonolit, pegmatity, aplity
P_2O_5	fosfáty - apatit, kostní moučka	
stabilizátory		
CaO	kalcit, dolomit, fluorit	vápenec, dolomit
MgO	dolomit, magnezit	dolomit, magnezit
PbO	oxidy Pb_3O_4 nebo PbO , cerusit	
BaO	uhličitan nebo dusičnan barnatý	
ZnO	zinková běloba	
taviva		
Na_2O	soda, síran a dusičnan sodný, borax	fonolit a další horniny
K_2O	potaš, ledek, draselné živce	fonolit a další horniny
Li_2O	sloučeniny Li	
B_2O_3	borax, sassolin, kyselina boritá	
barvící substance		
Fe^{2+} , Fe^{3+} , Cu, Co, Ni, Cr, Au atd.		



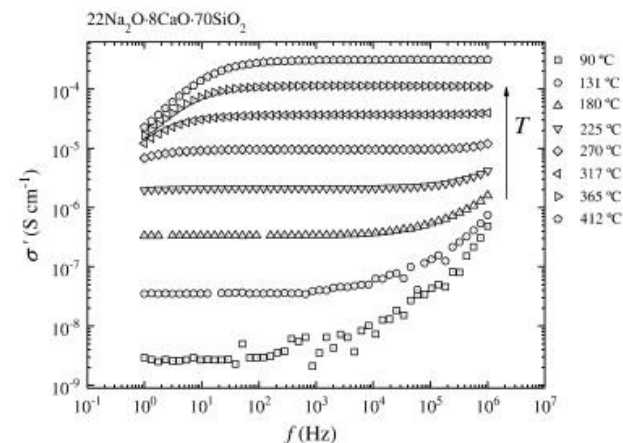
EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

Obecné vlastnosti skel

- vysoká propustnost světla
- odolnost proti povětrnostním a chemickým vlivům
- za běžné teploty tvrdé, křehké materiály
- homogenost (vhodné pro vakuové aplikace)
- nízká tepelná vodivost
- alkalické kovy zhoršují elektrické vlastnosti - iontová vodivost → malá povrchová rezistivita
- silně polární, malá povrchová rezistivita
- elektrická pevnost $E_p \sim 20$ až 40 kV/mm



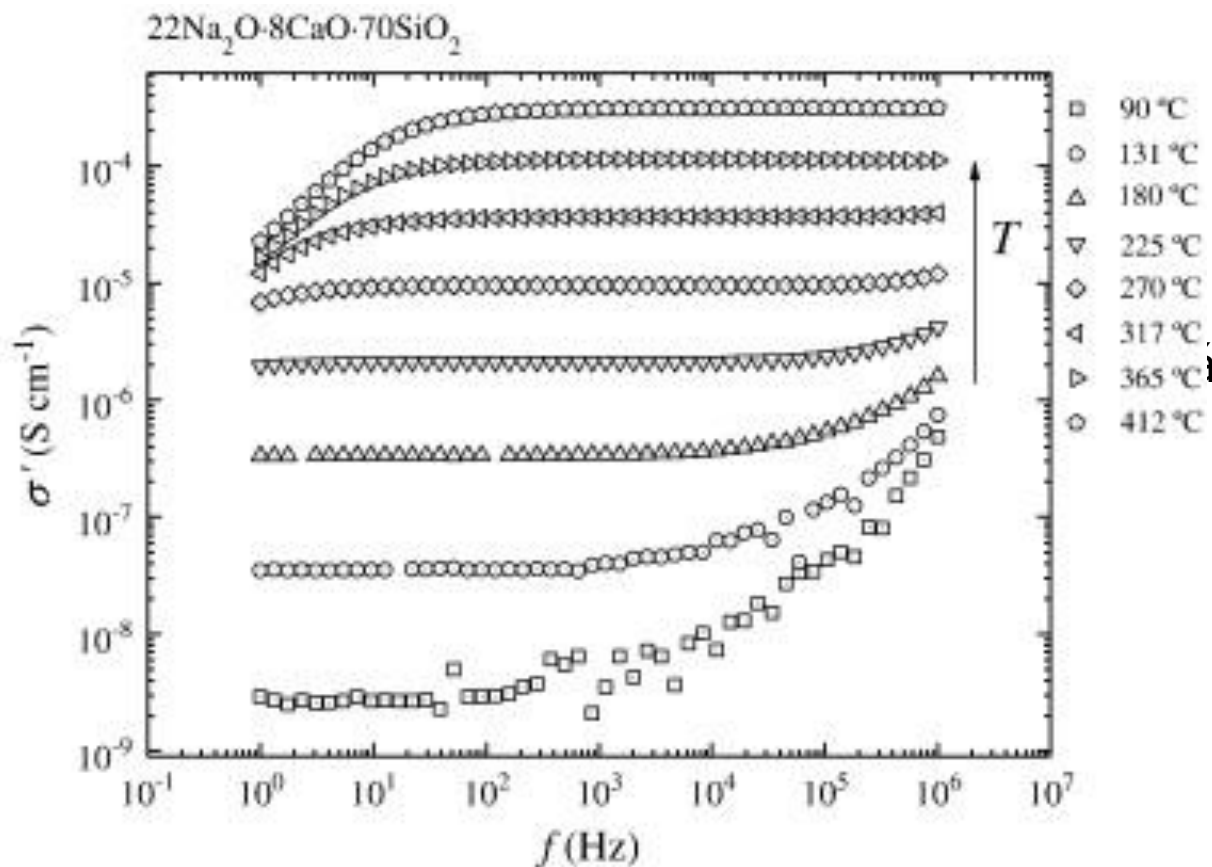
EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

Obecné vlastnosti skel

- vysoká propustnost světla
- odolnost proti povětrnosti
- za běžné teploty tvrdé
- homogenost (vhodná pro optiku)
- nízká tepelná vodivost
- alkalické kovy zhoršují povrchovou rezistivitu
- silně polární, malá pevnost E



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

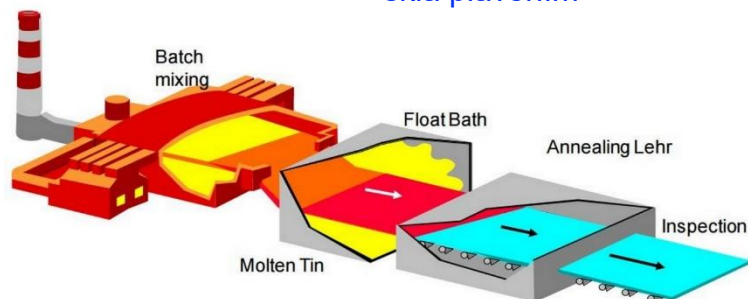


MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

Složení a výroba skla

- technologie výroby
 - ▶ úprava písků drcením, praním a tříděním (zrnitost $0,1 \div 1$ mm)
 - ▶ příprava vsázky - sestavení sklářského kmene a přísad a její dávkování
 - ▶ tavení skla - v tavicích pecích při teplotách $1400 \div 1600$ °C
 - ▶ tvarování skla – plavení, foukání, tažení, válcování, lití, lisování
 - ▶ chlazení skla – řízené, v intervalu $700 \div 400$ °C

Výroba plochého
skla plavením



výroba
izolátoru



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

Typy používaných skel

Alkalická skla ($\text{SiO}_2 + \text{CaO} + \text{Na}_2\text{O}, \text{K}_2\text{O}$)

- ▶ klasické sklo pro obecné použití
- ▶ ploché sklo dnes nejčastěji plavením (na hladině cínové lázně)
- ▶ čelní skla přístrojů, chemické sklo

Křemenné sklo (SiO_2)

- ▶ téměř čistý křemen (96 %) SiO_2
- ▶ výborné elektrické parametry ($\epsilon_r = 3,8$ - frekvenčně nezávislá, $\rho = 10^{17} \Omega \cdot \text{cm}$, $E_p = 30 \text{ kV/mm}$, $\text{tg } \delta = 2 \cdot 10^{-4}$)
- ▶ na rozdíl od klasických skel propouští i UV záření, minimální útlum v IR oblasti → optická vlákna
- ▶ velmi malý součinitel délkové teplotní roztažnosti ($5 \cdot 10^{-7} \text{ K}^{-1}$), vysoká teplota tání (cca 1600°C) → dobře odolává teplotním šokům
- ▶ velmi křehké
- ▶ kostry cívek pro vf techniku, vysokoteplotní aplikace (pece, trubice)



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

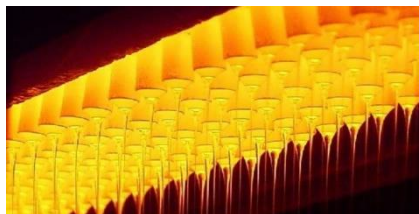


MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

Typy používaných skel

Boritokřemičitá skla ($\text{SiO}_2 + \text{B}_2\text{O}_3$)

- ▶ alternativa křemenného skla (obdobné vlastnosti, až o 30 % levnější)
- ▶ bezalkalická skla pro elektrotechniku, chemická skla (EUTAL, SIMAX)
- ▶ lepší elektrické vlastnosti než alkalická skla
- ▶ zátavová skla (podle složení přizpůsobení různým materiálům), vlákna, tkaniny



Olovnaté sklo ($\text{SiO}_2 + \text{PbO}$)

- ▶ CaO nahrazen PbO
- ▶ vysoce čirá skla, ochrana před RTG zářením (Pb cca do 30 %), skla s vysokou rezistivitou (PbO cca 20 %)

Nízkotavná skla

- ▶ teplota tání do 500 °C
- ▶ zátavy, glazury, smalty, ochranné vrstvy



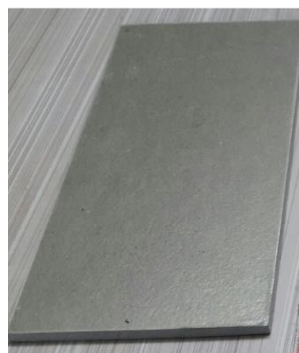
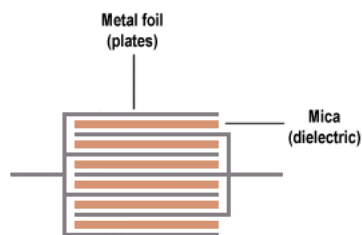
EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

Slída

- krystalický vrstevnatý minerál
- velmi dobré elektrické vlastnosti ($\epsilon_r = 5 - 7$, E_p až 100 kV/mm), vysoká teplotní odolnost (až 900 °C), dobře se dělí na tenké lístky
- v elektrotechnice dva typy – muskovit (draselná) , flogopit (hořečnatá)
- **lístková slída** – tloušťka 0,05 až 0,45 mm
 - ▶ podložky pod výkonové součástky, topné elementy
 - ▶ vrstvené izolační desky (Mikanit, Mikafloium)
 - ▶ kondenzátory



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

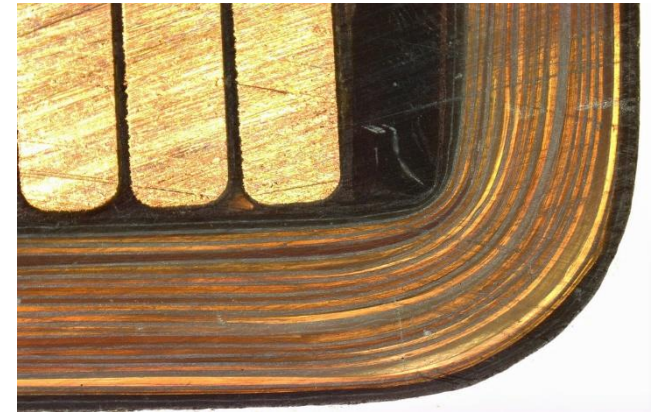
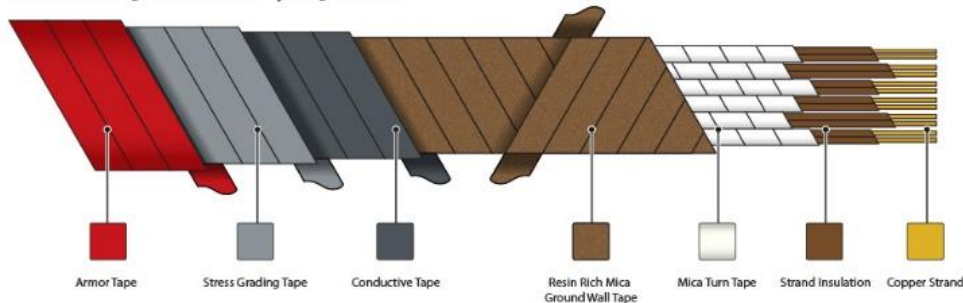
- **remika** – tzv. rekonstruovaná slída (slídový papír)
 - ▶ rozmělněná slída se na papírenském stroji zpracuje a spojí s nosičem (folie, skleněná tkanina)
 - ▶ remikanity, remikafólia (izolace vodičů velkých elektrických točivých strojů)



remika



HydroCoil™
Premium B-stage hard coils for hydro generators



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání



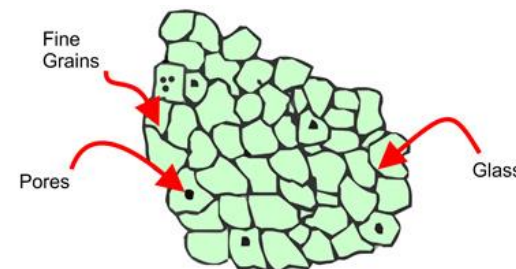
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

Keramika

- pevný, polykrystalický, ve vodě prakticky nerozpustný materiál
- vzniká vypálením anebo působením vysokého tlaku ze směsí anorganických nekovových surovin
- obsahuje krystalickou, skelnou a plynnou fázi (póry)

Obecné vlastnosti keramických materiálů

- ▶ závislé na chemickém a fázovém složení, mikrostruktuře a technologii zpracování
- ▶ velká pevnost a tvrdost i za vysokých teplot (žárupevná)
- ▶ odolnost proti otěru a vysokoteplotní korozi (žáruvzdorná)
- ▶ odolnost vůči náhlým změnám teploty
- ▶ malá teplotní roztažnost
- ▶ křehkost
- ▶ obtížná výroba tvarově složitých dílů
- ▶ velmi obtížné opracování
- ▶ obtížné spojování keramiky mezi sebou i s jinými materiály

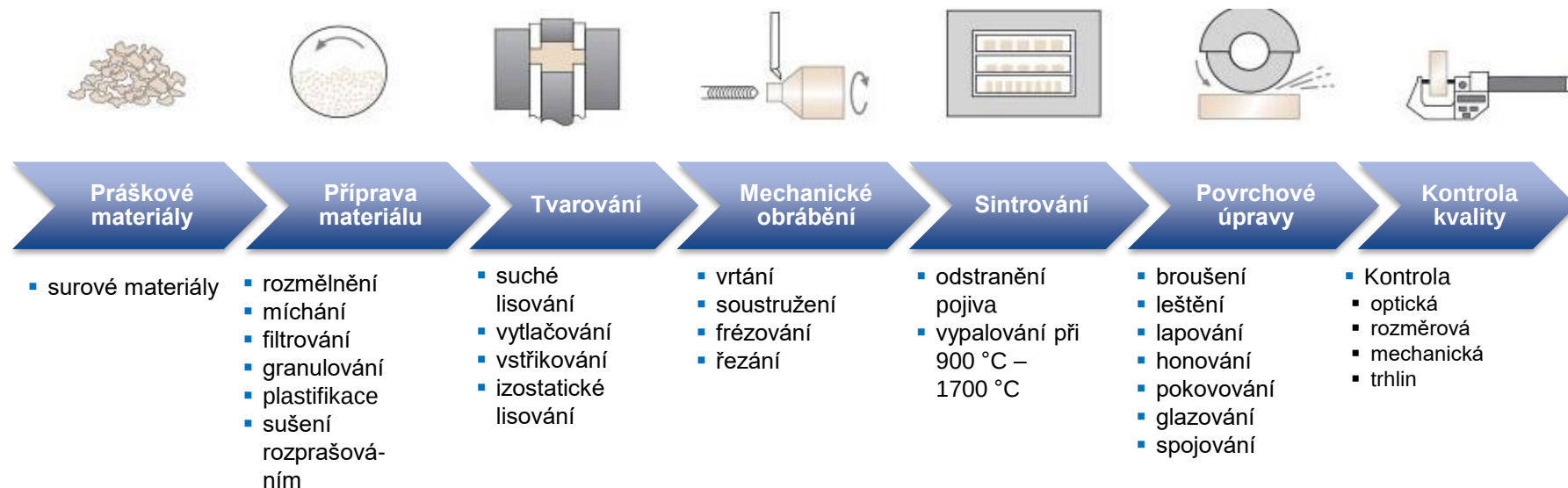


EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

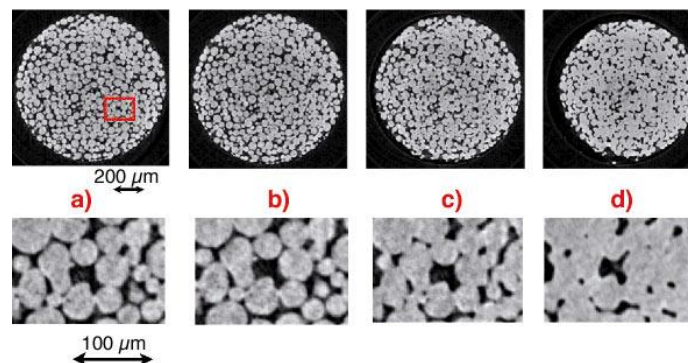


MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

Výroba keramiky



- **sintrování (slinování)** – spékání základních práškových materiálů při teplotách $0,5 \div 0,9 T_t$



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

Klasifikace keramik

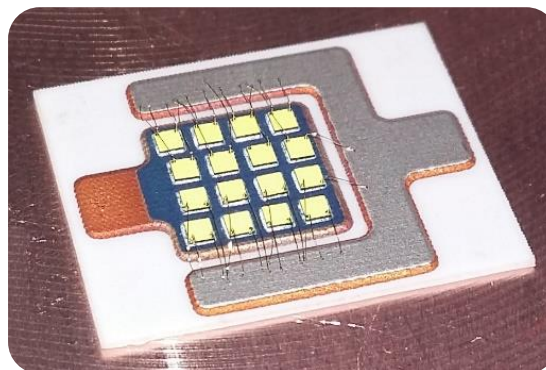
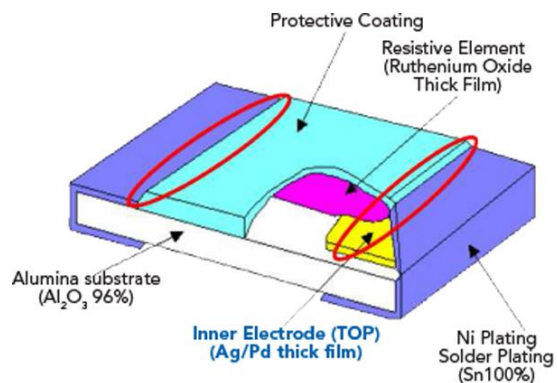
- dle chemického složení
- **oxidová keramika** – jednoduché oxidy kovů nebo složitější sloučeniny více kovových oxidů
 - ▶ korundová (Al_2O_3)
 - ▶ aluminiumtitanátová ($\text{Al}_2\text{TiO}_5 = \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2$)
 - ▶ zirkoničitá (ZrO_2)
 - ▶ aluminiumsilikátová ($\text{Al}_4\text{Si}_5\text{O}_{16}$) – porcelán, steatit, kamenina
- **neoxidová keramika** – bezkyslíkaté sloučeniny kovů (nitridy, karbidy)
 - ▶ nitrid hlinitý (AlN)
 - ▶ karbid křemíku (SiC)
 - ▶ nitrid křemíku (Si_3N_4)



Použití oxidové keramiky

Korundová keramika

- žáruvzdorné kelímky, vyzdívky
- brusné materiály a kotouče, keramická ložiska
- substráty pro výkonovou elektroniku (dobrá tepelná vodivost), chladiče
- součástky pro elektroniku (nosné prvky SMD cívek, rezistorů)



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

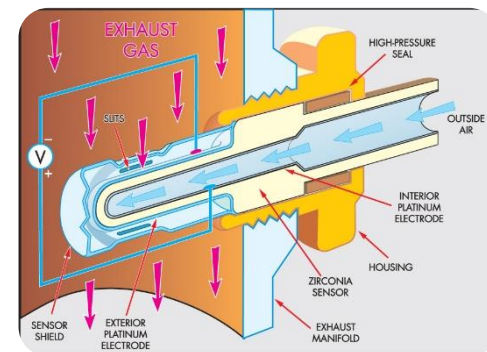
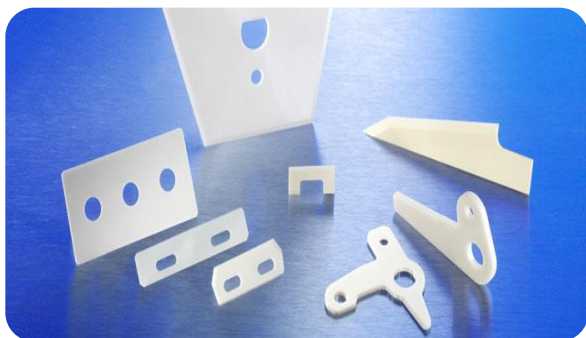


MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

Použití oxidové keramiky

Zirkoniová keramika

- velká teplotní roztažnost (srovnatelná s ocelí, cca $10 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) – spojování s ocelí
- vysoce žáruvzdorný materiál → tavicí nádoby, pece (sklářny, slévárny)
- součást kyslíkových čidel (spalovací zařízení) – lambda sonda
- řezné nástroje, povlaky, prvky pro tažení drátů
- keramická těsnění a ložiska
- dentální keramika



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

Použití oxidové keramiky

Silikátové keramiky

- **porcelán** – izolátory pro elektrická vedení, průchodky transformátorů, kabelové koncovky
- **kamenina** – velké izolátory, nosiče odporových drátů apod.
- **steatit** (hořečnatý porcelán) – podpěrné izolátory, průchodky a izolační součásti nn a vn
- **ultraporcelán** (tvrdý porcelán) – izolátory vn a vvn, konstrukční součásti s velkou mechanickou pevností



výroba
izolátoru



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

Použití neoxidové keramiky

- **karbid křemíku SiC** – topné elementy, vyzdívky pecí, brusné rouno, polovodičové součástky
- **nitrid hliníku AlN** – substráty pro výkonovou elektroniku, chladiče, piezoelektrické elementy, povlaky
- **nitrid křemíku Si₃N₄** – hořáky, svářecí trysky, tepelné výměníky, kelímky, povlaky nástrojů
- vysoce tvrdá abraziva (B₄C, BN), řezné nástroje (WC), elektrody pro tavení kovů (ZrB₂), topné články (MoSi₂)

Material	Alumina (99.5%)	Alumina (96%)	Beryllium Oxide (99.5%)	Aluminum Nitride	Fused Silica	Silicon	Silicon Carbide
Chemical Formula	Al ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	BeO	AlN	SiO ₂	Si	SiC
Melting Point (°C)	2072	2072	2514 to 2626	2397 to 2507	1713	1414	1478 to 1722
Maximum Use Temperature (°C)	1750	1700	800 to 2045	1027 to 1727	1100	477 to 527	297 to 697
Coefficient of Thermal Expansion (micrometer per °C)	7 to 8.4	8.2	7.4 to 9	4.3 to 5.6	0.55	2.56 to 3	5 (7.9 to 11)
Specific Heat (joules per kilogram*kelvin)	880	880	750 to 1020	740 to 820	740	668 to 715	510 to 750
Thermal Conductivity (W/(mK))	25.5 to 35	20 to 25	209 to 330	60 to 177	1.38	84 to 156	70 to 120
Dielectric Constant (relative) @ 1MHz	9.8	9	6.1 to 7.5	8.3 to 9.3	3.82	11 to 12	-
Bulk Resistivity (Ω per centimeter)	> 1e14	>1e14	>1e16	>1e14	>1e10	1e6 to 1e10	1e2 to 1e6



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

Použití neoxidové keramiky

- **karbid křemíku SiC** – topné elementy, vyzdívky pecí, brusné rouno, polovodičové součástky
- **nitrid hliníku AlN** – substráty pro výkonovou elektroniku, chladiče,

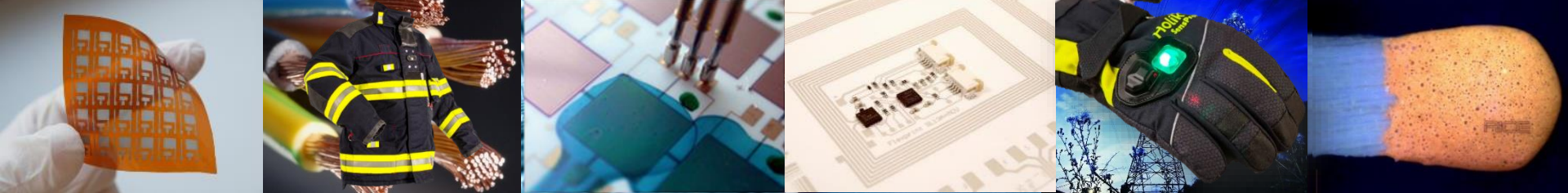
Material	Alumina (99.5%)	Alumina (96%)	Beryllium Oxide (99.5%)	Aluminum Nitride	Fused Silica	Silicon	Silicon Carbide
Chemical Formula	Al ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	BeO	AlN	SiO ₂	Si	SiC
Melting Point (°C)	2072	2072	2514 to 2626	2397 to 2507	1713	1414	1478 to 1722
Maximum Use Temperature (°C)	1750	1700	800 to 2045	1027 to 1727	1100	477 to 527	297 to 697
Coefficient of Thermal Expansion (micrometer per °C)	7 to 8.4	8.2	7.4 to 9	4.3 to 5.6	0.55	2.56 to 3	5 (7.9 to 11)
Specific Heat (joules per kilogram*kelvin)	880	880	750 to 1020	740 to 820	740	668 to 715	510 to 750
Thermal Conductivity (W/(mK))	25.5 to 35	20 to 25	209 to 330	60 to 177	1.38	84 to 156	70 to 120
Dielectric Constant (relative) @ 1MHz	9.8	9	6.1 to 7.5	8.3 to 9.3	3.82	11 to 12	-
Bulk Resistivity (Ω per centimeter)	> 1e14	>1e14	>1e16	>1e14	>1e10	1e6 to 1e10	1e2 to 1e6



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY



Západočeská univerzita v Plzni

Katedra materiálů a technologií

Děkuji za pozornost



**FAKULTA
ELEKTROTECHNICKÁ
ZÁPADOČESKÉ
UNIVERZITY
V PLZNI**



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY