

# 5. Mikrostruktura a vlastnosti

## 5.0 Úvod

Keramiky jsou *heterogenní materiály*, tzn. materiály s vnitřními fázovými rozhraními neboli “materiály s mikrostrukturou”. Jsou *polykrystalické* (s nízko- či vysokoenergetickými rozhraními zrn nebo se skelnou fází mezi jednotlivými zrny resp. krystality) a většinou *vícefázové*. Vlastnosti jednotlivých fází jsou určeny složením těchto fází a jejich krystalografickou strukturou, zatímco *efektivní vlastnosti* materiálu jako celku jsou určeny jeho mikrostrukturou, která je samozřejmě výsledkem složení a výrobních procesů.

## 5.1 Charakterizace mikrostruktury

*Mikrostrukturní charakteristiky a jejich kvantitativní míry*: objemové frakce jednotlivých fází, velikost zrn (a její rozdělení), tvar a orientace zrn, koordinační číslo (a konektivita resp. spojitost), kontiguita (poměr styčných ploch), pórovitost (objemová hmotnost), velikost pórů a její distribuce, tvar a orientace pórů, specifický povrch, chemické a fázové složení.

*Metody měření*: Archimedova metoda (objemová hmotnost, pórovitost), rtuťová porozimetrie (otevřená pórovitost a rozdělení velikosti pórů), optická resp. elektronová mikroskopie (výbrusy, nábrusy, lomové plochy) ve spojení s obrazovou analýzou a stereologickými teorémy (Delesse-Rosiwalův, Cauchyho) resp. korekčních postupů (transformace podle Saltykova resp. podle Cruz-Orive), tomografické metody, elektronová mikrosonda a RTG mikrodifraktometrie.

## 5.2 Konstitutivní rovnice a materiálové vlastnosti

*Materiálové vlastnosti sensu strictu* jsou koeficienty v *lineárních konstitutivních rovnicích*. Všechny ostatní materiálové vlastnosti (např. parametry popisující chování nelineárních materiálů nebo charakteristiky skokových změn – tzv. “breakdown characteristics” jako mechanická pevnost či elektrická pevnost) se musí považovat za pouze *operačně definované vlastnosti* (tj. vlastnosti, které jsou definovány pouze specifickým a přesně předepsaným postupem měření).

- *Mechanické vlastnosti*: elastické moduly a Poissonovo číslo (Hookův zákon), pevnost, lomová houževnatost, tvrdost, únava (napětíová koroze), otěruvzdornost.
- *Termické vlastnosti*: tepelná vodivost (Fourierův zákon), specifické teplo.
- *Termomechanické vlastnosti*: koeficient tepelné roztažnosti (Duhamel-Neumannův zákon), odolnost vůči teplotním rázům.
- *Elektrické a dielektrické vlastnosti*: elektrická vodivost (Ohmův zákon), permitivita (a charakteristické parametry hysterezní smyčky u feroelektrických keramik), pyroelektrické koeficienty, piezoelektrické moduly a koeficienty elektrostriktce, elektro-optické koeficienty, elektrická pevnost.
- *Magnetické vlastnosti*: permeabilita (a parametry hysterezní smyčky u feromagnetických keramik), koeficienty magnetostruktce.
- *Optické vlastnosti*: index lomu, koeficient absorpce, dvojlom (u anizotropních materiálů), rozptyl (u heterogenních materiálů).

Všechny tyto vlastnosti jsou závislé na teplotě. Navíc, elektrické, magnetické a optické vlastnosti jsou závislé na frekvenci elektrického proudu resp. elektromagnetických vln.

### 5.3 Efektivní vlastnosti heterogenních materiálů

*Efektivní vlastnosti* jsou makroskopické vlastnosti heterogenních (polykrystalických a / nebo vícefázových) materiálů, včetně polykrystalické keramiky, keramických kompozitů a porézní keramiky. Obvykle (až na výjimky, např. specifické teplo) závisí efektivní vlastnosti na mikrostruktuře materiálů, přesněji řečeno na dalších mikrostrukturních charakteristikách vedle kvantitativního fázového složení (tj. objemových frakcí). Jinými slovy, efektivní vlastnosti keramiky se nedají předpovídat jen na základě objemových frakcí (např. obsahu inkluzí resp. pórů), zvláště ne v případech, kde fázový kontrast (tj. rozdíl mezi vlastnostmi jednotlivých fází) je velký; v těchto případech je nezbytná znalost fázové topologie resp. alespoň určitých jejich rysů

- *Efektivní elastické moduly* statisticky izotropní (tzv. kvazi-izotropní) polykrystalické keramiky vypočtené z elastických konstant monokrystalů (tj. složek tenzoru elasticity) → Voigt-Reuss-Hillův průměr,
- *Efektivní tepelná vodivost*, elektrická vodivost, permitivita, permeabilita a koeficient teplotní roztažnosti kvazi-izotropní polykrystalické keramiky vypočtené z hodnot naměřených na monokrystalech (tj. složek odpovídajících tenzorů druhého řádu) → jedná třetina stopy tenzoru,
- Efektivní elastické moduly, tepelná vodivost, elektrická vodivost, permitivita a permeabilita kvazi-izotropní *vícefázové polykrystalické* keramiky vypočtené z hodnot odpovídajících (objemově vážených) vlastností polykrystalických fází a jejich objemových frakcí → Voigt-Reussovy meze, Hashin-Shtrikmanovy meze,
- *Efektivní koeficient teplotní roztažnosti vícefázové polykrystalické* keramiky vypočtený z odpovídajících (objemově vážených) vlastností polykrystalických fází a jejich objemových frakcí → Levinův vztah, Turnerův vztah,
- Efektivní elastické moduly, tepelná vodivost, elektrická vodivost, permitivita a permeabilita kvazi-izotropní *porézní keramiky* vypočtené z odpovídajících vlastností pevné fáze (tj. matrice resp. skeletu) a pórovitosti → Voigtova mez, horní Hashin-Shtrikmanova mez, vztahy Cobla a Kingeryho a modelové vztahy exponenciálního resp. mocninového typu (Spriggs, Pabst-Gregorová, Phani-Niyogi-McLachlan).
- Nezávislost koeficientu teplotní roztažnosti na pórovitosti.

**Cvičení:** Používejte matematické modelování pro analytické řešení problému efektivní tepelné vodivosti porézní keramiky s idealizovanou mikrostrukturou (periodický materiál s kubickou jednotkovou buňkou – otevřenou i uzavřenou) za použití Voigt-Reussových vztahů. Srovnajte tyto analytické výsledky s numerickými výsledky získanými numerickým modelováním (metodou konečných prvků) za použití *komerčního software Abaqus*®. *Dodatečné explicitní otázky:*

- a.) Pro jaké další materiálové vlastnosti (vedle tepelné vodivosti) platí získané výsledky ?
- b.) Je předpověď závislosti tepelné vodivosti na pórovitosti na základě tohoto modelu realistická pro statisticky izotropní (kvazi-izotropní) keramiku ? Berte zvlášť v úvahu jejich vztah k Hashin-Shtrikmanovým mezím.