

# 11. Porézní a celulární keramika

## 11.0 Úvod

Keramiky jsou zřídka zcela hutné, protože ve většině případů nemohou být póry zcela odstraněny během výroby. Porézní keramiky však mají volný prostor záměrně včleněn do keramické mikrostruktury k plnění určitých funkcí. *Celková pórovitost* je  $\phi = 1 - \rho_r$ , kde  $\rho_r = \rho / \rho_0$  je *relativní hustota* ( $\rho$  = objemová hmotnost,  $\rho_0$  = teoretická hustota pevné fáze – matrice nebo skeletu – v praxi často hustota plně slinuté polykrystalické keramiky). Celková pórovitost je součet *otevřené pórovitosti* (měřitelná např. rtuťovou porozimetrií) a *uzavřené pórovitosti* a lze ji získat mikroskopickou obrazovou analýzou nebo výpočtem z výsledků dvojího vážení (Archimédovy metody), pokud je známa teoretická hustota.

*Celulární materiály* jsou vysoce porézní materiály s  $\phi > 70\%$  (2D uspořádání / voštiny nebo 3D síť / pěny s otevřenou nebo uzavřenou buňkovou strukturou, s pravidelným nebo nahodilým prostorovým uspořádáním). V případě nanometrických velikostí pórů se tyto vysoce porézní materiály nazývají *aero-* nebo *xerogely*.

## 11.1 Příprava porézních a celulárních keramik

- Částečné slinování
- Slinování dutých částic (např. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> mikrokuliček)
- Pyrolýza organických nebo biopolymerních pórotvorných činidel (např. polystyrenu, škrobů)
- Přímým napěňováním suspenzí pěnidly
- Polymerní replikační techniky (potažením polymerní pěnou a následným vyhořením)
- (Bio-)templating (tj. užití “šablon“, angl. templates, např. infiltrace zkarbonizovaného dřeva)
- Rapid prototyping
- Extruzí (pouze pro translačně symetrická tělesa, např. voštin u cordieritových nosičů katalyzátorů výfukových plynů nebo u profilovaných cihel)

## 11.2 Mikrostruktura a vlastnosti porézních a celulárních keramik

Problém: Efektivní vlastnosti porézních keramik nejsou jednoduchou funkcí pórovitosti, ale závisí na všech rysech mikrostruktury.

Populární modely k popisu vztahů vlastnost – pórovitost jsou založeny na modelech, které vycházejí z plochy kolmé ke směru zatížení, velice často z minimální plochy průřezu (např. Riceovy MSA-modely, “minimum solid area“), avšak tyto modely se většinou skládají z periodicky se opakujících jednotkových buněk se speciálním tvarem pórů, např.

- póry mezi pevnými koulemi,
- izolované (uzavřené) sférické póry,
- cylindrické póry,

a jsou obvykle nereálné pro neuspořádané materiály. Explicitní výpočty jsou zdlouhavé a schopnost předpovědi pomocí výsledných rovnic je malá (platná pouze pro několik velmi speciálních případů).

3D celulární keramiky (tzn. pěny s otevřenou nebo uzavřenou buňkovou strukturou) se skládají z hran a stěn tloušťky  $t$  a délkou hrany  $L$ : Gibson-Ashbyho teorie (spojující přístup jednotkových buněk s rozměrovou analýzou) → relativní hustoty:

- Pěna s otevřenou buňkovou strukturou:  $\rho_r \propto \left(\frac{t}{L}\right)^2$
- Pěna s uzavřenou buňkovou strukturou:  $\rho_r \propto \left(\frac{t}{L}\right)^3$ ,

kde konstanty úměrnosti závisejí na tvaru buňky (kubická, rhombická, dodekaedr, tetrakaidekaedr nebo Gibson-Ashbyho jednotková buňka, ve které i tahové namáhání vede lokálně, tj. na mikrostrukturní úrovni, k ohybové deformace). Důležité je, že rozdělení pevné fáze v buňce nemusí odpovídat idealizovanému modelu (např. může dojít k akumulaci pevné fáze v rozích nebo na hranách) → idealizované modelové vztahy přestávají platit. Navíc v praxi stěny nebo hrany mohou být porézní sami o sobě → relativní hustota musí být nahrazena jinou normalizovanou hustotou  $> \rho_r$  (Green). Mnoho keramických pěn má buňky s průměrným počtem ploch 14, přičemž každá z nich má průměrný počet hran 5 (což odpovídá tetrakaidekaedrickému modelu).

Efektivní Youngovy moduly podle Gibson-Ashby teorie (rozměrová analýza):

- Pěna s otevřenou buňkovou strukturou:  $E_r = \rho_r^2$
- Pěna s uzavřenou buňkovou strukturou:  $E_r = \zeta^2 \rho_r^2 + (1 - \zeta) \rho_r$ ,

kde  $\zeta$  je frakce pevné fáze umístěná v hranách (vztažena na celkový objem pevné fáze ve stěnách včetně hran). Brezny and Green úspěšně aplikovali Gibson-Ashbyho teorii k analýze naměřených dat u korundových, mullito-korundových, zirkoničito-korundových a jiných pěn s otevřenou buňkovou strukturou. Podobně, napěněná skla (skelné pěny) a slinuté duté skleněné kuličky byly úspěšně modelovány jako pěny s uzavřenou buňkovou strukturou. Další analýzy založené na této teorii se týkají pevnosti, lomové houževnatosti, chování při teplotních rázech a creepu.

### 11.3 Aplikace porézních a celulárních keramik

Porézní a celulární materiály jsou v inženýrské praxi obecně užívány ke snížení hmotnosti struktur (konstrukcí), kde je požadována vysoká pevnost a tuhost (lehčené konstrukční materiály). Ve srovnání s jejich hutnými protějšky má porézní a celulární keramika relativně vysokou lomovou houževnatost a dochází k postupnému poškození namísto okamžitého (katastrofického) lomu (zničení).

- Žárovzdorné izolační materiály
- Tepelné a akustické izolační materiály
- Lehčené konstrukční materiály
- Nosiče katalyzátorů
- Vysokoteplotní filtry nebo membrány