

10. Keramické kompozity a funkčně gradované materiály

10.0 Úvod

Většina keramických materiálů vykazuje v mikrostruktuře jistý stupeň *heterogenity* a *neuniformity*. Na druhé straně existují materiály, u nichž je mikrostrukturní heterogenita a neuniformita vytvářena záměrně. Jedná se o kompozity a funkčně gradované materiály. Hlavním cílem výroby keramických kompozitů je zvýšení lomové houževnatosti (nehledě na možné zvýšení pevnosti a možnost ovlivnění jiných vlastností), protože křehkost patří mezi hlavní nevýhody keramiky pro konstrukční aplikace. Hlavním cílem u funkčně gradovaných materiálů je zabránit delaminaci, způsobené nesourodou teplotní roztažností těles tvořených dvěma funkčními povrchy (např. keramická vrstva pro tepelnou izolaci a odolnost proti korozi na straně jedné a kovová vrstva s vysokou houževnatostí a vodivostí na straně druhé).

10.1 Keramické kompozity

Hlavní problém keramiky: křehkost → zpevnění izometrickými částicemi, destičkami, whiskery (monokrystalické) nebo vlákny (polykrystalická, krátká nebo nekonečná) → zvýšení lomové houževnatosti až na hodnotu cca $10 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ (maximálně cca $20 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ u kompozitů s nekonečnými vlákny). Keramické kompozity jsou kompozity s keramickou maticí s izolovanými inkluzemi nebo s bikontinuální skeletovou mikrostrukturou s alespoň jednou keramickou fází. (Pro dosažení maximálního zvýšení hodnoty pevnosti a tuhosti by inkluze měly být silně vázány v matici, zatímco pro maximální zvýšení lomové houževnatosti jsou v určitých případech lepší slabší vazby (např. vláknité žáromateriály) a výhodné mohou být dokonce mikrotrhlínky kolem inkluzí (např. parciálně stabilizovaný oxid zirkoničitý, PSZ). Podobně, porézní keramiky a keramiky s více heterogenní mikrostrukturou a / nebo s velkými anizometrickými zrny mohou vykazovat vyšší lomovou houževnatost než jejich hutná, homogenní a jemně zrnitá obdoba (jejich pevnost je samozřejmě nižší).

Mechanismus zpevnění keramických kompozitů:

- Odklon a ohyb trhliny
- Přemostění trhliny a zaklínění lomu vlákny
- Mikrotrhlínkování
- Transformační zpevnění

Vlákna a whiskery pro zpevnění (typické průměry – vlákna 10 μm , whiskery 1-5 μm):

- Uhlíková vlákna
- SiC vlákna
- Oxidová vlákna (skelná, mullitová, zirkoničitá, korundová)
- SiC whiskery

Výroba keramických kompozitů:

Izometrickými resp. destičkovitými částicemi, whiskery a krátkými vlákny zpevněné kompozity mohou být vyrobeny obvyklými keramickými procesy užívanými pro výrobu

vícefázových keramik. Kompozity se zpevňujícími whiskery a krátkými vlákny se vyrábí např. žárovým lisováním. V případě výroby kompozitů s nekonečnými vlákny je prvním krokem vytvoření trojrozměrné vláknité struktury postupy užívanými v textilním průmyslu (tkaním, štepováním, pletením a oplétáním). V případě kompozitů zpevněných vlákny a whiskery je nutné minimalizovat reakci mezi matricí a vlákny, resp. whiskery, tzn. teplota procesu nesmí být příliš vysoká → chemical vapor impregnation (CVI) nebo impregnace kapalinou (tj. infiltrace keramického prekurzoru) s termickým rozkladem (pyrolýza).

Typy keramických kompozitů:

- Al_2O_3 - ZrO_2 kompozity
- SiC částice / Si_3N_4 matrice
- SiC whiskery / Al_2O_3 matrice
- SiC whiskery / Si_3N_4 matrice
- Nekonečná vlákna / skelná matrice
- Carbon / carbon kompozity
- SiC / SiC kompozity
- Oxid / oxid kompozity.

10.2 Funkčně gradované materiály

FGM (= *functionally graded materials* nebo *functional gradient materials*) jsou materiály s neuniformní mikrostrukturou, t.j. s (*kontinuálními* nebo *víceřadovou*) změnou (chemického a / nebo fázového) *složení* a / nebo *mikrostruktury*. Na rozdíl od vytváření vrstev tradičním způsobem nebo tradičního spojování materiálů jsou tyto změny u FGM pozvolnější, s cílem zvýšení adheze a zabránění separaci na rozhraních (delaminaci), způsobené napětími vyvolanými teplotou vlivem nesourodé teplotní roztažnosti, což je hlavní nevýhoda materiálů s povrchovou vrstvou nebo vzájemně propojených materiálů se skokovou změnou vlastností. Vzhledem k soudržnosti materiálu by rozdíl v teplotní roztažnosti neměl převýšit 25 %. U FGM je tedy ostré rozhraní nahrazeno gradientovou přechodnou oblastí.

Strategie systémové analýzy → “*inverse design procedure*”: geometrie a hraniční podmínky; výběr materiálů; efektivní materiálové vlastnosti jsou vypočteny pro všechna složení (Voigt-Reussovy nebo Hashin-Shtrikmanovy meze, „effective medium theory”); při daném gradientu složení (distribuční funkce) jsou vypočítána napětí pro požadované teplotní rozdíly; pokud pevnost materiálu nemá odpovídající hodnotu (příliš nízká) je výpočet opakován s jiným gradientem složení nebo s jinými materiály. Vhodná *distribuční funkce pro gradienty složení* je $\phi_A(x) = x^n$, kde ϕ_A je objemová frakce fáze A, x relativní poloha – vrstva - v FGM (t.j. bezrozměrná vzdálenost vztažená k celkové tloušťce FGM) a n je libovolně zvolený (nastavitelný) parametr.

Příprava FGM - metody využívající plynné, kapalně i pevné fáze.

Materiály a aplikace (současné a potenciální):

- *Konstrukční materiály*: Koncepce FGM původně rozvíjena ke snížení napětí vyvolaných vlivem teploty u tepelných bariér.
- *Funkční materiály*: Současný výzkum – rozšíření FGM konceptu na elektronické, magnetické, optické a biomedicínské materiály.