

3. Sušení a vyhořívání pojiv

3.0 Úvod

Sušení = eliminace volné a adsorbované vody (včetně kapilární) z vytvarovaných syrových keramických těles; matematické modelování: přenos tepla a hmoty. Vyhořívání pojiv, tzn. odstranění organických pojiv a aditiv před slinováním je proces podobný sušení, tak vyhořívání je obvykle doprovázeno *smrštěním*.

3.1 Principy sušení

- Obsah vody v keramických tělesech (vlhkost), smrštění (lineární a objemové), kontaktní úhel (Young-Laplaceova rovnice, smáčení, kapilární sání), propustnost (permeabilita) kapalin porézními tělesy (Kozeny-Carmanova rovnice), vlhkost vzduchu, teplota vlhkého a mokrého teploměru, vlhkostní diagram.
- *Etapy sušení:*
 - *etapa rostoucí rychlosti sušení:* teplota tělesa se zvyšuje z počáteční hodnoty na hodnotu teploty vlhkého teploměru (Fourierův zákon, přenos tepla) – pro konvekční resp. konvekčně-radiační sušení, teplota vnitřku tělesa nižší než povrchu,
 - *etapa konstantní rychlosti sušení* – konstantní rychlost vypařování; nesmí být příliš vysoká, ztráta kapaliny vypařováním na povrchu (meniskus kapalina-pára) musí být kompenzována tokem kapaliny vlivem koncentračního gradientu (Fickův zákon, difúze) nebo gradientem tlaku (Darcyho zákon, tok); vodou nasycené keramické těleso → *smrštění* (řízeno kapilárním sáním) dokud se obsah vody v tělese nedostane pod kritickou hodnotu (kritická vlhkost),
 - *etapa klesající rychlosti sušení* – poloměr menisku < poloměr póru, zbytková vlhkost v tělese (→ další přenos vlhkosti vypařováním); keramické těleso nenasyčené vodou; teplota tělesa se zvyšuje z teploty mokrého teploměru na teplotu suchého teploměru sušárny (opět, v případě konvekčního sušení teplota vnitřku tělesa zaostává za teplotou povrchu); neprobíhá smrštění (proto nekritická etapa sušení).

3.2 Typy sušení

- *Konvekční* (konvekčně-radiační) sušení: volnoprostorové sušení nebo sušení využívající ohřev pomocí infračerveného záření a / nebo proudění horkého vzduchu
- *Elektroodporové sušení:* Jouleovo teplo jako zdrojový člen ve Fourier-Kirchhoffově rovnici (uniformní prohřev celého objemu; užívá se u velkých těles, např. u velkých elektroporcelánových izolátorů; probíhá pouze nad hodnotou perkolačního prahu, tzn. pokud je systém pórů vzájemně propojen vodou.
- *Mikrovlnné sušení*

Mikrovlny (MW): elektromagnetické vlny s frekvencí 0.3 – 300 GHz (odpovídající rozsah vlnových délek 1 m – 1 mm), typické 2.45 GHz, zřídka 0.915, 28 nebo 60 GHz; principem podobný: dielektrický nebo radio-frekvenční ohřev (1 – 100 MHz).

Interakce materiálů s MW: kovy odráží MW, izolátory (nízkoztrátová dielektrika, např. vzduch, sklo a většina keramik při pokojové teplotě) propouští MW; pouze u ztrátových dielektrik (při pokojové teplotě např. voda a SiC) dochází k interakci s MW a dielektrické ztráty (závisí na teplotě, frekvenci a pórovitosti nebo obsahu vlhkosti) jsou transformovány na teplo → zdroj tepla ve Fourier-Kirchhoffově rovnici je příkon mikrovlnné energie na jednotku objemu. Nad kritickou teplotou mohou také izolátory absorbovat MW.

Mechanismy: iontová kondukce (při nízkých frekvencích), rotace dipólů (při vysokých frekvencích); hloubka průniku: několik cm (vlnová délka ve vakuu 12.2 cm pro 2.45 GHz MW); ztrátový činitel: vysoké pro vodu a pro SiC.

Výhody: uniformní prohřev objemu, rychlejší průběh (faktor 10), úspora energie (také skoro o jeden řád, hlavně v hybridních sušících systémech), lepší kontrola procesu a zvýšení kvality produktů. Avšak, pro obsah vody > 5-10 % je MW ohřev příliš drahý (pouze 50 % elektrického příkonu je přeměno na MW energii); pro nízké obsahy vody < 5 % se MW ohřev stává ekonomickým. MW ohřev může být také použit k vyhořívání pojiv a slinování (oxidy, karbidy, nitridy).

3.3 Problémy při sušení

Hlavní problém: vypařování kapaliny v oblasti konstantní rychlosti sušení nesmí být příliš rychlé; jinak tok kapaliny z vnitřku tělesa nemůže kompenzovat ztrátu kapaliny na povrchu, osychání povrchu a preferenční smrštění → napětí → trhlinkování nebo deformace; stejné problémy se mohou objevit když těleso obsahuje gradient vlhkosti nebo gradient velikosti částic.

Obzvláště problematické je *sušení gelů* (hydrogely → aerogely nebo xerogely), způsobeno velmi malými částicemi nebo polymerními strukturami (→ Schererova teorie sušení).

Metoda pro sušení gelů za účelem docílit vysoce porézní xerogely ($\phi > 90\%$): *superkritické sušení* (kapalina odstraněna nad kritickým bodem, např. 31 °C a 7.4 MPa pro CO₂).

3.4 Odstranění pojiva (vyhořívání)

Mnoho keramických tvarovacích technik (např. injekční vstřikování) obsahuje velké množství organických přísad (takzvaných pojiv, včetně plastifikátorů, lubrikantů a jiných funkčních aditiv) → odstranění pojiv je důležitým krokem před slinováním; tři metody:

- *Extrakce vlivem kapilárního sání* ohřevem syrového vzorku v práškovém zásypu, absorbujícím roztavené pojivo,
- *Odstranění rozpouštědla ponořením tělesa do kapaliny, která rozpouští pouze jednu složku pojiva*, zůstane otevřená pórovitá struktura pro následné vyhořívání,
- *Termický rozklad* (velmi podobné sušení syrových těles, pouze při vyšších teplotách – několik set °C).

Cvičení: Srovnej mikrovlnné sušení s jinými sušícími technikami z pohledu velikosti produktu (malé-velké), geometrie (jednoduchá-složitá), obsahu vody a energetické náročnosti.
Dodatečné explicitní otázky:

- a.) Ve kterých případech je vhodné resp. nezbytné kombinovat různé způsoby sušení ?
- b.) Jak může být mikrovlnná energie použita k vyhořívání organických pojiv ?
- c.) Může být keramika slinována pomocí mikrovln ? (Pokud ano, jak ?)