

2. Tvarování

2.0 Úvod

Tvarování (vytváření) je procesní krok v klasické keramické technologii, ve kterém je z keramického prášku (surovinové směsi) pomocí slabých vazeb vytvořeno těleso „green body“. Tvarování předchází: zdrobňování (mletí), mísení (s vodou nebo s jinými dočasnými pojivy, které jsou později eliminovány) a / nebo granulování (např. rozprachové sušení). Následuje: sušení a / nebo vyhořívání a výpal. Konečná mikrostruktura slinutého tělesa je určena mikrostrukturou syrového kompaktu, vytvořenou v průběhu tvarování, a defekty vzniklé (vnesené) během tvarovacího procesu již obvykle nelze odstranit následujícím procesním krokem. V případě tvarovacích technik užívajících kapalná pojiva (vodná nebo organická) by objemová frakce prášků (obsah prášku) měla být co nejvyšší pro ještě přípustnou hodnotu viskozity, k dosažení předepsaných geometrických tolerancí a minimalizaci smrštění a deformace → nezbytná je optimální deaglomerace a deflokulace suspenze nebo pasty. V případě suchého lisování se preferují granulované prášky pro optimálnější a snadnější zaplnění forem. V případě monodisperzních sférických částic je při nahodilém uspořádání maximální zaplnění cca 64 % (struktura rcp, random close packing). V případě lití lze matematicky vyjádřit (modelovat) rychlost tvorby tělesa pomocí Fickova (nebo Darcyho) zákona, zatímco rychlostní profil extruze může být vyjádřen pomocí bilance hybnosti v kombinaci s odpovídajícími konstitutivními rovnicemi (např. Herschel-Bulkley vztah pro zobecněnou viskoplastickou kapalinu).

2.1 Suché lisování

- *Pístové lisování*: obvykle používané pro malé a jednoduché tvary, používají se granulované prášky; výhody: rychlé, lehce automatizovatelné; problematické pro větší tělesa: gradienty hustoty (způsobené třením u stěny formy, obzvláště v případě jednosměrného pístového lisování, tzn. pohyb pístu z jedné strany) → neuniformní mikrostruktura (laminace); pro minimalizaci problému: dvousměrné pístové lisování (pohyb pístu ze dvou protilehlých stran).
- *Studené izostatické lisování (CIP)*: pro větší a komplexnější tvary (ale nesmí být příliš velké a příliš komplikované); hydrostatický tlak vyvíjen pomocí kapalného média ve všech směrech (lisování do mokré formy za použití gumového vaku) nebo biaxiální hydrostatický tlak (lisování do suché formy) → menší gradienty hustoty; tlak obvykle do 200 MPa (při lisování velkých těles do mokré formy tlak až 500 MPa).

2.2 Plastické vytváření

- *Točení, vytáčení (na formě), zatáčení (do formy)* plastických nebo polosuchých směsí (pro tenkostěnné tvary s rotační symetrií) typické pro stolní porcelán; *kalandrování* (ploché keramické výrobky, např. silnější folie).
- *Tažení* (translačně symetrické tvary, velké nebo malé): viskoplastické pasty (s mezi toku a zdánlivou viskozitou od několika Pas do několika kPas) jsou tvarovány tokem ústím lisu vyvolaným tlakem → radiální gradienty hustoty a v důsledku orientace částic textury; tlak vyvíjen šnekem nebo pístem; široký rozsah produktů od tradiční hrubé keramiky (profilované cihly) až k pokročilé jemné keramice (korundové nebo kordieritové nosiče katalyzátorů, při použití organických pojiv → kritickým krokem

bezdefektní vyhořívání); ko-extruze může být použita pro výrobu laminovaných nebo jednosměrně texturovaných kompozitů.

- *Injekční vstřikování* (pro malé výrobky se složitou geometrií): vsázka - keramický prášek s pojivem (většinou na bázi polymerů nebo vosků); zahřátím pojivo zkapalní; po vstříknutí do formy pojivo zatuhne → syrový výrobek může být vyjmut (většinou nutné pomalé vyhořívání pojiva před slinováním, obvykle v teplotním rozsahu 300–700 °C; tento procesní krok limituje velikost výrobků); finančně nákladná technika (z ekonomického hlediska používána jen pro masovou produkci); *horké lití* (nízkotlaká varianta injekčního vstřikování pro vsázku s nízkou hodnotou zdánlivé viskozity).

2.3 Licí techniky

- *Lití a tlakové lití* (preferenčně pro tenkostěnné výrobky, velké i malé): tvorba tělesa odvodňováním vysoce tekutých suspenzí (zdánlivá viskozita < 500 mPas) přes polopropustnou stěnu (sádra nebo porézní polymer); tloušťka střepe je funkcí druhé odmocniny času → možný vznik gradientu mikrostruktury ve směru tvorby střepe. Obdobné techniky *centrifugální lití* a *elektroforetická depozice* obvykle vykazují výraznější gradienty hustoty a mohou být použity pro výrobu funkčně gradovaných materiálů.
- *Gelové lití* a obdobné techniky, např. *přímé koagulační lití* (DCC), užívají (tepelně nebo chemicky indukovaného) in-situ fázového přechodu (např. přechod na gel) organických nebo vodných pojiv a umožňují lití suspenzí do neporézních forem (např. kovových) → uniformní (tzn. bezgradientová) mikrostruktura; podobným procesem je *škrobové lití* (SCC), které je založeno na schopnosti škrobu bobtnat ve vodě při zvýšené teplotě (škrob užíván jako pórotvorné a tělesotvorné činidlo).
- *Lití folií*: suspenze obsahující prášek, pojivo, rozpouštědlo, změkčovadlo a deflokulant se lije na nekonečný běžící pás (příměsi jsou odstraněny během výpalu).

2.4 Další techniky

- *Žárové lisování*: současné lisování a slinování syrových těles; tlaky > 20 MPa; zvýšení hnacích sil pro zhutnění (působí proti vnitřnímu tlaku pórů) bez zvýšení hnacích sil pro růst zrn → snížení slinovací teploty k dosažení vysokých hustot a jemnozrnné mikrostruktury; obecně užíváno ke slinování vysoce čistých produktů, které běžně vyžadují vysoké slinovací teploty nebo slinovací přísady (zhoršují některé vlastnosti).
- *Žárové izostatické lisování* (HIP): tlak 10–200 MPa vyvíjen tlakem horkého plynu; výrobky nemohou být příliš velké; jednoduché, nekomplikované tvary; může být použito také jako post-sintering technika ke snížení velikosti uzavřených pórů; velmi drahý proces (užívaný pouze pro vysoce kvalitní výrobky pro náročné aplikace).

Cvičení: Diskutujte výsledky matematického modelování procesu extruze pro kompozitní keramiky (s izometrickými částicemi, destičkami resp. vlákny/whiskery) ve vztahu ke vznikající mikrostrukturu, s důrazem na tvar částic. Diskutujte otázku mikrostrukturní uniformity u jiných tvarovacích procesů, zvláště u nových tvarovacích metod - gelového a škrobového lití. *Dodatečné explicitní otázky:*

- a.) Co je příčinou pro mikrostrukturní neuniformitu u extruze? Vysvětlete jasně rozdíl mezi materiálovými a procesními parametry.
- b.) Jakým způsobem se můžeme obecně vyhnout texturnímu efektu? Jakými metodami mohou vznikat anisotropní nebo neuniformní (funkčně gradované) keramiky?